



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Autotransformatorių techninės būklės vertinimas pagal  
ištirpusių dujų analizės ir dalinių išlydžių duomenis: praktinis  
tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Arūnas Samoliotovas**

Projekto autorius

**Doc. Gytis Svinkūnas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Autotransformatorių techninės būklės vertinimas pagal  
ištirpusių dujų analizės ir dalinių išlydžių duomenis: praktinis  
tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Arūnas Samoliotovas**

Projekto autorius

**Doc. Gytis Svinkūnas**

Vadovas

**Asist. Artūras Baronas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Arūnas Samoliotovas

## **Autotransformatorių techninės būklės vertinimas pagal ištirpusių dujų analizės ir dalinių išlydžių duomenis: praktinis tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Arūnas Samoliotovas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Samoliotovas, Arūnas. Autotransformatorių techninės būklės vertinimas pagal ištirpusių dujų analizės ir dalinių išlydžių duomenis: praktinis tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: autotransformatorius, techninė būklė, stebėseną, ištirpusių dujų analizė, dalinis išlydis, mašininis mokymasis, diagnostika.

Kaunas, 2026. 103 p.

## Santrauka

Baigiamajame projekte nagrinėjami autotransformatorių techninės būklės stebėsenos sprendimai Lietuvos elektros energijos perdavimo tinkle. Darbo tikslas – įvertinti pagrindinius autotransformatorių defektus, jų diagnostinius požymius ir pažangių diagnostikos metodų taikymo galimybes, siekiant anksti nustatyti techninės būklės blogėjimą ir sumažinti avarinių gedimų riziką.

Darbe analizuojama autotransformatorių reikšmė elektros perdavimo sistemos patikimumui, eksploataciniam saugumui ir stabiliai energijos perdavimo kokybei. Literatūros analizė parodė, kad dėl sudėtingos konstrukcijos, didelės ekonominės vertės ir strateginės svarbos autotransformatorių gedimai gali sukelti reikšmingų techninių bei ekonominių pasekmių. Todėl jų būklės stebėseną yra svarbi perdavimo tinklo eksploatacijos ir turto valdymo dalis.

Atliekant literatūros ir diagnostikos metodų analizę išskirti pagrindiniai autotransformatorių defektai: izoliacinės sistemos senėjimas, terminiai ir elektriniai pažeidimai, apvijų deformacijos, įvadų gedimai ir apkrovos perjungiklių pažeidimai. Nustatyta, kad dalis šių defektų ankstyvosiose stadijose neturi aiškių išorinių požymių, todėl vien periodinių apžiūrų nepakanka. Dėl šios priežasties autotransformatorių būklei vertinti būtina taikyti kompleksinius diagnostikos metodus.

Pagrindinis dėmesys darbe skiriamas alyvoje ištirpusių dujų analizei (DGA) ir dalinių išlydžių (PD) diagnostikai. DGA metodas vertinamas kaip vienas svarbiausių vidiniams terminiams ir elektriniams defektams nustatyti, nes pagal dujų koncentracijas, jų santykius ir kitimo tendencijas galima spręsti apie defekto pobūdį bei jo vystymosi intensyvumą. Dalinių išlydžių diagnostika leidžia vertinti izoliacijos pažeidimus, o elektrinių ir akustinių matavimo metodų derinimas padidina defektų aptikimo ir lokalizavimo galimybes.

Darbe taip pat nagrinėjamas mašininio mokymosi metodų taikymas DGA ir PD duomenims interpretuoti. Literatūros analizė parodė, kad dirbtinio intelekto metodai gali pagerinti gedimų klasifikavimą, sumažinti triukšmingų duomenų įtaką ir sudaryti prielaidas labiau automatizuotam techninės būklės vertinimui. Analizė leidžia teigti, kad klasikinės diagnostikos metodų ir pažangių duomenų analizės priemonių derinimas yra perspektyvi autotransformatorių stebėsenos kryptis.

Apibendrinant galima teigti, kad kompleksinė autotransformatorių techninės būklės stebėseną, pagrįsta DGA, PD ir duomenų analizės metodais, leidžia anksčiau identifikuoti galimus defektus, pagrįsti techninės priežiūros sprendimus ir mažinti neplanuotų gedimų riziką Lietuvos elektros perdavimo tinkle.

Samoliotovas, Arūnas. Assessment of Autotransformer Technical Condition Based on Dissolved Gas Analysis and Partial Discharge Data: Practical Study. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Gytis Svinkūnas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology

Field and area of study: field of study – Electrical Engineering; group of study fields – Engineering Sciences.

Keywords: autotransformer, technical condition, monitoring, dissolved gas analysis, partial discharge, machine learning, diagnostics.

Kaunas, 2026. 103 pages.

### **Summary**

This final project examines technical condition monitoring solutions for autotransformers in the Lithuanian electricity transmission network. The aim of the project is to assess the main defects of autotransformers, their diagnostic indicators, and the application possibilities of advanced diagnostic methods to identify deterioration of technical condition at an early stage and reduce the risk of emergency failures.

The project analyses the importance of autotransformers for reliability, operational safety, and stable quality of electricity transmission. It was determined that, due to their complex design, high economic value, and strategic importance, autotransformer failures may cause significant technical and economic consequences. Therefore, their condition monitoring is an important part of transmission network operation and asset management.

Based on the analysis of scientific literature and diagnostic methods, the main groups of autotransformer defects were identified: ageing of the insulation system, thermal and electrical faults, winding deformations, bushing failures, and on-load tap changer defects. It was found that some of these defects do not show clear external symptoms in their early stages; therefore, periodic visual inspections alone are not sufficient. For this reason, complex diagnostic methods must be applied to assess the technical condition of autotransformers.

The focus of the project is placed on dissolved gas analysis (DGA) and partial discharge (PD) diagnostics. DGA is considered one of the most important methods for detecting internal thermal and electrical faults, as gas concentrations, gas ratios, and their changing trends make it possible to assess the type of fault and the intensity of its development. Partial discharge diagnostics allows the condition of insulation to be evaluated, while the combination of electrical and acoustic measurement methods increases the possibilities for defect detection and localization.

The project also examines the application of machine learning methods for the interpretation of DGA and PD data. The literature analysis showed that artificial intelligence methods can improve fault classification, reduce the influence of noisy data, and create conditions for a more automated assessment of technical condition. It was determined that the combination of classical diagnostic methods and advanced data analysis tools is a promising direction for autotransformer monitoring.

In conclusion, complex monitoring of the technical condition of autotransformers, based on DGA, PD, and data analysis methods, enables earlier identification of possible defects, supports maintenance decision-making, and helps reduce the risk of unplanned failures in the Lithuanian electricity transmission network.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>12</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>15</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>17</b>
1.1. Autotransformatorių būklės stebėsenos reikšmė perdavimo tinkle.....	17
1.2. Pagrindiniai autotransformatorių defektai ir jų diagnostiniai požymiai.....	18
1.3. Ištirpusių dujų alyvoje analizė autotransformatorių diagnostikoje .....	20
1.4. Dalinių išlydžių diagnostika autotransformatoriuose .....	23
1.4.1. Elektriniai dalinių išlydžių matavimo metodai.....	26
1.4.2. Akustiniai dalinių išlydžių nustatymo metodai .....	28
1.5. Mašininio mokymosi metodų taikymas DGA ir PD diagnostikos duomenų analizei.....	31
<b>2. Eksperimentinė dalis .....</b>	<b>37</b>
2.1. Eksperimentinio tyrimo paskirtis ir aktualumas.....	37
2.2. Eksperimentinio tyrimo tikslas ir uždaviniai.....	37
2.3. Tyrimo objektas ir sąlygos .....	38
2.3.1. 400 kV šuntinis reaktorius.....	38
2.3.2. 330/110/10 kV autotransformatoriai .....	39
2.3.3. Eksploatacinės sąlygos matavimų metu .....	40
2.4. Matavimo metodika naudojant DOBLE DFA300 įrangą.....	41
2.4.1. Metodo esmė .....	41
2.4.2. Matavimo įranga.....	41
2.5. Jutiklių išdėstymas ant įrenginių korpusų .....	43
2.6. Eksperimento atlikimas .....	45
2.6.1. 400 kV šuntinio reaktoriaus pirmieji akustiniai matavimai .....	46
2.6.2. AT-1 autotransformatoriaus pirmieji akustiniai matavimai .....	49
2.6.3. AT-2 autotransformatoriaus pirmieji akustiniai matavimai .....	53
2.6.4. 400 kV šuntinio reaktoriaus pakartotiniai akustiniai matavimai.....	56
2.6.5. AT-1 autotransformatoriaus pakartotiniai akustiniai matavimai.....	60
2.6.6. AT-2 autotransformatoriaus pakartotiniai akustiniai matavimai.....	64
2.6.7. 400 kV šuntinio reaktoriaus RFI matavimai .....	67
2.6.8. AT-1 autotransformatoriaus RFI matavimai .....	69
2.6.9. AT-2 autotransformatoriaus RFI matavimai .....	74
2.7. Duomenų apdorojimas ir diagnostinių požymių vertinimo kriterijai.....	78
2.7.1. Akustinės emisijos (AE) matavimų rezultatų analizė .....	79
2.7.2. Radijo dažnių trikdžių (RFI) matavimų rezultatų analizė .....	83
2.7.3. Kompleksinis dalinių išlydžių matavimų įvertinimas .....	85
2.8. Dalinių išlydžių ir alyvos chromatografijos rezultatų analizė.....	86
<b>Išvados .....</b>	<b>97</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>99</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>103</b>
1 priedas. AT-1 matavimai .....	103
2 priedas. AT-2 matavimai .....	122
3 priedas. Šuntinio reaktoriaus matavimai .....	142

4	priedas. Pakartotiniai AT-1 ir AT-2 matavimai .....	152
5	priedas. Pakartotiniai šuntinio reaktoriaus matavimai.....	180
6	priedas. Alytaus TP transformatorių dalinių išlydžių skenavimo rezultatai.....	190
7	priedas. Alytaus 400 kV TP dalinių išlydžių skenavimo rezultatai.....	199
8	priedas. Alyvos chromatografinės analizės duomenų apdorojimo kodas.....	202

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Galios transformatoriaus defekto pobūdžio nustatymas naudojant Duvalio trikampio metodą [1].....	21
<b>2 lentelė.</b> Galios transformatorių izoliacinėje alyvoje iš pagrindinio bako ištirpusių dujų koncentracijų didėjimo leistinos vertės [1].....	22
<b>3 lentelė.</b> Galios transformatorių izoliacinėje alyvoje iš pagrindinio bako ištirpusių dujų leistinos koncentracijos [1] .....	22
<b>4 lentelė.</b> Skirtingų dalinių išlydžių aptikimo metodų privalumų ir trūkumų santrauka .....	24
<b>5 lentelė.</b> AT-1 duomenys .....	40
<b>6 lentelė.</b> AT-2 duomenys .....	40
<b>7 lentelė.</b> ŠRE1-Elk1 duomenys .....	41
<b>8 lentelė.</b> Diagnostinių požymių vertinimo kriterijai .....	79
<b>9 lentelė.</b> AE matavimų vertinimo kriterijai .....	79
<b>10 lentelė.</b> AE matavimų rezultatų suvestinė.....	81
<b>11 lentelė.</b> RFI matavimų vertinimo kriterijai.....	83
<b>12 lentelė.</b> RFI matavimų rezultatų suvestinė .....	84
<b>13 lentelė.</b> Kompleksinis AE ir RFI matavimų rezultatų palyginimas .....	85
<b>14 lentelė.</b> 400 kV šuntinio reaktoriaus PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas .....	87
<b>15 lentelė.</b> 330 kV autotransformatoriaus AT-1 PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas.....	90
<b>16 lentelė.</b> 330 kV autotransformatoriaus AT-2 PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas.....	93

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Rogerso metodo dujų santykių interpretacija pagal gedimo tipus [1].....	21
<b>2 pav.</b> Duvalio trikampis [1] .....	21
<b>3 pav.</b> Tipinės dalinių išlydžių susidarymo vietos autotransformatoriuose [19] .....	24
<b>4 pav.</b> PD matavimo schema [14] .....	26
<b>5 pav.</b> Akustinio PD lokalizavimo schema autotransformatoriaus bake [19].....	29
<b>6 pav.</b> Tipinis transformatoriaus PRPD vaizdo pavyzdys, gautas taikant UHF metodą [19] .....	30
<b>7 pav.</b> Akustinio signalo sklidimo keliai transformatoriaus bake: tiesioginis ir per konstrukcinius [19] .....	30
<b>8 pav.</b> Akustinio PD schema [19] .....	31
<b>9 pav.</b> DGA požymių svarbos įvertinimas taikant interpretuojamą mašininio mokymosi modelį [41] .....	32
<b>10 pav.</b> Klasikinių DGA interpretavimo metodų ir mašininio mokymosi sujungimo schema [31] .	33
<b>11 pav.</b> Hibridinio CNN (ResNet) ir KNN modelio taikymo schema PD signalų klasifikavimui [41] .....	34
<b>12 pav.</b> PD signalo apdorojimo seka: pradinis signalas, filtruotas signalas ir STFT spektrograma [41] .....	35
<b>13 pav.</b> 400 kV šuntinis reaktorius.....	38
<b>14 pav.</b> 400 kV šuntinio reaktoriaus pločio, ilgio gabaritas.....	38
<b>15 pav.</b> 400 kV šuntinio reaktoriaus aukščio gabaritas.....	39
<b>16 pav.</b> 330 kV autotransformatoriaus aukščio gabaritas .....	39
<b>17 pav.</b> 330 kV autotransformatoriaus pločio gabaritas.....	40
<b>18 pav.</b> Dalinių išlydžių matavimo įranga DOBLE DFA300.....	42
<b>19 pav.</b> Sinchronizatoriaus antena W-889 .....	42
<b>20 pav.</b> Dalinių išlydžių jutiklis .....	42
<b>21 pav.</b> Sinchronizavimo radijo modulis .....	43
<b>22 pav.</b> Jutiklių tvirtinimo izoliacinė lazda.....	43
<b>23 pav.</b> Doble DA100 kryptinė antena.....	43
<b>24 pav.</b> Šuntinio reaktoriaus matavimo taškų išdėstymas.....	44
<b>25 pav.</b> Autotransformatoriaus matavimo taškų išdėstymas.....	44
<b>26 pav.</b> Autotransformatoriaus matavimo taškų išdėstymas.....	45
<b>27 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 7 .....	46
<b>28 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 7 .....	47
<b>29 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 8 .....	47
<b>30 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 9 .....	47
<b>31 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 10 .....	48
<b>32 pav.</b> Neutralės viršįtampių ribotuvas .....	49
<b>33 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 1 .....	50
<b>34 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 3 .....	50
<b>35 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 12 .....	51
<b>36 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 18 .....	51
<b>37 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 19 .....	52
<b>38 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 20 .....	52
<b>39 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 4 .....	53
<b>40 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 3 .....	54

<b>41 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 6 .....	54
<b>42 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 5 .....	55
<b>43 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 17 .....	55
<b>44 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 18 .....	56
<b>45 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 7 .....	57
<b>46 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 8 .....	58
<b>47 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 9 .....	58
<b>48 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 10 .....	59
<b>49 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 3 .....	59
<b>50 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 13 .....	61
<b>51 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 12 .....	61
<b>52 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 11 .....	62
<b>53 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 1 .....	62
<b>54 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 6 .....	63
<b>55 pav.</b> Matavimo taškas Nr. 18 .....	63
<b>56 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 11 .....	64
<b>57 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 3 .....	65
<b>58 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 4 .....	65
<b>59 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 18 .....	66
<b>60 pav.</b> Skaitmenizuotas šuntinio reaktoriaus aplinkos fonas.....	67
<b>61 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas 6 400 kV A fazė .....	68
<b>62 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas 4 400 kV B fazė.....	68
<b>63 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas 2 400 kV C fazė.....	69
<b>64 pav.</b> Skaitmenizuotas matavimo taškas 10 400 kV neutralė.....	69
<b>65 pav.</b> Skaitmenizuotas autotransformatoriaus AT-1 aplinkos fonas .....	70
<b>66 pav.</b> Skaitmenizuotas 110 kV A fazė .....	70
<b>67 pav.</b> Skaitmenizuotas 110 kV B fazė .....	71
<b>68 pav.</b> Skaitmenizuotas 110 kV C fazė .....	71
<b>69 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV A fazė .....	72
<b>70 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV B fazė .....	72
<b>71 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV C fazė .....	73
<b>72 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV neutralė.....	73
<b>73 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV atšakų perjungėjas.....	74
<b>74 pav.</b> Skaitmenizuotas autotransformatoriaus AT-2 aplinkos fonas .....	74
<b>75 pav.</b> Skaitmenizuotas 110 kV A fazė .....	75
<b>76 pav.</b> Skaitmenizuotas 110 kV B fazė .....	75
<b>77 pav.</b> Skaitmenizuotas 110 kV C fazė .....	76
<b>78 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV A fazė .....	76
<b>79 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV B fazė .....	77
<b>80 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV C fazė .....	77
<b>81 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV neutralė.....	78
<b>82 pav.</b> Skaitmenizuotas 330 kV atšakų perjungėjas.....	78
<b>83 pav.</b> Dujų prieaugio spartos skaičiavimo fragmentas Python aplinkoje .....	87

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

**AMS** – turto stebėsenos sistema (angl. asset monitoring system);

**CIGRE** – Tarptautinė didžiųjų elektros sistemų taryba (pranc. conseil international des grands reseaux electriques);

**CNN** – konvoliucinis neuroninis tinklas (angl. convolutional neural network);

**DGA** – ištirpusių dujų analizė (angl. dissolved gas analysis);

**HED** – didelės energijos elektrinis išlydis (angl. high energy discharge);

**HT** – aukštos temperatūros terminis gedimas (angl. high temperature fault);

**IEC** – Tarptautinė elektrotechnikos komisija (angl. international electrotechnical commission);

**IEEE** – Elektros ir elektronikos inžinierių institutas (angl. institute of electrical and electronics engineers);

**KNN** – artimiausių kaimynų metodas (angl. k-nearest neighbors);

**LED** – mažos energijos elektrinis išlydis (angl. low energy discharge);

**LightGBM** – gradientinio stiprinimo metodas, taikomas mašininio mokymosi modeliams (angl. light gradient boosting machine);

**LMT** – žemos–vidutinės temperatūros terminis gedimas (angl. low-medium temperature fault);

**MVA** – megavoltamperas, galios matavimo vienetas;

**OLTC** – apkrovos perjungiklis (angl. on-load tap changer);

**PD** – daliniai išlydžiai (angl. partial discharge);

**PRPD** – faziškai susietas dalinių išlydžių pasiskirstymas (angl. phase resolved partial discharge);

**SCADA** – priežiūros, valdymo ir duomenų surinkimo sistema (angl. supervisory control and data acquisition);

**SHAP** – modelio požymių įtakos aiškinimo metodas (angl. shapley additive explanations);

**STFT** – trumpojo laiko Furjė transformacija (angl. short-time fourier transform);

**SVM** – atraminių vektorių metodas (angl. support vector machine);

**UHF** – ypač aukštų dažnių metodas (angl. ultra high frequency);

**XGBoost** – gradientinio stiprinimo algoritmas, pagrįstas sprendimų medžių rinkiniu (angl. extreme gradient boosting).

### Terminai:

**Akustinė diagnostika** – diagnostikos metodas, kai defektai nustatomi pagal jų sukeltas mechanines arba ultragarsines bangas;

**Autotransformatorius** – elektros įrenginys, skirtas elektros energijai transformuoti tarp skirtingų įtampos lygių, kai dalis apvijų yra bendra pirminėje ir antrinėje grandinėje;

**Būkle grindžiamas eksploatavimas** – priežiūros ir eksploatacijos principas, kai sprendimai priimami pagal faktinę įrenginio techninę būklę, o ne pagal nustatytus laiko intervalus;

**Dalinis išlydis** – lokalus elektrinis išlydis, kuris tik iš dalies sujungia izoliacijos tarp elektrodų tarpą ir dažniausiai rodo izoliacijos degradaciją;

**Defekto lokalizavimas** – diagnostinis procesas, kurio metu nustatoma tikėtina pažeidimo vieta įrenginio viduje;

**Diagnostinis požymis** – išmatuojamas parametras ar reiškinys, leidžiantis spręsti apie įrenginio techninę būklę arba galimą defektą;

**Dujų parašas** – tam tikram gedimo tipui būdingas ištirpusių dujų sudėties ir koncentracijų derinys transformatorinėje alyvoje;

**Duvalio trikampis** – grafinis DGA interpretavimo metodas, naudojamas defekto tipui nustatyti pagal acetileno, etileno ir metano santykius;

**Elektrinė diagnostika** – diagnostikos metodų grupė, kai būklė vertinama pagal elektrinius signalus, impulsus ar matuojamus išlydžių parametrus;

**Gedimo klasifikavimas** – procesas, kurio metu nustatomas gedimo tipas pagal diagnostinius duomenis ir jų požymius;

**Izoliacijos degradacija** – izoliacinės sistemos savybių blogėjimas dėl šiluminių, elektrinių, cheminių ar mechaninių veiksnių;

**Ištirpusių dujų analizė** – metodas, kai transformatorinėje alyvoje ištirpusios dujos analizuojamos siekiant nustatyti vidinius terminius ar elektrinius gedimus;

**Mašininis mokymasis** – dirbtinio intelekto sritis, kurioje modeliai mokosi iš duomenų atpažinti dėsningumus, klasifikuoti būsenas ar prognozuoti gedimus;

**Matomasis krūvis** – konvenciniu PD matavimo metodu nustatomas dydis, apibūdinantis dalinio išlydžio impulso stiprumą;

**Nuolatinė stebėseną realiuoju laiku** – techninių ir programinių priemonių visuma, skirta nuolat stebėti įrenginio būklės parametrus realiuoju laiku;

**Raktinių dujų metodas** – DGA interpretavimo metodas, kuriuo gedimo pobūdis nustatomas pagal vyraujančias transformatorinėje alyvoje susidariusias dujas;

**Rogerso santykių metodas** – klasikinis DGA interpretavimo metodas, kai gedimo pobūdis nustatomas pagal būdingus dujų koncentracijų santykius;

**Techninės būklės stebėseną** – nuoseklus įrenginio būklės parametrų stebėjimas, analizė ir vertinimas, siekiant laiku nustatyti pokyčius ar defektus;

**Transformatorinė alyva** – izoliacinė ir aušinamoji terpė transformatoriuose bei autotransformatoriuose;

**Trumpasis jungimas** – avarinis elektrinis režimas, kai tarp skirtingo potencialo taškų susidaro labai mažos varžos jungtis ir teka didelė srovė;

**Viršįtampis** – trumpalaikis įtampos padidėjimas virš leistinos nominalios vertės;

**Viršįtampių ribotuvas** – apsauginis aukštos įtampos įrenginys, skirtas riboti viršįtampus ir apsaugoti įrenginių izoliaciją nuo trumpalaikių įtampos šuolių;

**Santrauka** (angl. summary) – nedidelės apimties tam tikro teksto reziumė ar trumpas konspektas.

## Įvadas

Elektros energijos perdavimo tinklo patikimumas, eksploatacinis saugumas ir veikimo tęstinumas daugiausia priklauso nuo strateginių aukštos įtampos įrenginių techninės būklės. Vieni svarbiausių tokių įrenginių yra autotransformatoriai, užtikrinantys elektros energijos transformavimą tarp skirtingų įtampos lygių, galios srautų paskirstymą ir stabilų perdavimo sistemos darbą. Dėl didelės ekonominės vertės, sudėtingos konstrukcijos ir strateginės reikšmės autotransformatorių gedimai gali lemti ne tik atskiro įrenginio atjungimą, bet ir platesnius tinklo darbo režimų, tiekimo patikimumo bei turto valdymo sutrikimus.

Temos aktualumą didina Lietuvos elektros perdavimo tinklo plėtra, sinchronizacija su kontinentinės Europos elektros tinklais ir spartėjanti atsinaujinančių energijos išteklių integracija. Kintant galios srautams ir didėjant sistemos eksploataciniams reikalavimams, autotransformatorių techninės būklės stebėseną tampa būtina sąlyga, leidžiančia laiku nustatyti besiformuojančius defektus, planuoti priežiūros veiksmus ir mažinti avarinių gedimų riziką. Šiuolaikinėje praktikoje vis didesnę reikšmę įgauna būkle grindžiamas eksploatavimas, kai sprendimai priimami remiantis ne vien periodinės priežiūros rezultatais, bet ir diagnostinių parametrų tendencijų analize.

Pagrindinė darbo problema yra ta, kad autotransformatorių vidiniai defektai ankstyvuose etapuose dažnai neturi aiškių išorinių požymių, o pavienio diagnostikos metodo duomenys ne visada leidžia patikimai įvertinti realią įrenginio būklę. Izoliacijos senėjimas, vietiniai perkaitimai, daliniai išlydžiai, įvadų, apvijų ar apkrovos perjungiklių pažeidimai gali vystytis palaipsniui, todėl jiems nustatyti reikalingas kompleksinis požiūris. Dėl šios priežasties svarbu tarpusavyje derinti ištirpusių dujų analizės (DGA), dalinių išlydžių (PD), akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių matavimo rezultatus bei juos interpretuoti bendrame techninės būklės vertinimo kontekste.

**Tyrimo objektas** – Lietuvos elektros perdavimo tinklo aukštos įtampos autotransformatorių ir šuntinių reaktorių techninė būklė, vertinama pagal stebėsenos ir diagnostikos duomenis: dalinių išlydžių matavimų, akustinės emisijos, radijo dažnių trikdžių bei alyvos dujų chromatografijos rezultatus.

**Darbo tikslas** – išanalizuoti autotransformatorių techninės būklės stebėsenos reikšmę, pagrindinius defektus, jų diagnostinius požymius bei šiuolaikinius diagnostikos metodus, ypatingą dėmesį skiriant DGA, PD diagnostikai ir kompleksiniam skirtingų diagnostinių duomenų vertinimui.

**Darbo tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:**

1. atlikti autotransformatorių techninės būklės stebėsenos, pagrindinių defektų ir jų diagnostinių požymių literatūros analizę;
2. išanalizuoti ištirpusių dujų analizės (DGA) diagnostinę reikšmę ir pagrindinius jos interpretavimo metodus: Duvalio trikampio, Rogerso santykių ir raktinių dujų metodus;
3. išnagrinėti dalinių išlydžių (PD) diagnostikos principus, akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių matavimo metodus bei jų taikymo galimybes autotransformatorių izoliacijos būklei vertinti;
4. atlikti autotransformatorių ir šuntinio reaktoriaus dalinių išlydžių matavimus, naudojant mobiliąją diagnostinę įrangą DOBLE DFA300;

5. išnagrinėti ir įvertinti gautus akustinės emisijos bei radijo dažnių trikdžių matavimų rezultatus ir nustatyti galimus dalinių išlydžių požymius ir jų pasireiškimo zonas;
6. palyginti dalinių išlydžių matavimų rezultatus su alyvos dujų chromatografijos (DGA) duomenimis ir įvertinti šių metodų diagnostinį suderinamumą.

**Tyrimo metodai** – mokslinės ir techninės literatūros analizė, tarptautinių standartų ir norminių dokumentų analizė, DGA duomenų interpretavimas, dalinių išlydžių akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių matavimų analizė, diagnostinių požymių palyginimas bei kompleksinis rezultatų vertinimas. Darbe remiamasi moksliniais straipsniais, CIGRE, IEEE ir IEC dokumentais, taip pat praktiniais matavimo duomenimis, gautais naudojant mobiliąją diagnostinę įrangą.

**Darbo struktūrą** sudaro dvi pagrindinės dalys. Pirmojoje dalyje pateikiama autotransformatorių techninės būklės stebėsenos, defektų, DGA, PD diagnostikos ir mašininio mokymosi taikymo literatūros analizė. Antrojoje dalyje aprašomas eksperimentinis tyrimas, naudojama diagnostinė įranga, matavimo metodika, gautų AE, RFI ir DGA rezultatų analizė bei jų kompleksinis vertinimas. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados ir priedai.

## 1. Literatūros analizė

### 1.1. Autotransformatorių būklės stebėsenos reikšmė perdavimo tinkle

Autotransformatoriai yra vieni svarbiausių elektros energijos perdavimo tinklo įrenginių, užtikrinančių elektros energijos transformavimą tarp skirtingų įtampos lygių ir stabilų sistemos darbą. Šie įrenginiai dažniausiai eksploatuojami aukštos ir ypač aukštos įtampos pastotėse, todėl jų patikimumas turi tiesioginę įtaką elektros perdavimo sistemos saugumui, veikimo tęstinumui ir energijos tiekimo kokybei. Dėl didelės ekonominės vertės, sudėtingos konstrukcijos ir strateginės svarbos net ir dalinis autotransformatoriaus veikimo sutrikimas gali sukelti reikšmingų techninių ir ekonominių pasekmių [4], [5], [33], [40].

Autotransformatorių gedimai perdavimo tinkle paprastai neapsiriboja tik vieno įrenginio atjungimu. Jie gali lemti galios srautų persiskirstymą, nepalankius tinklo darbo režimų pokyčius, tiekimo patikimumo mažėjimą ir didesnę avarinių situacijų tikimybę. Dėl šios priežasties ypač svarbu ne tik eksploatuoti šiuos įrenginius pagal nustatytus reikalavimus, bet ir laiku nustatyti pirmuosius jų techninės būklės blogėjimo požymius. Tradicinė periodinė techninė priežiūra ne visada leidžia pakankamai anksti identifikuoti besiformuojančius defektus, todėl vis didesnę reikšmę įgyja pažangūs diagnostikos ir nuolatinio monitoringo sprendimai [4], [6].

Eksploatacijos metu autotransformatorių techninė būklė kinta dėl įvairių veiksnių. Didžiausią įtaką daro šiluminės apkrovos, elektriniai viršįtampiai, trumpųjų jungimų sukelti dinaminiai poveikiai, izoliacinės sistemos senėjimas, drėgmė, oksidaciniai procesai ir mechaninės deformacijos. Ilgainiui šie veiksniai gali paskatinti izoliacijos degradaciją, vietinius perkaitimus, dalinių išlydžių atsiradimą, kontaktų blogėjimą ir kitus vidinius pažeidimus. Kadangi dauguma šių procesų ankstyvuosiuose etapuose vyksta palaipsniui ir dažnai neturi aiškių išorinių požymių, jiems nustatyti būtini jautrūs diagnostikos metodai. Šiuo požiūriu techninės būklės stebėseną sudaro prielaidas pereiti nuo laiko intervalais pagrįstos priežiūros prie būkle grindžiamo eksploatavimo modelio [4], [6, 7].

Būkle grindžiamas požiūris leidžia eksploatacinius sprendimus sieti su faktine įrenginio būseną, o ne vien su iš anksto nustatytais remonto terminais. Tokia priežiūros strategija padeda tiksliau planuoti techninės priežiūros darbus, mažinti neplanuotų gedimų tikimybę, racionaliau paskirstyti remonto išlaidas ir ilginti įrenginių tarnavimo laiką. Be to, nuosekli diagnostinių parametrų analizė leidžia stebėti defektų raidos tendencijas ir imtis priemonių dar iki kritinės būklės susiformavimo. Šiuolaikinėse monitoringo sistemose tam naudojami įvairūs jutikliai, SCADA duomenys, analizės algoritmai ir techninės būklės vertinimo modeliai [4], [6, 7].

Lietuvos elektros perdavimo tinklo kontekste autotransformatorių techninės būklės kontrolė yra ypač aktuali dėl sistemos masto, strateginės reikšmės ir vykstančių infrastruktūros pokyčių. Oficialiais „Litgrid“ duomenimis, 2024 m. pabaigoje Lietuvos elektros perdavimo tinklą sudarė daugiau kaip 7246,5 km 110–400 kV aukštos įtampos perdavimo linijų, 246 transformatorių pastotės ir skirstyklos bei 31 transformatorius, kai kurie iš jų eksploatuojami 330 kV ir 400 kV įtampos lygiuose. Bendra transformatorių galia perdavimo tinkle sudarė 6942,6 MVA [1]. Tokios infrastruktūros patikimumas yra tiesiogiai susijęs su saugiu elektros energijos perdavimu, sistemos rezervų valdymu ir tinklo atsparumu sutrikimams.

Autotransformatorių techninės būklės vertinimo reikšmę Lietuvoje dar labiau sustiprino 2025 m. vasario 9 d. įvykusi Baltijos šalių elektros energetikos sistemų sinchronizacija su kontinentinės

Europos tinklais. Po šio žingsnio Lietuvos perdavimo sistema tapo visaverte kontinentinės Europos sinchroninės zonos dalimi, todėl sistemos valdymo, patikimumo ir įrenginių techninės būklės reikalavimai įgijo dar didesnę reikšmę. „Litgrid“ pabrėžia, kad sinchronizacijos projektas ne tik sustiprino energetinę nepriklausomybę, bet ir sudarė prielaidas didesnei atsinaujinančių energijos išteklių integracijai bei tolesniam perdavimo tinklo stiprinimui [2].

Šios problematikos aktualumas dar labiau didėja sparčiai augant atsinaujinančių energijos išteklių daliai Lietuvos elektros sistemoje. „Litgrid“ skelbia, kad didėjant saulės ir vėjo elektrinių galioms bei vietinės generacijos apimtims, perdavimo tinklo įrenginių vaidmuo paskirstant galios srautus ir užtikrinant sistemos stabilumą tampa vis svarbesnis [1, 2]. Tokiomis sąlygomis autotransformatoriai tampa itin svarbia grandimi, užtikrinančia galios srautų paskirstymą, tinklo stabilumą ir saugų sistemos veikimą.

Svarbu paminėti ir tai, kad Lietuvos perdavimo tinklo plėtra artimiausiais metais išliks intensyvi. „Litgrid“ dešimties metų perdavimo tinklo plėtros plane nurodoma, kad 2024–2033 m. tinklo vystymo ir rekonstrukcijos investicijos gali siekti apie 2,7 mlrd. eurų [3]. Vadinasi, kartu su tinklo plėtra, rekonstrukcija ir naujų jungčių integracija didėja poreikis patikimai eksploatuoti strateginius įrenginius, tarp jų ir autotransformatorius. Dėl to jų techninė būklė turi būti vertinama ne epizodiškai, o nuosekliai, remiantis diagnostiniais duomenimis.

Vieni svarbiausių autotransformatorių techninės būklės vertinimo metodų yra ištirpusių dujų analizė (DGA) ir dalinių išlydžių (PD) stebėseną. Šie metodai sudaro galimybę anksti nustatyti vidinius izoliacijos ir aktyviosios dalies defektus. DGA leidžia identifikuoti terminius ir elektrinius pažeidimus pagal transformatorių alyvoje susidarančių dujų sudėtį bei koncentracijų pokyčius, o PD diagnostika padeda atpažinti izoliacijos silpnėjimo ar lokalių elektrinių defektų požymius [7, 8], [15]. Todėl techninės būklės stebėseną, grindžiamą šių duomenų analize, tampa būtina prielaida patikimam elektros perdavimo tinklo eksploatavimui.

Apibendrinant galima teigti, kad autotransformatorių techninės būklės stebėseną yra viena svarbiausių sąlygų, siekiant užtikrinti elektros perdavimo tinklo patikimumą, eksploatacinį saugumą ir racionalų turto valdymą. Lietuvos perdavimo tinklo atveju šios srities aktualumą ypač sustiprina strateginių įrenginių reikšmė, sinchronizacija su kontinentinės Europos tinklais, spartus atsinaujinančių energijos išteklių augimas ir intensyvi tinklo plėtra. Laiku nustatyti būklės pokyčiai leidžia mažinti avarinių gedimų tikimybę, optimizuoti priežiūros procesus ir eksploatacinius sprendimus grįsti objektyviais diagnostiniais duomenimis [1, 3], [6].

## **1.2. Pagrindiniai autotransformatorių defektai ir jų diagnostiniai požymiai**

Autotransformatorių eksploatacinį patikimumą daugiausia lemia izoliacinės sistemos, apvijų, įvadų, apkrovos perjungiklių ir aušinimo sistemos techninė būklė. Tarptautiniai patikimumo tyrimai rodo, kad transformatorių gedimų analizė svarbi ne tik techninei diagnostikai, bet ir turtui valdyti, priežiūrai planuoti bei sistemos patikimumui vertinti. CIGRE patikimumo apklausa pabrėžia, kad gedimus būtina vertinti kompleksiskai, atsižvelgiant į jų vietą, priežastį, plėtros mechanizmą, nustatymo būdą ir galimas pasekmes [5].

Viena svarbiausių defektų grupių yra susijusi su izoliacinės sistemos senėjimu ir irimu. Alyvos ir popieriaus izoliacijos būklę neigiamai veikia temperatūrinės apkrovos, drėgmė, oksidacija ir elektriniai įtempiai. Dėl šių veiksnių mažėja dielektrinis stipris, spartėja celiuliozės senėjimas ir

susidaro palankios sąlygos vietiniams perkaitimams bei daliniams išlydžiams atsirasti. Jutiklių ir monitoringo technologijų apžvalgos rodo, kad būtent izoliacijos būklės kontrolė yra viena svarbiausių transformatorių diagnostikos krypčių [4].

Kita reikšminga defektų grupė apima terminius pažeidimus. Jie gali būti susiję su perkrova, nepakankamu aušinimu, prastais elektriniais kontaktais, magnetinės grandinės anomalijomis arba lokalizuotu aktyviosios dalies perkaitimu. Tokie pažeidimai dažniausiai pasireiškia padidėjusia alyvos ir apvijų temperatūra, spartesniu izoliacijos senėjimu bei dujų susidarymu alyvoje. DGA pagrįstoje diagnostikoje terminiai gedimai paprastai siejami su žemos, vidutinės ar aukštos temperatūros perkaitimo procesais, o jų pobūdis nustatomas pagal būdingųjų dujų santykius ir koncentracijų kitimą [7, 8], [13], [34].

Autotransformatoriuose reikšmingą defektų grupę sudaro elektrinio pobūdžio pažeidimai, tokie kaip daliniai išlydžiai, mažos energijos išlydžiai ir didelės energijos lankiniai pažeidimai. Šie reiškiniai dažniausiai atsiranda dėl izoliacijos įrimo, drėgmės, ertmių izoliacijoje, laidžiųjų dalelių buvimo ar konstrukcinių netobulumų. Literatūroje tokie gedimai paprastai klasifikuojami į PD, mažos energijos išlydžius ir didelės energijos išlydžius, nes jų diagnostiniai požymiai ir keliama rizika skiriasi [7, 8]. Ankstyvosiose stadijose tokie defektai gali būti nustatomi pagal vandenilio, acetileno ir kitų dujų susidarymą DGA analizėje, taip pat pagal elektrinius, akustinius ar UHF signalus [7], [12], [15, 16].

Autotransformatorių patikimumui ypač svarbi ir apvijų mechaninė būklė. Trumpųjų jungimų metu atsirandantys elektrodinaminiai poveikiai, vibracija, konstrukcijos laisvumas ar mechaninis nusidėvėjimas gali lemti apvijų deformacijas, poslinkius ir tarpvijinius trumpuosius jungimus. Tokie pažeidimai ne visada iš karto sukelia avarinį gedimą, tačiau ilgainiui gali paskatinti izoliacijos irimo procesus ir sudaryti sąlygas rimtiems defektams. Naujesnėse apžvalgose pabrėžiama, kad apvijų defektams nustatyti svarbūs dažninio atsako metodai, o apie jų atsiradimą taip pat gali signalizuoti temperatūros, vibracijos ir kitų būklės parametrų pokyčiai [9, 10].

Ne mažiau reikšmingi yra įvadų ir apkrovos perjungiklių defektai. CIGRE duomenys rodo, kad gedimų pasiskirstymas pagal komponentus priklauso nuo įtampos klasės, tačiau įvadai ir perjungikliai išlieka tarp svarbiausių gedimų vietų [5]. Įvadų pažeidimai gali būti susiję su izoliacijos senėjimu, drėgmės patekimu, sandarumo praradimu ar vietiniais elektriniais pažeidimais, o apkrovos perjungiklių gedimai dažniausiai kyla dėl kontaktų dėvėjimosi, mechaninių mazgų nusidėvėjimo ir alyvos užterštumo. Tokie sutrikimai gali pasireikšti vietiniu perkaitimu, neįprastais vibracijos ar garso požymiais, dujų susidarymu alyvoje ir veikimo nestabilumu [5], [11].

Diagnostiniu požiūriu svarbiausia tai, kad dauguma autotransformatorių defektų ankstyvosiose stadijose neturi aiškių išorinių požymių. Dėl šios priežasties jų nustatymas turi būti grindžiamas objektyviais techninės būklės indikatoriais. Praktikoje dažniausiai vertinami alyvoje ištirpusių dujų sudėties pokyčiai, dalinių išlydžių aktyvumas, temperatūros režimai, drėgmės rodikliai, vibraciniai signalai, elektrinių bandymų rezultatai ir eksploatacinių parametrų tendencijos. Mokslinė literatūra ir CIGRE rekomendacijos pabrėžia, kad patikimiausi rezultatai pasiekiami tada, kai skirtingų diagnostikos metodų duomenys interpretuojami kompleksiskai, o ne vertinami atskirai [6], [12].

Apibendrinant galima teigti, kad pagrindiniai autotransformatorių defektai dažniausiai siejami su izoliacijos senėjimu, terminiais ir elektriniais pažeidimais, apvijų deformacijomis, įvadų ir apkrovos perjungiklių gedimais. Šių defektų požymiai dažniausiai atsiskleidžia per dujų sudėties pokyčius alyvoje, PD aktyvumo padidėjimą, temperatūros anomalijas, mechaninių parametrų pokyčius ar

elektrinių matavimų nuokrypius. Todėl efektyvus techninės būklės vertinimas turi remtis kompleksine diagnostika, leidžiančia ne tik nustatyti esamą įrenginio būseną, bet ir įvertinti tolesnę defektų vystymosi riziką [6]–[8], [12], [13].

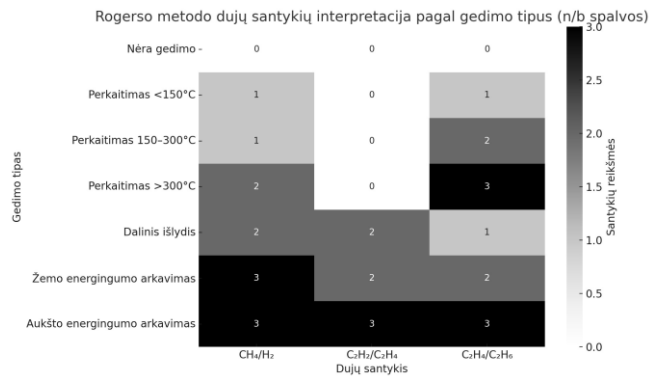
### **1.3. Ištirpusių dujų alyvoje analizė autotransformatorių diagnostikoje**

Ištirpusių dujų analizė (DGA) yra vienas svarbiausių alyvinių galios transformatorių ir autotransformatorių diagnostikos metodų, plačiai taikomas vidiniams defektams nustatyti ir jų vystymuisi vertinti. Šio metodo esmė grindžiama tuo, kad terminiai ar elektriniai pažeidimai transformatorinėje alyvoje bei celiuliozinėje izoliacijoje sukelia skaidymosi procesus, kurių metu susidaro įvairios dujos. IEC 60599:2022 nurodo, kad ištirpusių ir laisvųjų dujų koncentracijos gali būti interpretuojamos diagnozuojant mineraline alyva užpildytos elektros įrangos būklę ir parenkant tolesnius veiksmus, o IEC 60567:2023 aprašo dujų paėmimo, išskyrimo ir chromatografinės analizės metodiką [8], [13], [35], [37].

Didžiausia DGA reikšmė atsiskleidžia tuo, kad šis metodas leidžia nustatyti vidinius defektus ankstyvuosiuose jų vystymosi etapuose, kai išoriniai pažeidimo požymiai dar nėra akivaizdūs. Dėl šios priežasties DGA laikoma vienu svarbiausių būkle pagrįstos priežiūros instrumentų, padedančių laiku priimti eksploatacinius sprendimus ir mažinti neplanuotų gedimų riziką. Naujausiose apžvalgose pabrėžiama, kad DGA išlieka vienu plačiausiai taikomų metodų, skirtų vidiniams terminiams ir elektriniams gedimams vertinti, ir sudaro pagrindą tiek klasikinei, tiek pažangiajai diagnostikai [7, 8], [25], [37].

DGA metu dažniausiai analizuojamos vandenilio, metano, etano, etileno, acetileno, anglies monoksido ir anglies dioksido koncentracijos. Skirtingi gedimų tipai lemia skirtingą susidarantių dujų derinį, todėl pagal jų sudėtį galima spręsti apie defekto pobūdį ir intensyvumą. Pavyzdžiui, padidėjęs acetileno kiekis dažniausiai siejamas su lankiniais išlydžiais, vandenilio dominavimas gali rodyti dalinius išlydžius, o etileno ir etano koncentracijos augimas paprastai būdingas terminiams pažeidimams. Anglies monoksido ir anglies dioksido kiekio padidėjimas dažnai siejamas su celiuliozinės izoliacijos terminiu irimu [7, 8], [13], [37]. Tokia „dujų parašo“ samprata sudaro vieną svarbiausių DGA metodo diagnostinių prielaidų.

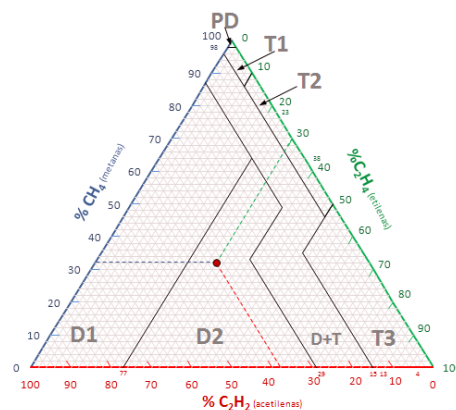
Svarbi DGA interpretacijos dalis yra ne tik absoliučių dujų koncentracijų, bet ir jų santykių bei kitimo tendencijų analizė. Klasikiniai interpretavimo metodai, tokie kaip Rogerso santykių metodas, Doernenburgo metodas, raktinių dujų metodas ir Duvalio trikampis, leidžia klasifikuoti gedimo pobūdį pagal būdingus dujų santykius. Apžvalginėje literatūroje pažymima, kad šie metodai tebėra plačiai naudojami dėl savo paprastumo ir praktinio pritaikomumo, nors jų tikslumas gali skirtis priklausomai nuo duomenų kokybės ir gedimo sudėtingumo. Duvalio trikampis laikomas vienu patogiausių grafinių metodų diferencijuojant PD, D1, D2 ir T1–T3 tipo gedimus [7, 8], [37].



1 pav. Rogerso metodo dujų santykių interpretacija pagal gedimo tipus [1]

1 lentelė. Galios transformatoriaus defekto pobūdžio nustatymas naudojant Duvalio trikampio metodą [1]

Dujų lyginamojo svorio nustatymas	Defekto tipo žymėjimas Duvalio trikampyje		
$C_2H_2 = \frac{100 \cdot x}{x + y + z} \%$ $C_2H_4 = \frac{100 \cdot y}{x + y + z} \%$ $CH_4 = \frac{100 \cdot z}{x + y + z} \%$ kur, išmatuoti dydžiai: x = C2H2 (acetileno); y = C2H4 (etileno); z = CH4 (metano).	Elektrinio pobūdžio	PD	Daliniai išlydžiai
		D1	Mažos energijos iškvrovos - kibirkščiavimas
		D2	Didelės energijos iškvrovos - el. lankas
	Terminio pobūdžio	T1	1 laipsnio kaitimas, $t < 300 \text{ }^\circ\text{C}$
		T2	2 laipsnio kaitimas, $300 \text{ }^\circ\text{C} < t < 700 \text{ }^\circ\text{C}$
		T3	3 laipsnio kaitimas, $t > 700 \text{ }^\circ\text{C}$



2 pav. Duvalio trikampis [1]

Vertinant autotransformatorių būklę, DGA ypač naudinga tuo, kad padeda atskirti elektrinio ir terminio pobūdžio defektus bei stebėti jų vystymosi dinamiką. Vien momentinė dujų koncentracija ne visada tiksliai atspindi defekto pavojingumą, todėl būtina analizuoti ir jų didėjimo spartą. Spartus atskirų dujų koncentracijų augimas gali rodyti aktyviai besivystantį defektą net tais atvejais, kai absoliučios reikšmės dar nėra pasiekusios kritinių ribų. Dėl to praktikoje vertinamos ne tik momentinės reikšmės, bet ir jų kaita laikui bėgant [7, 8], [25].

Praktikoje DGA rezultatų interpretacija dažniausiai atliekama kompleksiskai. Siekiant nustatyti gedimo tipą, neretai derinami keli interpretavimo metodai, pavyzdžiui, dujų santykių metodas pagal IEC 60599, Duvalio trikampis ir penkių dujų grafinis metodas. Toks kelių metodų taikymas mažina klaidingos interpretacijos tikimybę ir didina galutinės diagnostinės išvados patikimumą [7, 8], [24].

**2 lentelė.** Galios transformatorių izoliacinėje alyvoje iš pagrindinio bako ištirpusių dujų koncentracijų didėjimo leistinos vertės [1]

Izoliacinėje alyvoje ištirpusių dujų pavadinimas	Dujų koncentracijos didėjimo greičio leistinos reikšmės		
	ppm/per parą	ppm/per 6 mėn.	Nustačius atskirų dujų koncentracijos padidėjimą virš leistinos reikšmės paros/6 mėn. laikotarpyje, arba daugiau nei 10% per mėnesį, turi būti atliekamas defekto pobūdžio identifikavimas pagal dujų porų koncentracijų santykius, jeigu net dujų kiekiai neviršija „geros būklės“ reikšmių.
H <sub>2</sub> (vandenilis)	< 5	< 45	
CH <sub>4</sub> (metanas)	< 2	< 45	
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (etilenas)	< 2	< 15	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (etanas)	< 2	< 25	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (acetilenas)	< 0,1	< 1	
CO (anglies oksidas)	< 50	< 450	
CO <sub>2</sub> (anglies dioksidas)	< 200	< 1500	

Lietuvos perdavimo tinklo kontekste DGA reikšmė yra ypač didelė, nes šis metodas integruotas į įrenginių eksploatavimo ir bandymų reglamentus. „Litgrid“ parengtame „Perdavimo tinklo įrenginių bandymų reglamente“ nustatytas alyvos mėginių ėmimo periodiškumas, leistinos pagrindinių dujų koncentracijų ribos, jų didėjimo greičiai ir rekomenduojami veiksmai viršijus nustatytas ribas [1], [35].

**3 lentelė.** Galios transformatorių izoliacinėje alyvoje iš pagrindinio bako ištirpusių dujų leistinos koncentracijos [1]

Izoliacinėje alyvoje ištirpusių dujų pavadinimas		Leistinos ištirpusių dujų koncentracijos (ppm) ir įrenginio būklės gradacija				
		geros būklės	patenkinamos būklės	blogos būklės	labai blogos būklės	
H <sub>2</sub> (vandenilis)		≤ 100	101÷700	701÷1800	> 1800	
CH <sub>4</sub> (metanas)		≤ 100	101÷400	401÷1000	> 1000	
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (etilenas)		≤ 60	61÷100	101÷200	> 200	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (etanas)		≤ 50	51÷100	101÷150	> 150	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (acetilenas)		≤ 10	11÷50	51÷80	> 80	
CO (anglies oksidas)		≤ 500	501÷720	721÷1400	> 1400	
CO <sub>2</sub> (anglies dioksidas)	Su alyvos apsauga	≤ 10 metų ekspl.	≤ 2000	2001÷4000	4001÷10000	> 10000
		> 10 metų ekspl.	≤ 4000	4001÷6000	6001÷10000	> 10000
	Be alyvos apsaugos	≤ 10 metų ekspl.	≤ 6000	6001÷8000	8001÷12000	> 12000
		> 10 metų ekspl.	≤ 8000	8001÷10000	10001÷14000	> 14000

Pagal šį reglamentą nustačius patenkinamą būklę, rekomenduojama trumpinti mėginių ėmimo intervalą ir stebėti dujų didėjimo spartą, o esant blogai būklei – atlikti papildomus tyrimus,

pavyzdžiui, furanų analizę ar dalinių išlydžių matavimus. Esant labai blogai būklei, kai nustatomos itin didelės dujų koncentracijos, gali būti reikalaujama nedelsiant išjungti transformatorių ir atlikti vidinę apžiūrą [1]. Tai rodo, kad DGA Lietuvos perdavimo sistemoje naudojama kaip integrali eksploatacinės diagnostikos priemonė, skirta techninei būklei stebėti ir sprendimams dėl tolesnės eksploatacijos pagrįsti.

Kita svarbi tendencija yra perėjimas nuo periodinių laboratorinių DGA tyrimų prie nuolatinio monitoringo. Jutiklių technologijų apžvalgos rodo, kad pažangios monitoringo sistemos leidžia nuolat stebėti pagrindinius transformatoriaus būklės rodiklius ir greičiau nustatyti anomalijas. Nuolatinės DGA duomenų stebėsenos sprendimai mažina fizinių alyvos mėginių ėmimo poreikį ir leidžia duomenis integruoti į platesnes AMS ar kitas stebėsenos platformas. Taigi DGA palaipsniui pereina nuo periodinės laboratorinės diagnostikos prie realaus laiko stebėsenos [4], [6], [13], [32].

Pastaraisiais metais DGA interpretavimo metodai vis dažniau papildomi dirbtinio intelekto ir mašininio mokymosi sprendimais. Naujausi tyrimai rodo, kad mašininio mokymosi algoritmai taikomi transformatorių gedimų klasifikacijai pagal DGA duomenis, siekiant padidinti diagnostikos tikslumą ir sumažinti neapibrėžtumą sudėtingais atvejais [7], [24, 25], [30, 31]. Tokie sprendimai tampa svarbia pažangios diagnostikos kryptimi, ypač kai siekiama automatizuoti duomenų interpretaciją ir pagerinti sprendimų priėmimo kokybę.

Apibendrinant galima teigti, kad ištirpusių dujų analizė išlieka viena svarbiausių autotransformatorių techninės būklės vertinimo priemonių. Jos reikšmė atsiskleidžia per galimybę anksti aptikti vidinius terminius ir elektrinius defektus, diferencijuoti jų pobūdį, stebėti gedimų vystymosi tendencijas ir eksploatacinius sprendimus grįsti objektyviais duomenimis. Nors DGA tikslumas priklauso nuo duomenų kokybės, interpretavimo metodo ir papildomų diagnostikos priemonių taikymo, šis metodas išlieka esminiu šiuolaikinės autotransformatorių diagnostikos elementu [7, 8], [13], [24, 25].

#### **1.4. Dalinių išlydžių diagnostika autotransformatoriuose**

Dalinių išlydžių diagnostika yra viena svarbiausių autotransformatorių izoliacinės sistemos būklės vertinimo sričių, nes daliniai išlydžiai laikomi ankstyvu izoliacijos degradacijos požymiu ir gali rodyti besivystančius vidinius defektus. PD matavimai tarptautiniu mastu pripažįstami kaip vienas pagrindinių aukštos įtampos įrenginių izoliacijos diagnostikos metodų, taikomų priėmimo bandymuose, periodinėje stebėsenoje ir eksploatacinėje diagnostikoje. CIGRE TB 662 pabrėžia, kad PD aktyvumo registravimas arba jo nebuvimas leidžia spręsti apie dielektrinės sistemos būklę, tačiau šis metodas yra netiesioginis, todėl jo rezultatai turi būti interpretuojami atsargiai, atsižvelgiant į matavimo sąlygas ir naudojamą metodą. Vien PD matavimai neparodo tiesioginės gedimo tikimybės, bet leidžia spręsti apie izoliacijos degradacijos mastą ir galimą jos pavojingumą eksploatacijai. Dėl šios priežasties PD diagnostika turi būti suprantama ne kaip vienkartinis „taip arba ne“ bandymas, o kaip diagnostinė priemonė, padedanti identifikuoti anomalijas, stebėti jų raidą ir susieti jas su konkrečiais konstrukciniais autotransformatoriaus mazgais [21], [28], [36], [39].

Autotransformatoriuose daliniai išlydžiai gali būti susiję su įvairiais izoliacijos netobulumais: ertmėmis, paviršiniaus defektais, laidžiomis dalelėmis, vietiniais elektrinio lauko sustiprėjimais, drėgmės poveikiu, senėjimu ar mechaniniais pažeidimais. Praktiniu požiūriu svarbu tai, kad PD gali pasireikšti skirtingose transformatoriaus vietose, pavyzdžiui, apvijose, pagrindinėje izoliacijoje, įvaduose ar apkrovos perjungiklyje. Todėl PD diagnostika turi būti orientuota ne vien į aktyvumo nustatymą, bet ir į jo ryšį su konkrečia konstrukcine zona bei galimu gedimo mechanizmu. Naujesni

tyrimai ir transformatorių monitoringo praktika rodo, kad daliniai išlydžiai ypač svarbūs kaip ankstyvas signalas tais atvejais, kai izoliacijos pažeidimas dar nėra sukėlęs kritinių DGA ar temperatūrinių pokyčių, tačiau jau yra pakankamai aktyvus, kad būtų registruojamas elektriniais, UHF arba akustiniais metodais [22, 23], [28], [36], [38].



3 pav. Tipinės dalinių išlydžių susidarymo vietos autotransformatoriuose [19]

CIGRE TB 662 transformatoriams taikomus PD aptikimo metodus skirsto į tris pagrindines grupes: elektrinius matavimus pagal IEC 60270, UHF metodą ir akustinį metodą. Kiekvienas jų remiasi skirtingu fiziniu reiškiniu: elektriniu impulsu, elektromagnetine spinduliuote arba ultragarsine banga. Šie metodai nėra visiškai lygiaverčiai ir nepakeičia vienas kito, nes kiekvienas turi savų privalumų ir ribotumų. Elektriniai matavimai suteikia standartizuotą ir kalibruojamą PD aktyvumo įvertinimą, UHF metodas paprastai pasižymi didesniu atsparumu elektromagnetiniams trikdžiams ir geru jautrumu aptinkant vidinius defektus, o akustiniai metodai yra ypač vertingi defekto vietai nustatyti. Dėl šios priežasties šiuolaikinėje autotransformatorių diagnostikoje vis dažniau taikomas mišrus požiūris, kai keli metodai naudojami kartu, siekiant pagerinti aptikimo patikimumą ir lokalizavimo galimybes [21, 22], [28], [36], [38], [39].

4 lentelė. Skirtingų dalinių išlydžių aptikimo metodų privalumų ir trūkumų santrauka

Elektrinis aptikimas	Cheminis aptikimas	Akustinis aptikimas	Optinis aptikimas	UHF aptikimas
Privalumai	Privalumai	Privalumai	Privalumai	Privalumai
Didelis jautrumas aptinkant žemo lygio dalinių išlydžių signalus	Geras dalinių išlydžių signalų registravimas laboratorinėje aplinkoje	Neinvazinis metodas	Didelis jautrumas aptinkant žemo lygio dalinių išlydžių signalus	Didelis jautrumas aptinkant dalinių išlydžių signalus
Tinka nuolatinei stebėsenai realiuoju laiku	Tinka atjungtos įrangos analizei ir būklės vertinimui	Gali būti taikomas tiek periodinei, tiek nuolatinei stebėsenai	Tinka nuolatinei stebėsenai realiuoju laiku	Tinka nuolatinei stebėsenai realiuoju laiku
Gali būti integruojamas į esamas elektros energetikos sistemas	Pateikia netiesioginius dalinių išlydžių atsiradimo požymius	Tinka didelio masto izoliacijos sistemoms	Atsparus elektromagnetiniams trikdžiams	Gali būti naudojamas tiek lokalizuotam, tiek paskirstytam dalinių išlydžių aptikimui
Pateikia kiekybinius dalinių išlydžių charakteristikų matavimus		Leidžia nustatyti dalinių išlydžių šaltinių vietą	Pateikia erdvinę informaciją apie dalinių išlydžių šaltinius	Leidžia anksti įspėti apie izoliacijos degradaciją

Elektrinis aptikimas	Cheminis aptikimas	Akustinis aptikimas	Optinis aptikimas	UHF aptikimas
Trūkumai	Trūkumai	Trūkumai	Trūkumai	Trūkumai
Jautrus elektros sistemos triukšmui ir trikdžiams	Netiesioginis aptikimo metodas, tinkamas tik tam tikroms dalinių išlydžių rūšims	Jautrus aplinkos triukšmui	Ribotas optinių jutiklių prieinamumas	Jautrus aplinkos triukšmui
Reikalingi sudėtingi signalų apdorojimo metodai	Reikia imti izoliacinės alyvos ir dujų mėginius	Ribotas jautrumas aptinkant žemo lygio dalinių išlydžių signalus	Reikalingas tiesioginis matomumas iki dalinių išlydžių vietos	Signalų interpretavimas gali būti sudėtingas
Reikalinga specializuota laboratorinė įranga				Reikia įrangoje sumontuoti UHF jutiklius

Konvenciniuose elektriniuose matavimuose vertinamas matomasis dalinio išlydžio krūvis, kuris išreiškiamas [14]:

$$q_a = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt, \quad (1.1)$$

kur  $q_a$  – matomasis krūvis, o  $i(t)$  – PD impulso srovė matavimo grandinėje.

Tačiau CIGRE TB 662 aiškiai pažymi, kad tarp IEC 60270 konvencinių matavimų ir nekonvencinių UHF ar akustinių metodų nėra tiesioginės kiekybinės koreliacijos, nes nekonvenciniais metodais registruojamo signalo lygis stipriai priklauso nuo defekto tipo, vietos, jutiklio charakteristikų, įrenginio geometrijos ir signalo sklidimo kelio. Tai reiškia, kad UHF signalo amplitudė mV vienetais ar akustinio signalo lygis negali būti tiesiogiai verčiami į pC. Ši išvada yra itin svarbi autotransformatorių diagnostikoje, nes ji paaiškina, kodėl praktikoje kelių metodų rezultatai turi būti ne „perskaičiuojami“ vieni į kitus, o interpretuojami kaip tarpusavyje papildanti informacija apie tą patį fizinį reiškinį [27, 28], [36].

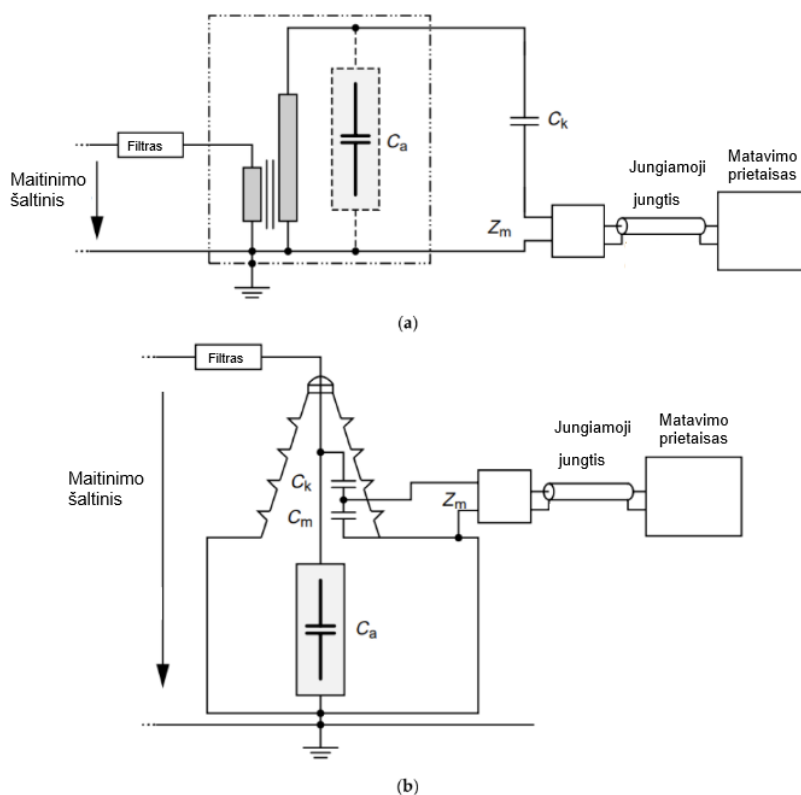
Kita svarbi įžvalga yra ta, kad konvenciniai elektriniai matavimai paprastai gerai tinka laboratorinėms ir gamyklinėms sąlygoms, tačiau eksploatacijoje jų taikymą dažnai apsunkina elektromagnetiniai trikdžiai. Tuo tarpu UHF metodas pasižymi geresniu signalo ir triukšmo santykiu, nes transformatoriaus bakas veikia kaip elektromagnetinis ekranas, mažinantis išorinių trikdžių įtaką, nors kai kurie signalai vis tiek gali patekti per įvadus. Akustinis metodas savo ruožtu yra ypač vertingas defekto vietai lokalizuoti, tačiau jo jautrumas priklauso nuo signalo slopinimo konstrukcijoje ir ne visada būna pakankamas silpniems defektams aptikti. Todėl nė vienas metodas neturėtų būti laikomas universaliai geriausiu visais atvejais; optimali diagnostikos strategija priklauso nuo uždavinio – ar reikia nustatyti PD buvimą, įvertinti jo aktyvumą, ar lokalizuoti defekto vietą [18, 19], [22], [29], [36], [38], [39].

Apibendrinant galima teigti, kad dalinių išlydžių diagnostika autotransformatoriuose turi būti suprantama kaip kompleksinis procesas, apimantis ne tik PD aktyvumo registravimą, bet ir signalo kilmės, slopinimo, jutiklių jautrio, defekto vietos bei matavimo aplinkos įtakos vertinimą. Standartai ir CIGRE rekomendacijos rodo, kad didžiausia diagnostinė vertė pasiekama tada, kai konvenciniai ir nekonvenciniai metodai taikomi kaip vienas kitą papildantys metodai, o gauti rezultatai

interpretuojami platesniame techninės būklės vertinimo kontekste. Būtent toks požiūris yra tinkamiausias praktiniam autotransformatorių būklės tyrimui, ypač kai vertinami ilgai eksploatuojami ar strategiškai svarbūs perdavimo tinklo įrenginiai [21, 22], [29], [36].

#### 1.4.1. Elektriniai dalinių išlydžių matavimo metodai

Elektriniai dalinių išlydžių matavimo metodai laikomi klasikiniu ir plačiausiai standartizuotu būdu PD aktyvumui registruoti aukštos įtampos įrenginiuose, įskaitant galios transformatorius ir autotransformatorius. Šių metodų veikimo principas grindžiamas tuo, kad dalinis išlydis sukuria trumpalaikį srovės impulsą, kuris matavimo grandinėje gali būti užfiksuotas kaip matomasis krūvis. Tarptautiniu mastu pagrindinis šios srities dokumentas yra IEC 60270, kuriame apibrėžiami terminai, matuojamieji dydžiai, bandymo ir matavimo schemas, dažnių juostos bei analoginiai ir skaitmeniniai matavimo principai [14], [36].



4 pav. PD matavimo schema [14]

Atliekant transformatorių elektrinius PD matavimus, dažnai naudojama schema, kai signalas registruojamas per įvado matavimo atšaką. Toks sprendimas leidžia taikyti IEC 60270 principus ir įvertinti matomąjį krūvį, nors matavimo rezultatai vis tiek veikia signalo slopinimas transformatoriaus viduje ir PD šaltinio vieta [27, 28], [38].

Elektrinio PD matavimo principas grindžiamas tuo, kad išlydžio metu įvyksta labai greitas vietinės talpos išsikrovimas, kurį galima registruoti per jungiamąjį kondensatorių, matavimo impedansą ar kitus specializuotus jutiklius. Praktikoje matuojamas ne tikrasis išlydžio krūvis defekto vietoje, o vadinamasis matomasis krūvis, kuris priklauso nuo izoliacinės sistemos struktūros, matavimo grandinės ir signalo perdavimo kelio [14], [17], [19]. Dėl šios priežasties elektriniai matavimai ypač

tinkami PD aktyvumui kiekybiškai vertinti, tačiau vien jų dažnai nepakanka tiksliai nustatyti defekto vietą transformatoriaus viduje.

Transformatorių atveju CIGRE TB 662 ypatingą dėmesį skiria signalo slopinimui apvijose. Transformatoriaus apvijos veikia kaip žemųjų dažnių filtras, todėl PD signalas gali būti reikšmingai nuslopinamas dar iki matavimo taško. Šią priklausomybę galima apibendrintai išreikšti funkicine forma [15]:

$$q_{a,m} = f(x, f_m), \quad (1.2)$$

kur  $q_{a,m}$  – išmatuotas matomasis krūvis,  $x$  – PD šaltinio padėtis transformatoriaus viduje, o  $f_m$  – matavimo dažnių sritis.

Tai reiškia, kad tas pats fizinis defektas, esantis skirtingose vietose, gali būti registruojamas skirtingu lygiu. TB 662 pateikti eksperimentinės analizės rezultatai rodo, kad net esant stabiliam ir pakartojamam dirbtiniam PD šaltiniui matuojamas lygis gali reikšmingai mažėti didėjant įterpimo gyliui apvijoje, o skirtumai išlieka net po pakartotinio kalibravimo. Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad transformatoriuose išmatuota pC reikšmė visada turi būti vertinama kartu su signalo slopinimo galimybe [27, 28], [36].

Vienas didžiausių elektrinių matavimų privalumų yra jų metrologinis apibrėžtumas ir tarptautinis palyginamumas. IEC 60270 nustato kalibravimo reikalavimus, matavimo dažnių ribas ir bandymo schemas, todėl rezultatai gali būti lyginami tarp skirtingų laboratorijų ir bandymų aikštelių [14], [17], [19], [36]. Dėl šios priežasties elektriniai PD matavimai plačiai taikomi gamykliniuose priėmimo bandymuose, tipo bandymuose ir diagnostiniuose tyrimuose, kai reikia įvertinti transformatoriaus izoliacijos kokybę ar nustatyti galimus gamybinius ir montavimo defektus.

Autotransformatorių diagnostikoje elektriniai PD matavimai dažniausiai naudojami siekiant nustatyti PD buvimą, aktyvumo lygį ir jo kitimą priklausomai nuo bandymo ar darbo režimo. Vertinami tokie rodikliai kaip matomasis krūvis, impulsų pasikartojimo dažnis, fazinė PD impulsų sklaida ir signalų forma. Šių parametrų analizė leidžia spręsti apie tikėtiną defekto pobūdį, pavyzdžiui, ar išlydžiai labiau atitinka vidinės, paviršinės ar slankiosios iškrovos požymius [14], [16], [20]. Naujesnėse apžvalgose pažymima, kad signalų atpažinimas ir klasifikavimas vis dažniau papildomi pažangiais duomenų analizės metodais, įskaitant mašininį mokymąsi [16], [26].

Vis dėlto elektriniai PD matavimai autotransformatoriuose turi ir reikšmingų ribotumų. Viena svarbiausių problemų yra jautrumas elektromagnetiniams trikdžiams, ypač atliekant matavimus realiomis eksploataavimo sąlygomis pastotėse. Išoriniai trikdžiai, komutaciniai procesai ar kiti aukšto dažnio signalai gali apsunkinti tikrųjų PD impulsų atskyrimą nuo triukšmo [17], [19, 20], [36]. Dėl to elektriniai nuolatinės stebėsenos matavimai ne visada pasižymi pakankamu selektyvumu, ypač kai siekiama aptikti silpnus vidinius išlydžius.

Dėl šių ribotumų elektriniai PD matavimai vis dažniau derinami su UHF, akustiniais ar mišriais metodais. CIGRE dokumentuose pabrėžiama, kad netradiciniai metodai neturėtų būti vertinami kaip IEC 60270 pakaitalas, o veikia kaip papildomos priemonės, padedančios pagerinti PD aptikimo patikimumą, lokalizaciją ir atsparumą trikdžiams [17], [19], [36]. Todėl praktikoje elektrinis metodas dažniausiai sudaro vieną kompleksinės diagnostikos dalį, o ne vienintelį sprendimą.

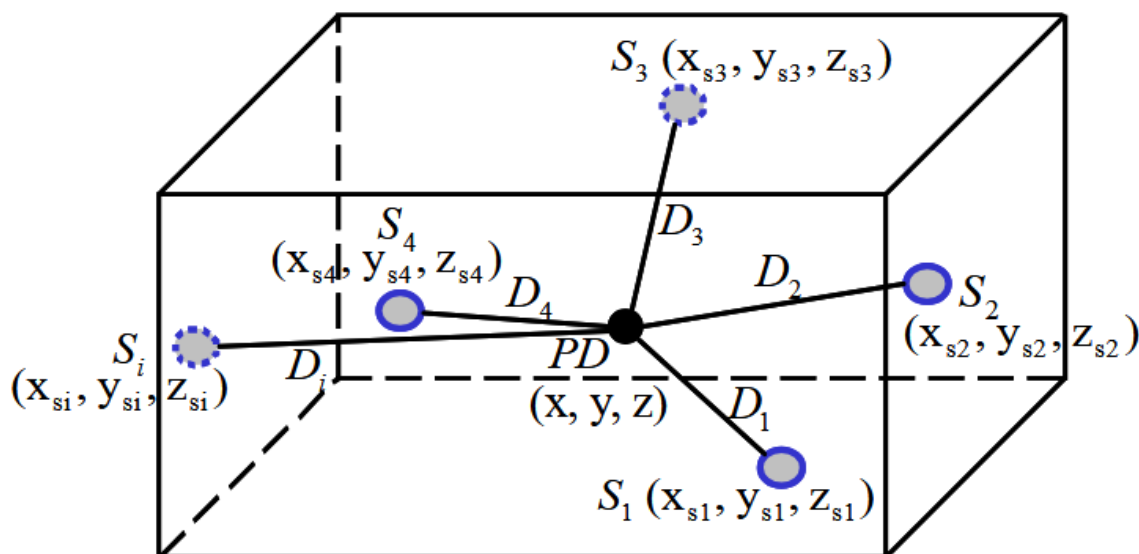
Apibendrinant galima teigti, kad elektriniai dalinių išlydžių matavimo metodai išlieka pagrindiniu ir standartizuotu PD diagnostikos pagrindu autotransformatorių tyrimuose. Jie suteikia galimybę kiekybiškai įvertinti PD aktyvumą, palyginti rezultatus pagal tarptautinius standartus ir taikyti juos gamykliniuose, laboratoriniuose bei kai kuriuose eksploataciniuose tyrimuose. Tačiau dėl jautrumo trikdžiams ir ribotų lokalizavimo galimybių didžiausia šių metodų nauda atsiskleidžia tada, kai jie derinami su kitais PD diagnostikos būdais, ypač UHF ir akustiniais matavimais [14], [17], [19, 20], [36].

#### 1.4.2. Akustiniai dalinių išlydžių nustatymo metodai

Akustiniai dalinių išlydžių nustatymo metodai yra svarbi autotransformatorių diagnostikos dalis, ypač tais atvejais, kai reikia ne tik aptikti aktyvų išlydį, bet ir nustatyti jo galimą vietą transformatoriaus bake. Šių metodų veikimo principas grindžiamas tuo, kad dalinis išlydis sukelia staigų vietinį energijos išsiskyrimą, kuris generuoja mechaninę bangą, sklindančią per alyvą ir transformatoriaus konstrukcinius elementus. Ši banga gali būti registruojama ultragarsiniais arba pjezoelektriniais jutikliais, sumontuotais ant bako sienelių ar kitose diagnostikai tinkamose vietose [15], [18], [38, 39].

Vienas svarbiausių akustinio metodo privalumų yra galimybė lokalizuoti defekto vietą. Skirtingai nuo elektrinių PD matavimų, kurie dažniausiai suteikia informaciją apie išlydžių aktyvumą ir intensyvumą, akustiniai matavimai leidžia įvertinti signalo atėjimo laikų skirtumus tarp kelių jutiklių ir pagal tai nustatyti tikėtiną defekto vietą transformatoriaus viduje [15], [19], [22], [38, 39]. Dėl šios priežasties akustinis metodas laikomas ypač vertingu lokalizuojant vidinius defektus, kai būtina priimti sprendimą dėl remonto apimties ar tolesnės eksploatacijos rizikos.

Akustiniai PD matavimai dažniausiai atliekami naudojant kelis jutiklius, išdėstytus aplink transformatoriaus baką. Signalo sklidimo laikas iki kiekvieno jutiklio priklauso nuo defekto vietos, bangos sklidimo greičio alyvoje bei konstrukcinių elementų, kurie gali atspindėti, slopinti ar iškreipti signalą. Patikimam lokalizavimui būtina ne tik tinkamai parinkti jutiklių išdėstymą, bet ir įvertinti transformatoriaus geometrinius parametrus, alyvos savybes bei galimus bangos sklidimo kelių netolygumus [15], [19], [22], [38, 39].



### 5 pav. Akustinio PD lokalizavimo schema autotransformatoriaus bake [19]

Paveiksle pateikta akustinio dalinių išlydžių lokalizavimo schema transformatoriaus bake, kurioje vidinis PD šaltinis aprašomas Dekarto koordinatų sistemoje  $(x, y, z)$ , o ant bako sienelių išdėstyti keli akustiniai jutikliai  $S_i$ . Nuo PD šaltinio iki kiekvieno jutiklio sklinda akustinė banga, o pagal signalų atėjimo laikų skirtumus ir atstumus  $D_i$  galima apskaičiuoti tikėtiną defekto vietą. Schema iliustruoja signalo atėjimo laiko principą, kuris taikomas akustinėje transformatorių PD lokalizacijoje.

Pagrindinis akustinio metodo privalumas yra lokalizavimo galimybė. Naudojant kelis jutiklius ir vertinant signalo atėjimo laikų skirtumus, galima apytiksliai nustatyti, kur transformatoriaus bake yra aktyvus dalinių išlydžių šaltinis. Atstumas nuo PD šaltinio iki  $i$ -ojo jutiklio gali būti aprašytas [36]:

$$D_i = v \cdot \Delta t_i, \quad (1.3)$$

kur  $D_i$  – atstumas iki jutiklio,  $v$  – akustinės bangos sklidimo greitis, o  $\Delta t_i$  – signalo sklidimo laikas iki atitinkamo jutiklio. Ši lygtis sudaro time-of-arrival principo pagrindą ir yra viena svarbiausių akustinės lokalizacijos teorinių išraiškų [22], [29], [38], [39].

Trimatės lokalizacijos atveju naudojama geometrinė priklausomybė [28]:

$$D_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (1.4)$$

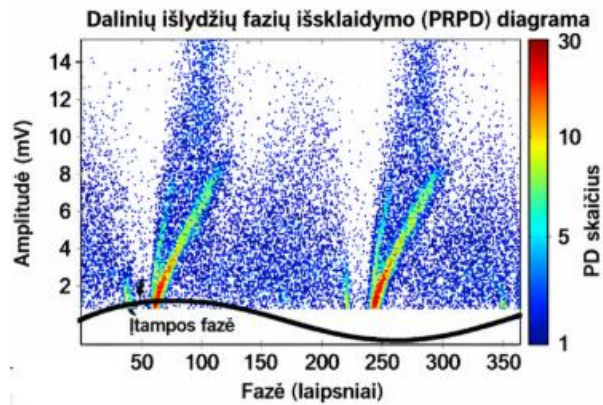
kur  $(x, y, z)$  – PD šaltinio koordinatės,  $(x_i, y_i, z_i)$  –  $i$ -ojo jutiklio koordinatės, o  $D_i$  – atstumas tarp jų. Sujungiant šią lygtį su sklidimo laiko ryšiu, gaunama [36]:

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} = v(t_i - t_0), \quad (1.5)$$

kur  $t_i$  – signalo atėjimo laikas į  $i$ -ąjį jutiklį, o  $t_0$  – PD įvykio pradžios momentas. Taikant kelių jutiklių sistemą galima spręsti atvirkštinį uždavinį ir nustatyti tikėtiną PD šaltinio vietą. Praktikoje ši lokalizacija nėra idealiai tiksli, tačiau ji leidžia žymiai susiaurinti tikėtino defekto zoną [22], [29], [38, 39].

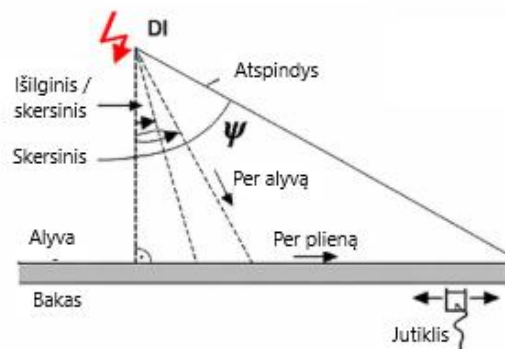
Vienas reikšmingų akustinio metodo privalumų yra didesnis atsparumas elektromagnetiniams trikdžiams, palyginti su elektriniais PD matavimais. Kadangi registruojamas mechaninis, o ne elektrinis signalas, akustinė diagnostika gali būti ypač naudinga aplinkose, kuriose elektrinius matavimus apsunkina stiprus foninis elektromagnetinis triukšmas [18], [22], [38, 39]. Dėl šios priežasties akustiniai metodai dažnai taikomi kaip papildoma diagnostinė priemonė pastotėse ir kitomis eksploataavimo sąlygomis, kai būtina išskirti vidinius PD procesus išorinių trikdžių fone.

Vis dėlto akustiniai metodai turi ir ribotumų. Signalo sklidimą transformatoriaus viduje veikia bako geometrija, aktyviosios dalies konstrukcija, izoliacinės alyvos temperatūra, jutiklių kontaktas su paviršiumi ir foninis triukšmas. Dėl to signalai gali būti slopinami, iškraipomi arba pasiekti jutiklius skirtingais sklidimo keliais, o tai apsunkina tikslią lokalizaciją [18], [21, 22], [38, 39].



6 pav. Tipinis transformatoriaus PRPD vaizdo pavyzdys, gautas taikant UHF metodą [19]

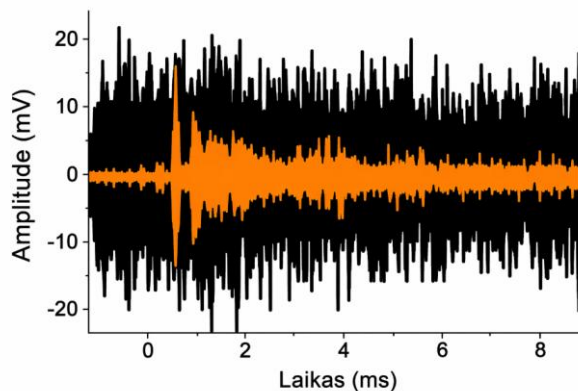
#### Dalinių išlydžių signalo sklaidimo keliai



7 pav. Akustinio signalo sklaidimo keliai transformatoriaus bake: tiesioginis ir per konstrukcinius [19]

Moksliniuose tyrimuose pažymima, kad vien akustinis metodas ne visada leidžia patikimai identifikuoti PD tipą, todėl dažniausiai jis derinamas su UHF, elektriniais arba DGA metodais [15], [18], [36], [38].

Šiuolaikinėje diagnostikoje vis dažniau taikomas akustinių ir UHF metodų derinys. UHF signalai naudojami kaip jautrus vidinių PD aktyvumo indikatorius, o akustiniai matavimai pasitelkiami vietai nustatyti. Toks požiūris padidina diagnostikos patikimumą, nes leidžia sujungti skirtingų fizinių metodų stipriausias puses: UHF metodas yra selektyvus aptinkant vidinius išlydžius, o akustinis metodas suteikia daugiau galimybių lokalizuoti defektą [15], [18], [38]. Praktinės atvejų analizės rodo, kad toks derinys ypač naudingas didelių galios transformatorių ir autotransformatorių diagnostikoje.



**8 pav.** Akustinio PD schema [19]

Akustiniai metodai taip pat svarbūs vertinant ne tik PD, bet ir kitus aktyvius vidinius procesus, pavyzdžiui, vietinius perkaitimus ar mechanines anomalijas, jei tokie procesai sukelia akustinį atsaką. Todėl jie gali būti integruojami į platesnes būklės stebėsenos sistemas kartu su DGA, temperatūros, vibroakustinės diagnostikos ir OLTC apkrovos perjungiklis (angl. *on-load tap changer*) būklės duomenimis [18], [21], [23], [32]. Toks kompleksinis požiūris leidžia tiksliau interpretuoti diagnostinius signalus ir sumažina klaidingų išvadų tikimybę.

Apibendrinant galima teigti, kad akustiniai dalinių išlydžių nustatymo metodai yra svarbi autotransformatorių diagnostikos priemonė, ypač tada, kai būtina lokalizuoti vidinį defektą. Nors šių metodų tikslumą gali riboti signalo sklidimo sudėtingumas ir konstrukciniai veiksniai, jų vertė labiausiai atsiskleidžia taikant juos kartu su kitais diagnostikos metodais. Dėl galimybės lokalizuoti defektą, atsparumo elektromagnetiniams trikdžiams ir gero suderinamumo su UHF bei DGA metodais akustinė diagnostika išlieka svarbia šiuolaikinės autotransformatorių techninės būklės diagnostikos dalimi [15], [18], [21–23], [36], [38], [39].

### **1.5. Mašininio mokymosi metodų taikymas DGA ir PD diagnostikos duomenų analizei**

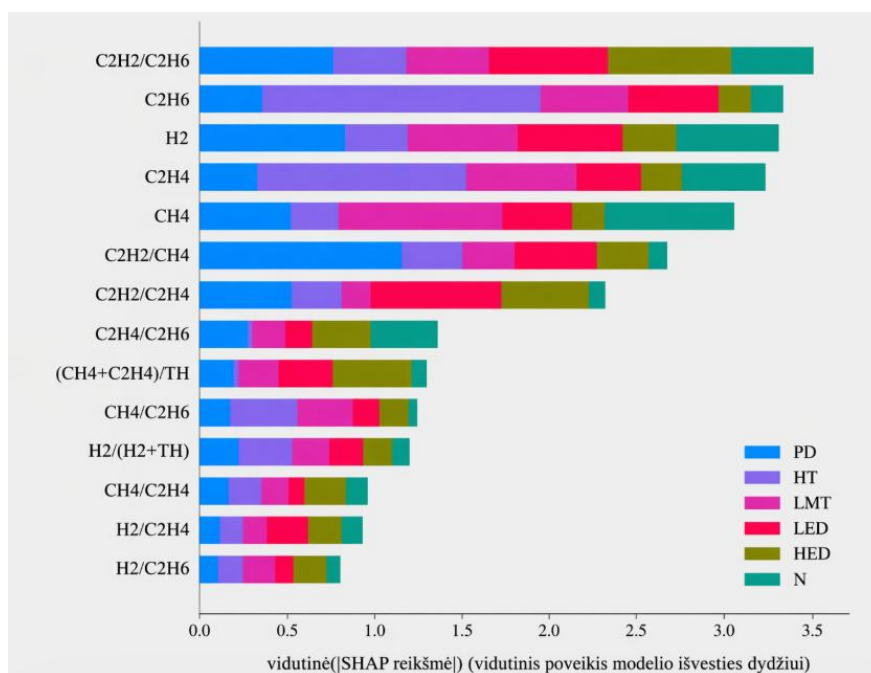
Mašininis mokymasis vis plačiau taikomas autotransformatorių diagnostikoje, nes tradiciniai ištirpusių dujų analizės (DGA) ir dalinių išlydžių (PD) interpretavimo metodai, nors tebėra plačiai naudojami praktikoje, dažnai turi ribotumą vertinant sudėtingus, mišrius ar triukšmingus gedimų atvejus. Klasikiniai metodai, tokie kaip Rogerso santykių metodas, Duvalio trikampis ar standartizuotos IEEE/IEC taisyklės, yra vertingi kaip pirminės interpretavimo priemonės, tačiau jų tikslumas mažėja tais atvejais, kai diagnostiniai požymiai persidengia, duomenų reikšmės yra ribinės arba skirtingi metodai pateikia nevienodas išvadas. Naujesnė literatūra rodo, kad duomenimis grįsti modeliai gali automatiškai išmokyti netiesinius ryšius tarp dujų koncentracijų, jų santykių, signalų požymių ir tikrųjų defektų klasių, todėl mažinamas ekspertinio vertinimo subjektyvumas ir didinamas klasifikavimo nuoseklumas [7], [12], [25], [30, 31].

Bendruoju atveju mašininio mokymosi diagnostikos uždavinys gali būti aprašomas kaip įvesties požymių ir išvesties klasės arba būklės rodiklio sąryšis [28]:

$$y = f(x) + \varepsilon, \quad (1.6)$$

kur  $x$  – diagnostinių požymių vektorius,  $y$  – prognozuojama klasė, gedimo tipas arba būklės indeksas, o  $\varepsilon$  – modelio paklaida. Toks formalizavimas ypač tinkamas autotransformatorių būklei vertinti, nes leidžia vienoje sistemoje sujungti DGA, PD, temperatūros, apkrovos ir kitus monitoringo kintamuosius. Duomenimis grįstų modelių pranašumas yra tas, kad jie gali mokytis ne tik iš aiškiai apibrėžtų taisyklių, bet ir iš paslėptų priklausomybių tarp požymių [6], [12], [25], [32].

DGA duomenų analizėje mašininis mokymasis dažniausiai taikomas transformatoriaus gedimams klasifikuoti pagal pagrindinių dujų koncentracijas, jų santykius, laiko pokyčius ir išvestinius požymius. Praktikoje požymių vektorius dažnai sudaromas iš tokių komponentų kaip  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  ir įvairių jų santykių. Naujausiuose darbuose aprašomi modeliai, paremti sprendimų medžiais, atsitiktiniais miškais, SVM, XGBoost, LightGBM, neuroniniais tinklais ir hibridiniais optimizavimo algoritmais. Ypač akcentuojama, kad pažangesni metodai leidžia ne tik didinti klasifikavimo tikslumą, bet ir atlikti požymių atranką bei modelio aiškinamumo analizę, pavyzdžiui, naudojant SHAP [7], [25], [29–31].

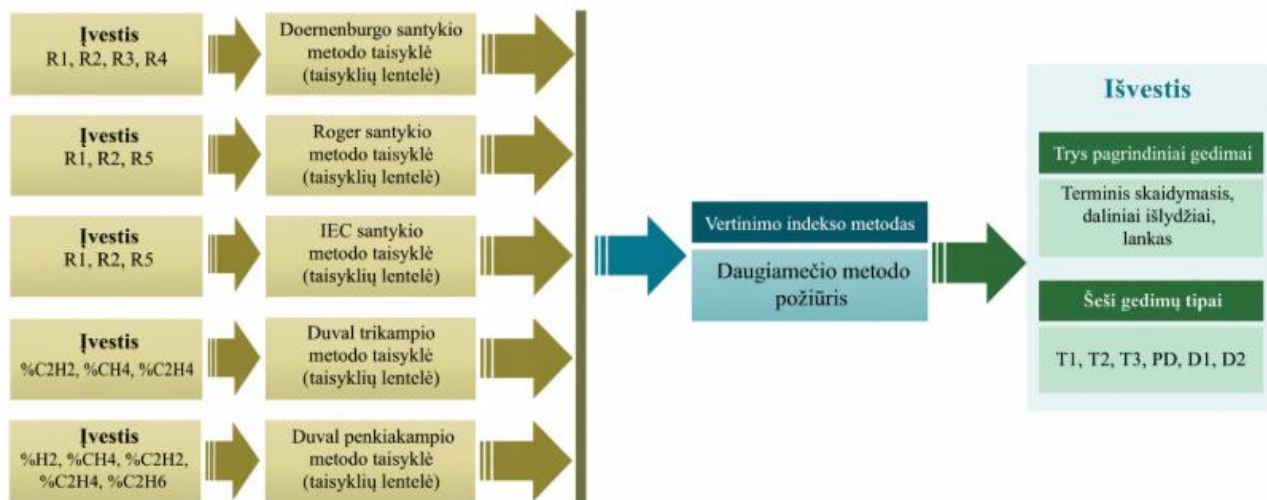


**9 pav.** DGA požymių svarbos įvertinimas taikant interpretuojamą mašininio mokymosi modelį [41]

DGA požymių svarbos įvertinimas taikant interpretuojamą mašininio mokymosi modelį. Čia PD – daliniai išlydžiai, HT – aukštos temperatūros terminis gedimas, LMT – žemos ir vidutinės temperatūros terminis gedimas, LED – mažos energijos elektrinis išlydis, HED – didelės energijos elektrinis išlydis, N – normali būseną. Horizontalioje ašyje pateikta vidutinė absoliutinė SHAP reikšmė, nusakanti požymių įtaką modelio išvesčiai.

Svarbi DGA analizės kryptis yra kelių klasikinių interpretavimo metodų ir mašininio mokymosi sujungimas į vieną sprendimų sistemą. Tokiu atveju klasikiniai metodai naudojami kaip papildomi įvesties požymiai arba ekspertinės taisyklės, o galutinis sprendimas priimamas modelio lygmeniu.

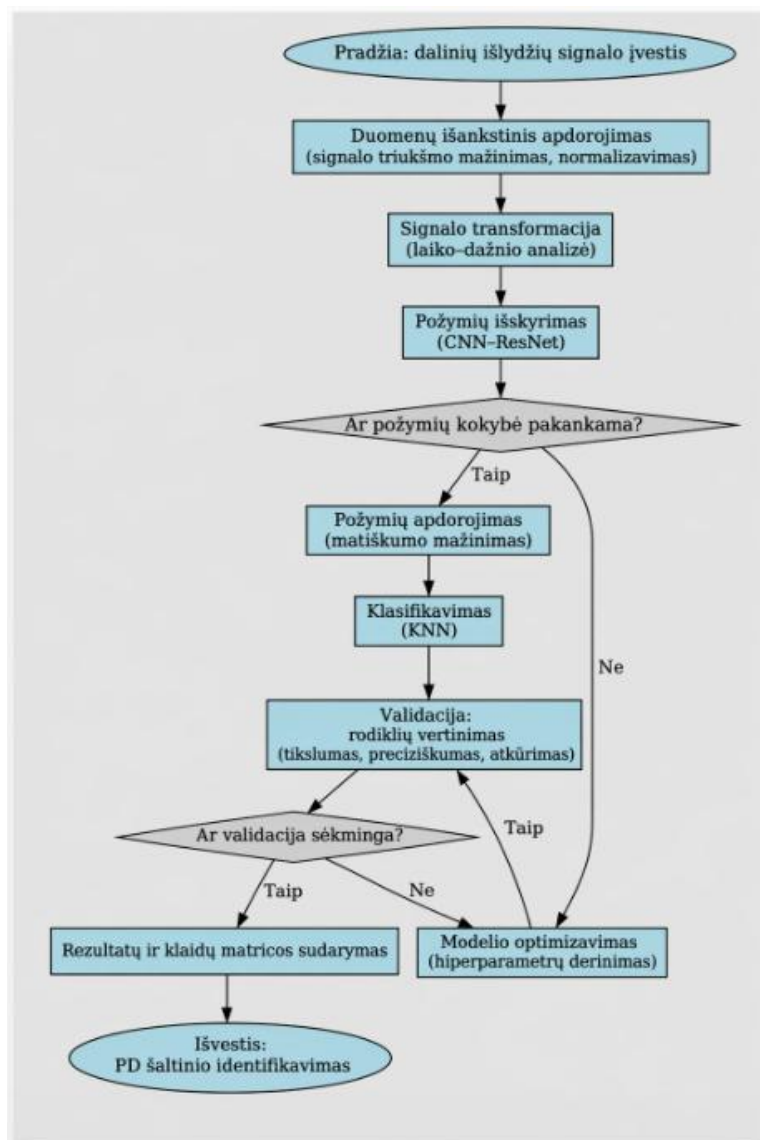
Toks požiūris yra praktiškai naudingas, nes realių autotransformatorių eksploataciniuose duomenyse skirtingi klasikiniai metodai neretai nurodo skirtingas galimas gedimų klases. Hibridiniai sprendimai leidžia sumažinti šį neatitikimą ir gauti stabilesnę diagnostinę išvadą, ypač kai diagnostika grindžiama ne vien pavienėmis dujų reikšmėmis, bet ir išplėstais požymių rinkiniais bei interpretuojamais modeliais [25], [30, 31].



10 pav. Klasikinių DGA interpretavimo metodų ir mašininio mokymosi sujungimo schema [31]

Paveiksle pavaizduota integruota diagnostikos schema, kurioje klasikiniai DGA interpretavimo metodai, tokie kaip Rogerso santykių metodas, Duvalio trikampis ar kitos taisyklėmis grįstos interpretavimo priemonės, naudojami kartu su mašininio mokymosi modeliu. Tokiu atveju klasikiniai metodai gali būti taikomi kaip papildomi įvesties požymiai arba ekspertinės taisyklės, o galutinis gedimo klasifikavimo sprendimas priimamas modelio lygmeniu. Toks požiūris leidžia sumažinti skirtingų metodų nesutapimus, geriau išnaudoti DGA duomenų informatyvumą ir padidinti diagnostikos nuoseklumą.

PD duomenų analizėje mašininis mokymasis taikomas signalams klasifikuoti, triukšmui atskirti, defektų tipams atpažinti ir lokalizacijai atlikti. Tradiciniai PD vertinimo būdai, paremti PRPD raštais, UHF, akustiniais ar elektriniais signalais, išlieka svarbūs, tačiau jų interpretacija dažnai priklauso nuo eksperto patirties ir yra jautri triukšmui. Todėl naujesniuose darbuose vis dažniau naudojami giliai modeliai, kurie PD signalus analizuoja kaip laiko–dažnio vaizdus, spektrogramas ar PRPD diagramas. 2025 m. publikuotame darbe parodyta, kad hibridinis CNN ir KNN modelis, sprendžiant PD aptikimo uždavinį, pasiekė 98,79 % tikslumą, 99,41 % preciziškumą ir 98,74 % F1 rodiklį, kartu išlaikydamas atsparumą triukšmui [16], [26].



11 pav. Hibridinio CNN (ResNet) ir KNN modelio taikymo schema PD signalų klasifikavimui [41]

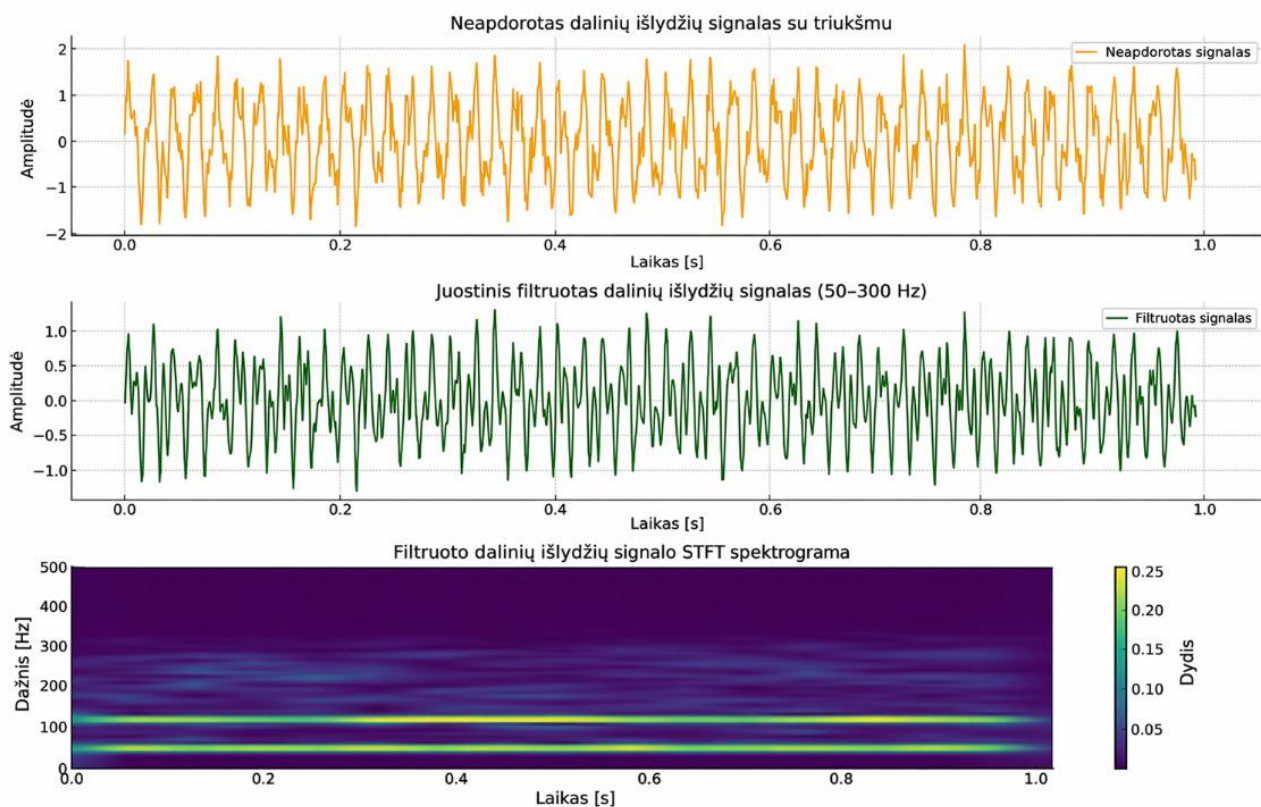
Paveiksle pateikta hibridinio modelio struktūra, naudojama dalinių išlydžių signalams klasifikuoti. PD signalai transformuojami į vaizdus, pavyzdžiui, spektrogramas, kurios vėliau analizuojamos taikant konvoliucinį neuroninį tinklą (CNN, angl. *convolutional neural network*).

Šiuo atveju taikoma ResNet architektūra, pagrįsta liekamojo neuroninio tinklo principu (angl. *residual neural network*), kuri leidžia efektyviai išskirti informatyvius požymius iš sudėtingų vaizdų. Gauti požymiai toliau klasifikuojami taikant  $k$  artimiausių kaimynų algoritmą (KNN, angl. *k-nearest neighbors*). Toks hibridinis modelis leidžia sujungti giliojo mokymosi galimybę automatiškai išskirti požymius su paprastu ir interpretuojamu klasifikatoriumi, todėl PD defektų klasifikacija tampa tikslesnė ir atsparesnė triukšmui. Paveikslas aiškiai iliustruoja perėjimą nuo rankiniu būdu išskiriamų požymių prie automatizuoto požymių išskyrimo.

PD klasifikavimo uždavinyje sprendimas dažnai formuluojamas kaip didžiausios tikimybės parinkimas [25]:

$$\hat{y} = \arg \max_c P(c | x), \quad (1.7)$$

kur  $c$  – galima PD klasė, o  $x$  – požymių vektorius, sudarytas iš amplitudinių, laiko–dažnio, statistinių arba vaizdinių požymių. Praktikoje iš STFT, bangelių transformacijos ar kitų laiko–dažnio metodų gautos spektrogramos dažnai naudojamos kaip CNN modelio įvestis, pagal kurią modelis automatiškai išmoka atpažinti skiriamuosius požymius. Naujesni darbai rodo, kad toks požiūris ypač naudingas atskiriant PD nuo foninio triukšmo ir sprendžiant mažos imties problemas, kai taikomas duomenų papildymas arba interpretuojamieji gilieji modeliai [16], [26].



**12 pav.** PD signalo apdorojimo seka: pradinis signalas, filtruotas signalas ir STFT spektrograma [41]

Paveiksle pateikiama dalinių išlydžių signalo transformavimo į mašininio mokymosi modeliu tinkamą įvestį seką. Pirmiausia rodomas pradinis PD signalas laiko srityje, po to – nufiltruota jo versija, kurioje sumažintas triukšmas ir pašalinti nereikalingi dažniniai komponentai. Galiausiai pateikiama STFT spektrograma, t. y. signalo laiko–dažnio atvaizdas. STFT čia suprantama kaip trumpalaikė Furjė transformacija, angl. *short-time Fourier transform*. Toks vaizdavimas leidžia aiškiai parodyti, kaip iš neapdorotų PD signalų gaunamas informatyvus laiko–dažnio vaizdas, tinkamas CNN modeliui. Spektrogramos yra ypač naudingos atskiriant PD signalus nuo foninio triukšmo ir išskiriant skirtingų defektų požymius, todėl jos plačiai taikomos šiuolaikiniuose giliojo mokymosi principais pagrįstuose PD diagnostikos modeliuose.

Apibendrinant galima teigti, kad mašininis mokymasis yra viena perspektyviausių šiuolaikinės autotransformatorių diagnostikos kryptų. DGA atveju jis leidžia tiksliau interpretuoti sudėtingus dujų koncentracijų derinius ir integruoti kelių klasikinių metodų rezultatus į vieną sprendimų sistemą, o PD analizėje – efektyviau apdoroti triukšmingus signalus, atpažinti defektų tipus ir naudoti

pažangius laiko–dažnio vaizdus kaip modelių įvestį. Toks požiūris sudaro prielaidas tikslesniam, nuoseklesniam ir labiau automatizuotam autotransformatorių techninės būklės vertinimui [12], [25, 26], [31].

## **2. Eksperimentinė dalis**

Eksperimentinės dalies metu numatoma atlikti praktinius dalinių išlydžių (PD) matavimus Alytaus 400/330/10 kV ir 330/110/10 kV autotransformatoriuose, naudojant mobiliąją diagnostinę įrangą. Matavimų metu bus registruojamas PD impulsų kiekis, intensyvumas ir charakteristikos, siekiant nustatyti aktyvius arba besiformuojančius izoliacijos defektus.

Gauti PD matavimo rezultatai bus analizuojami kartu su istoriniais ištirpusių dujų analizės (DGA) duomenimis. Bus tiriama, ar egzistuoja koreliacija tarp PD aktyvumo ir atitinkamų dujų, pavyzdžiui, vandenilio ir acetileno, koncentracijų pokyčių alyvoje.

Eksperimentinės užduoties tikslas – įvertinti PD matavimų pridėtinę vertę esamoje DGA stebėsenos sistemoje bei nustatyti, kokiomis sąlygomis abu metodai gali vienas kitą papildyti. Taip pat siekiama išbandyti integruotos duomenų analizės koncepciją, kai PD, DGA, temperatūros ir apkrovos duomenys interpretuojami kompleksiskai, taikant iš anksto apibrėžtas diagnostikos taisykles ar algoritmus. Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais, bus pateiktos rekomendacijos dėl PD duomenų įtraukimo į AMS struktūrą ir suformuluota galima diagnostinės metodikos schema.

### **2.1. Eksperimentinio tyrimo paskirtis ir aktualumas**

Šio darbo eksperimentinė dalis skirta praktiškai įvertinti dalinių išlydžių (PD) matavimų taikymo galimybes aukštos įtampos autotransformatorių izoliacijos techninės būklės diagnostikoje. Šiuo metu plačiausiai taikomas izoliacijos būklės stebėsenos metodas yra ištirpusių dujų analizė (DGA), kuri leidžia identifikuoti izoliacijos defektus remiantis dujų koncentracijų pokyčiais alyvoje. Vis dėlto DGA metodas dažniausiai yra jautrus jau pažengusiems izoliacijos pažeidimams ir ne visuomet leidžia laiku nustatyti defektus ankstyvuosiuose jų vystymosi etapuose.

Dalinių išlydžių matavimai suteikia galimybę fiksuoti lokalius izoliacijos pažeidimus ankstyvuosiuose jų formavimosi etapuose, todėl gali reikšmingai papildyti tradicinius diagnostikos metodus. Eksperimentiniu tyrimu siekiama nustatyti, ar PD matavimų duomenys, integruoti su DGA, apkrovos ir temperatūros informacija, gali padidinti autotransformatorių techninės būklės įvertinimo patikimumą ir diagnostinės stebėsenos efektyvumą.

### **2.2. Eksperimentinio tyrimo tikslas ir uždaviniai**

Tikslas – atlikti dalinių išlydžių (PD) matavimus akustiniu metodu, naudojant DOBLE DFA300 diagnostinę įrangą, prijungtą prie veikiančių autotransformatorių matavimo taškų, ir įvertinti, ar nustatyti PD požymiai dera su alyvos dujų chromatografinės analizės (DGA) indikacijomis. Uždaviniai:

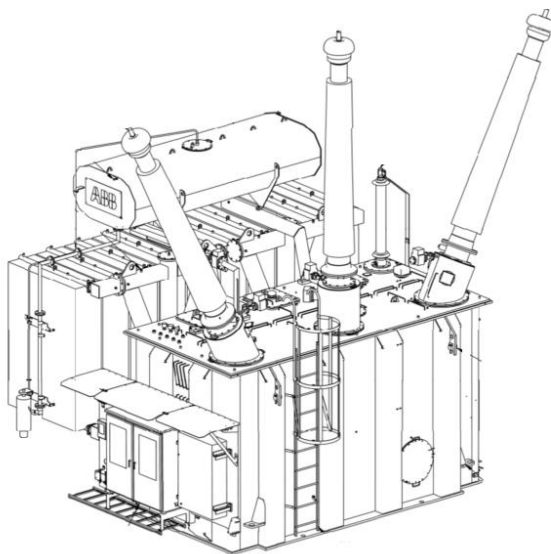
1. parengti matavimo metodiką (senorių parinkimas, jų išdėstymas, triukšmo mažinimas, matavimo režimai);
2. užfiksuoti akustinių impulsų parametrus (amplitudė, impulsų skaičius/aktyvumas, lokalizacija, pasikartojimas laike);
3. surinkti/atrinkti to paties laikotarpio DGA duomenys ir apskaičiuoti diagnostinius rodiklius (pvz., raktinės dujos, santykiai);
4. palyginti akustinių DI rodiklius su DGA požymiais ir suformuluoti išvadas dėl defekto tipo/tikimybės ir būklės tendencijų.

## 2.3. Tyrimo objektas ir sąlygos

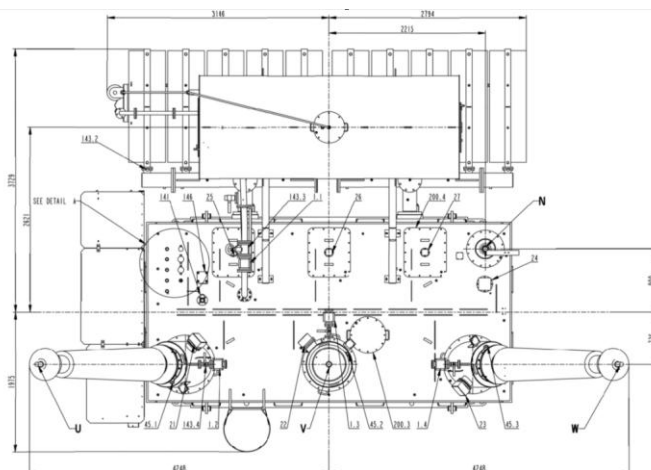
Tyrimai atliekami Alytaus 330 kV ir 400 kV transformatorių pastotėse, kuriose eksploatuojami šie aukštos įtampos įrenginiai:

### 2.3.1. 400 kV šuntinis reaktorius

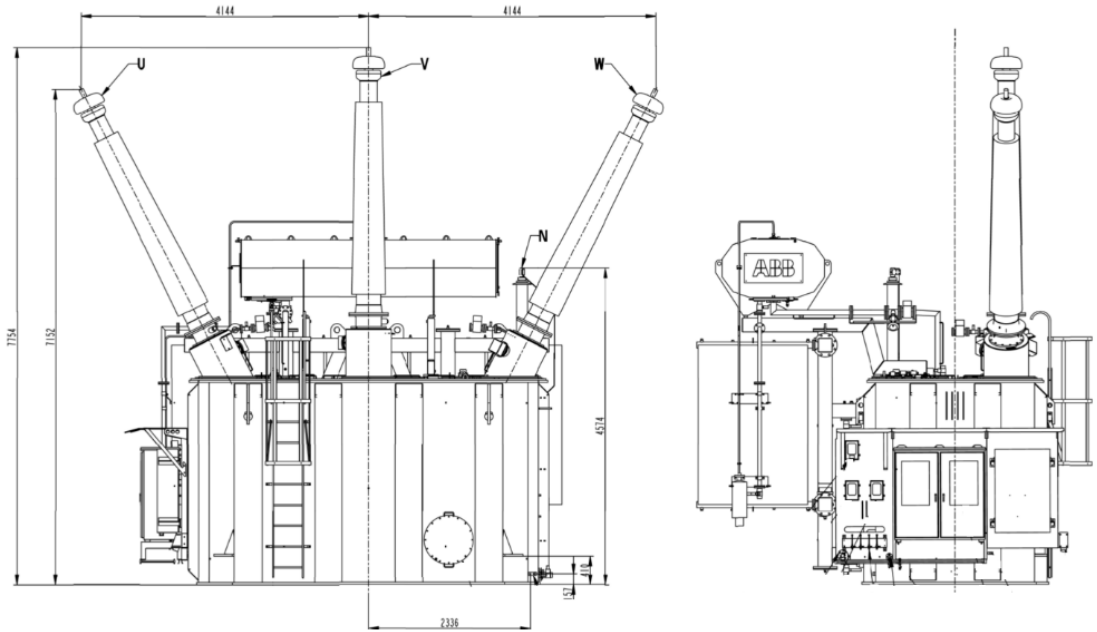
ABB įrenginio vardinė galia – 72 MVA<sub>r</sub>, vardinė įtampa – 400 kV. Įrenginys pagamintas 2015 m. Pagrindinės izoliacijos tipas – alyva „Nytro Lyra X“, aktyvioji dalis – varis. Įrenginyje naudojama GE KELMAN nuolatinės stebėsenos realiuoju laiku sistema.



13 pav. 400 kV šuntinis reaktorius



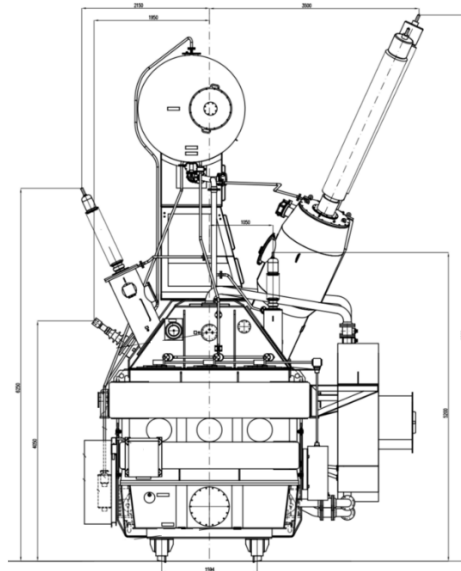
14 pav. 400 kV šuntinio reaktoriaus pločio, ilgio gabaritas



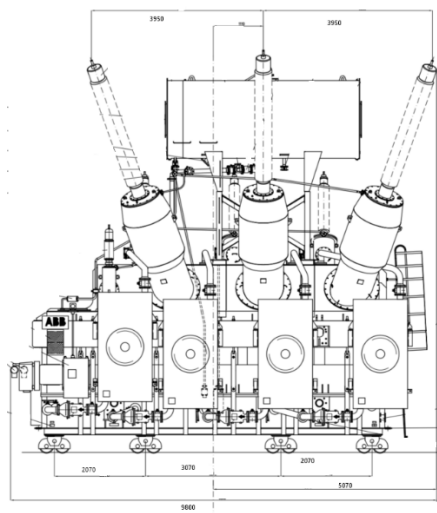
15 pav. 400 kV šuntinio reaktoriaus aukščio gabaritas

### 2.3.2. 330/110/10 kV autotransformatoriai

ABB autotransformatoriaus vardinė galia – 175 MVA, vardinė įtampa – 330 kV. Įrenginys pagamintas 2005 m. Pagrindinės izoliacijos tipas – alyva „Nytro 10XN“, aktyvioji dalis – varis. Įrenginyje naudojama GE KELMAN nuolatinės stebėsenos realiuoju laiku sistema.



16 pav. 330 kV autotransformatoriaus aukščio gabaritas



**17 pav.** 330 kV autotransformatoriaus pločio gabaritas

### 2.3.3. Eksploatacinės sąlygos matavimų metu

Atliekant dalinių išlydžių matavimus akustiniu metodu, naudojant DOBLE DFA300 diagnostinę įrangą, prijungtą prie autotransformatorių matavimo taškų, 2025 m. gegužės 1 d. aplinkos temperatūra buvo 15 °C.

**5 lentelė.** AT-1 duomenys

<b>Matavimo data</b>	<b>2025-05-01</b>
Matavimo tipas	Dalinių išlydžių matavimai (akustinis)
Aplinkos temperatūra, °C	15
Aplinkos drėgmė, %	49
Apkrova, MVA	21
Darbinė įtampa, kV	330
Įjungtų ventiliatorių grupių skaičius	1 iš 4
Veikiantys ventiliatoriai	1
Veikiantys alyvos siurbiai	1

**6 lentelė.** AT-2 duomenys

<b>Matavimo data</b>	<b>2025-05-01</b>
Matavimo tipas	Dalinių išlydžių matavimai (akustinis)
Aplinkos temperatūra, °C	15
Aplinkos drėgmė, %	49
Apkrova, MVA	21
Darbinė įtampa, kV	330
Įjungtų ventiliatorių grupių skaičius	1 iš 4
Veikiantys ventiliatoriai	1
Veikiantys alyvos siurbiai	1

Atliekant dalinių išlydžių matavimus akustiniu metodu su DOBLE DFA300 ir prijungus prie veikiančio šuntinio reaktoriaus, aplinkos temperatūra 2025-05-01 buvo 23 °C.

**7 lentelė.** ŠRE1-Elk1 duomenys

<b>Matavimo data</b>	<b>2025-05-01</b>
Matavimo tipas	Dalinių išlydžių matavimai (akustinis)
Aplinkos temperatūra, °C	23
Aplinkos drėgmė, %	47
Apkrova, MVA	72
Darbinė įtampa, kV	400

## **2.4. Matavimo metodika naudojant DOBLE DFA300 įrangą**

### **2.4.1. Metodo esmė**

Akustinis dalinių išlydžių matavimo metodas pagrįstas mechaninių elastinių bangų, susidarančių dalinių išlydžių metu, registravimu. Daliniai išlydžiai izoliacijoje sukelia trumpalaikius mechaninius impulsus, t. y. ultragarsines bangas, kurios sklinda per transformatoriaus izoliacinę terpę, alyvą ir metalinį baką iki paviršiuje sumontuotų akustinių jutiklių. Šie impulsai paprastai patenka į dešimčių ar šimtų kilohercų dažnių juostą.

DOBLE DFA300 prietaisas leidžia realiuoju laiku registruoti akustinės emisijos signalus, identifikuojant impulsinius signalus, būdingus daliniams išlydžiams ar kibirkščiavimui izoliacijoje [32].

### **2.4.2. Matavimo įranga**

Dalinių išlydžių matavimams naudota DOBLE DFA300 sistema – neinvazinė dalinių išlydžių diagnostikos įranga, skirta PD šaltiniams aptikti ir lokalizuoti įvairiuose elektros energetikos įrenginiuose. Ši sistema leidžia atlikti matavimus taikant du skirtingus principus.

DOBLE DFA300 (angl. *partial discharge surveyor*) yra rankinė nešiojamoji diagnostikos priemonė, skirta aukštos įtampos elektros įrenginių izoliacijos būklės stebėsenai, ypač daliniams išlydžiams (PD) aptikti ir jų vietai nustatyti. Galimi keli matavimo būdai [32]:

1. radijo dažnio trikdžių (RFI) nuo PD signalo diapazone ~50–1000 MHz;
2. akustinė emisija (AE) kanalas: fiksuoja aukšto dažnio akustinius impulsus ~10–500 kHz, kurie susidaro dėl izoliacijos gedimų ar mechaninių defektų.



**18 pav.** Dalinių išlydžių matavimo įranga DOBLE DFA300

Prieš atliekant RFI matavimus buvo vykdomas aplinkos elektromagnetinio fono įvertinimas. Šis etapas yra būtinas siekiant identifikuoti pašalinius trikdžius, galinčius iškreipti matavimo rezultatus ir būti klaidingai priskirti daliniams išlydžiams. Fono matavimo metu atliekamas įrangos kalibravimas, nustatomos matavimo ribos, signalo mastelis bei galimos paklaidos. Tokiu būdu užtikrinamas patikimas dalinių išlydžių identifikavimas ir rezultatų interpretavimo tikslumas, sumažinant klaidingų diagnostinių išvadų riziką.



**19 pav.** Synchronizatoriaus antena W-889



**20 pav.** Dalinių išlydžių jutiklis



21 pav. Sinchronizavimo radijo modulis



22 pav. Jutiklių tvirtinimo izoliacinė lazda

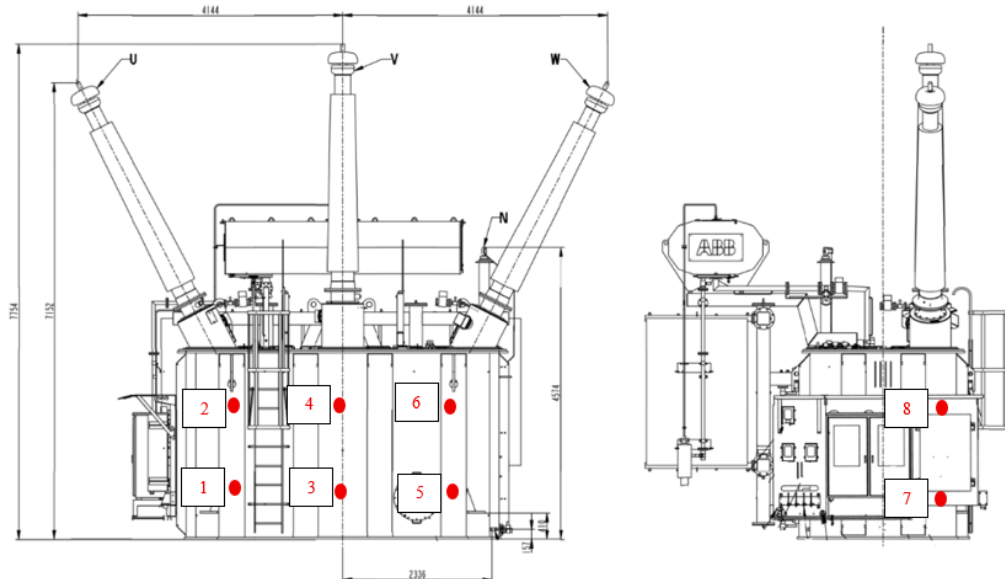


23 pav. Doble DA100 kryptinė antena

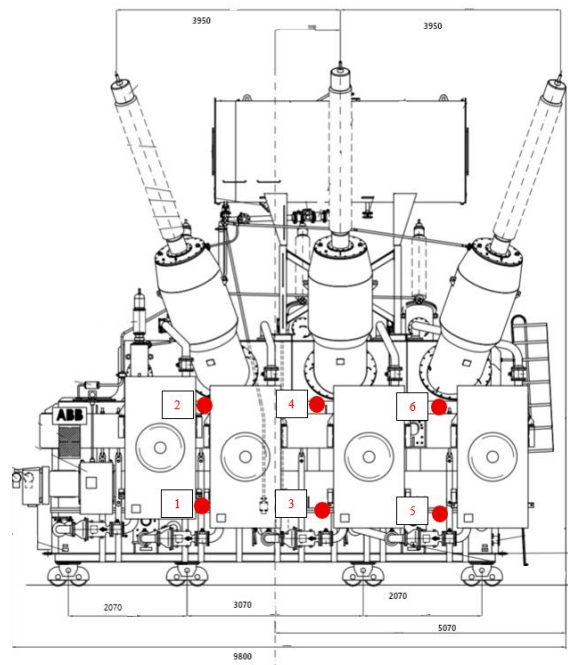
## 2.5. Jutiklių išdėstymas ant įrenginių korpusų

Siekiant užtikrinti pakankamą viso transformatoriaus ir šuntinio reaktoriaus tūrio diagnostinę aprėptį, dalinių išlydžių matavimai atliekami ne mažiau kaip 20 taškų. Matavimo taškai parenkami atsižvelgiant į transformatoriaus bako geometriją, fazių išdėstymą ir tikėtinų izoliacijos defektų zonas.

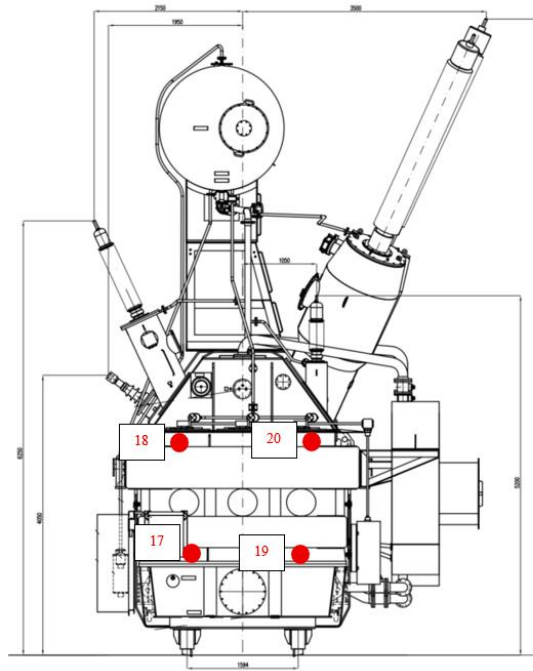
Ant kiekvieno ilgesnio transformatoriaus ir šuntinio reaktoriaus šono išdėstomi šeši matavimo taškai – trys apatinėje ir trys viršutinėje bako dalyse, maždaug 0,5 m ir 1,8 m atstumu nuo žemės paviršiaus. Ant siauresnių šonų matavimai atliekami ne mažiau kaip keturiuose taškuose, maždaug 0,5 m ir 1,8 m atstumu nuo žemės paviršiaus. Esant poreikiui, matavimo taškų skaičius gali būti didinamas, siekiant tiksliau identifikuoti dalinių išlydžių šaltinius.



24 pav. Šuntinio reaktoriaus matavimo taškų išdėstymas



25 pav. Autotransformatoriaus matavimo taškų išdėstymas



26 pav. Autotransformatoriaus matavimo taškų išdėstymas

Kitoje autotransformatoriaus pusėje matavimo taškai taip pat išdėstomi pagal tą patį principą.

## 2.6. Eksperimento atlikimas

Pirmiausia atliekami akustinės emisijos (AE, angl. *acoustic emission*) matavimai. Šiame etape registravimas atliekamas, kai autotransformatoriui ir šuntiniam reaktoriui prijungta darbinė įtampa. Pagal matavimo taškų išdėstymo schemą (24 pav.) prie bako paviršiaus pritvirtinamas ultragarsinis jutiklis ir atliekami akustiniai matavimai.

Pateiktame grafike horizontalioji ašis išreiškia laiką  $t$  ms ir apima intervalą nuo 0 iki 20 ms, kuris atitinka vieną pilną 50 Hz kintamosios įtampos periodą. Kadangi 50 Hz dažnis atitinka 20 ms periodo trukmę, kiekvienas laiko momentas grafike gali būti tiesiogiai susietas su atitinkama sinusoidės faze. Tokiu būdu laiko ašis yra lygiavertė fazinei ašiai.

Ryšys tarp laiko ir fazės gali būti išreikštas taip [14]:

$$\varphi = \frac{t}{T} \cdot 360^\circ, \quad (2.1)$$

kur  $t$  – laikas, ms;  $T = 20$  ms – 50 Hz įtampos periodas.

Pagal šią priklausomybę 0 ms atitinka  $0^\circ$  fazę, t. y. nulinį perėjimą, 5 ms –  $90^\circ$  fazę, t. y. teigiamą sinusoidės maksimumą, 10 ms –  $180^\circ$  fazę, t. y. kitą nulinį perėjimą, 15 ms –  $270^\circ$  fazę, t. y. neigiamą maksimumą, o 20 ms –  $360^\circ$  fazę, t. y. pilną ciklą.

Gauti mV lygio rezultatai nėra tapatūs IEC 60270 standarte apibrėžiamam matomajam krūviui, išreiškiamam pC. Todėl šiame darbe jie vertinami kaip santykinis signalo lygis, tinkamas rezultatams palyginti, lokalizacijai atlikti ir tendencijoms nustatyti.

Antruoju metodu atliekami radijo dažnių trikdžių matavimai (RFI, angl. *radio frequency interference*).

### 2.6.1. 400 kV šuntinio reaktoriaus pirmieji akustiniai matavimai

Matavimus atlikus „DOBLE DFA300“ įranga, gauti duomenys buvo pateikti ir analizuojami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą. Ši programinė įranga leidžia efektyviai peržiūrėti, redaguoti ir eksportuoti matavimo duomenis į įvairius ataskaitų formatus.

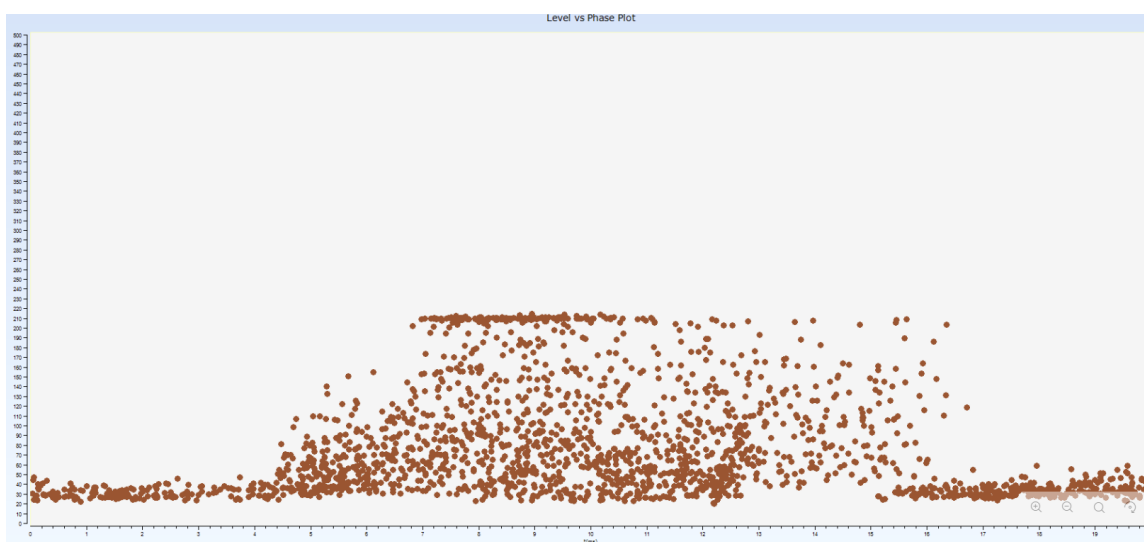
Vadovaujantis matavimo taškų išdėstymo schema (24 pav.), kiekviename numatytame taške buvo pritvirtintas ultragarsinis jutiklis ir atlikti akustiniai matavimai. Iš viso atlikta 10 matavimų. Toliau darbe detaliau analizuojami tik tie matavimo taškai, kuriuose pastebėti reikšmingesni akustinių parametrų nuokrypiai nuo įprastinių reikšmių. Kiti matavimo protokolai, kuriuose reikšmingų nuokrypių nenustatyta, pateikiami 3 priede.

Iš 27–35 pav. matyti, kad didžiausi vidinių dalinių išlydžių signalai užregistruoti šiuose matavimo taškuose:

1. matavimo taške Nr. 7, valdymo spintos pusėje, apie 0,5 m aukštyje – iki 200 mV;
2. matavimo taške Nr. 8, valdymo spintos pusėje, apie 1,8 m aukštyje – iki 170 mV;
3. matavimo taške Nr. 9, neutralės pusėje, apie 0,5 m aukštyje – iki 115 mV;
4. matavimo taške Nr. 10, neutralės pusėje, apie 1,8 m aukštyje – iki 140 mV.

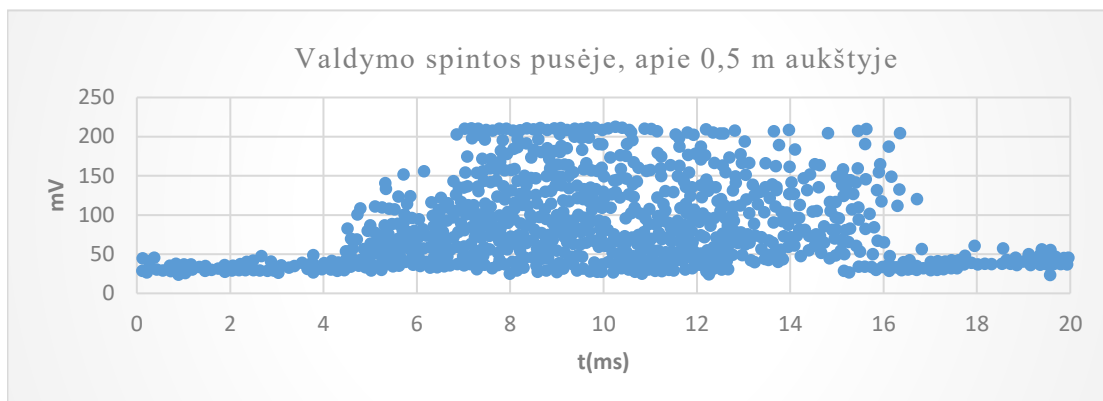
Tolesnei analizei šis duomenų formatas nėra pakankamai patogus, nes iš „PDViewer“ programinės įrangos eksportuoti grafikai pateikiami PDF formatu, o duomenims apdoroti, analizuoti ir klasifikuoti reikalingi PNG ir CSV formatai. Dėl šios priežasties buvo atliktas duomenų skaitmenizavimas.

Rudos spalvos taškai – užregistruotų dalinių išlydžių sklaida per visą sinusoidės periodą, sudaryta iš 1000 taškų.

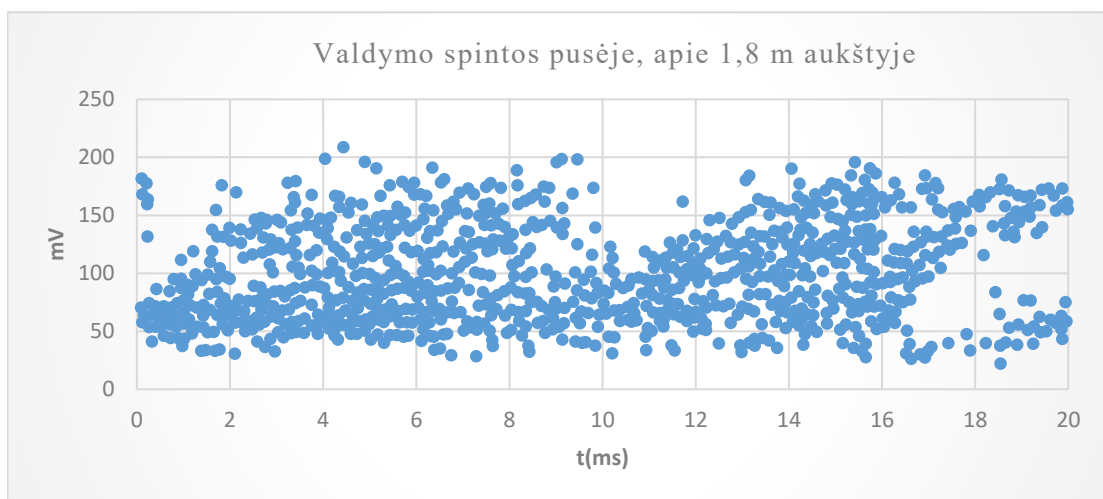


27 pav. Matavimo taškas Nr. 7

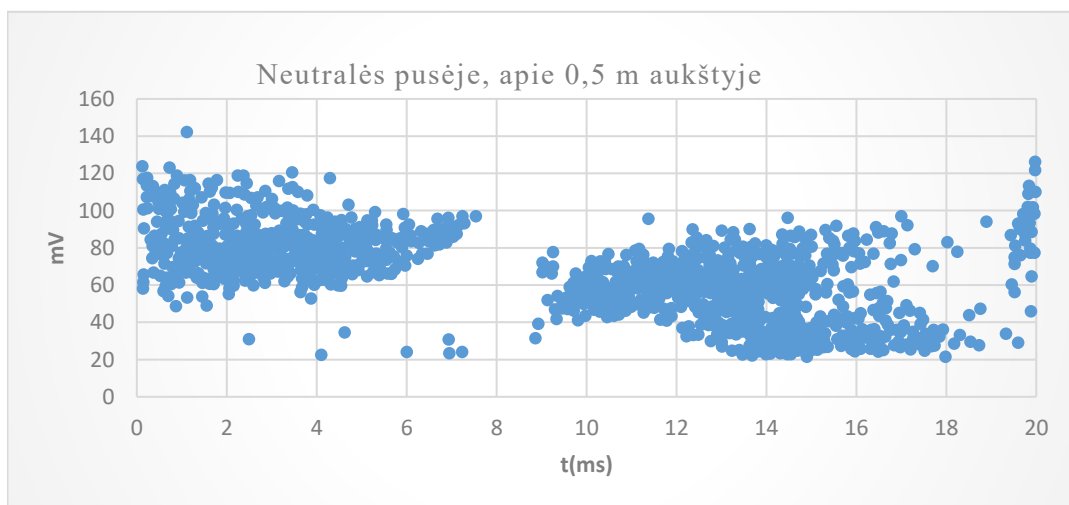
Iš skaitmenizuoto duomenų atvaizdavimo matyti, kad skirtumų ar nuokrypių nenustatyta, todėl tolesnėje analizėje bus naudojamas toks duomenų atvaizdavimo būdas.



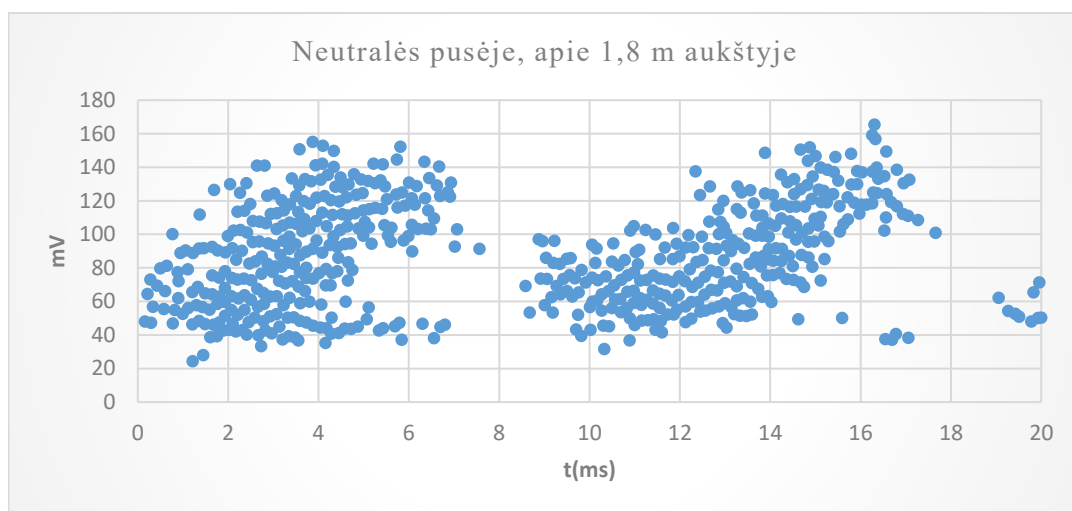
**28 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 7



**29 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 8



**30 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 9

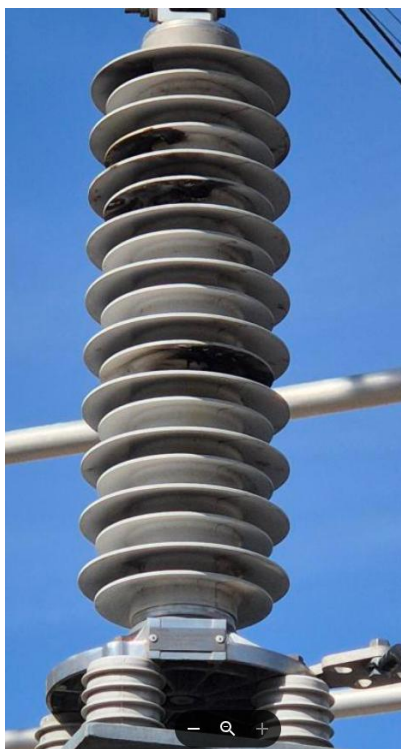


**31 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 10

Atlikus 400 kV šuntinio reaktoriaus akustinius matavimus, grafikuose matyti, kad didžiausias dalinių išlydžių aktyvumas pasireiškė valdymo spintos ir neutralės pusėse. Ryškiausias signalas užfiksuotas matavimo taške Nr. 7, valdymo spintos pusėje, maždaug 0,5 m aukštyje. Šiame taške impulsų amplitudės siekė iki 200 mV. Signalai nebuvo tolygiai pasiskirstę per visą 20 ms periodą – didžiausias aktyvumas matomas maždaug 4–16 ms intervale. Tai leidžia daryti prielaidą, kad šioje zonoje gali būti padidėjęs akustinis aktyvumas ir galimas dalinių išlydžių šaltinis.

Matavimo taške Nr. 8, taip pat valdymo spintos pusėje, apie 1,8 m aukštyje, impulsų amplitudės siekė iki 170 mV. Grafike galima pastebėti du ryškesnius impulsų telkinius, kurie pasikartoja per vieną 50 Hz įtampos periodą. Toks impulsų išsidėstymas gali būti siejamas su paviršiniais arba sąsajos tipo daliniais išlydžiais, nes impulsai nėra atsitiktiniai, o priklauso nuo sinusinės įtampos fazės.

Padidėjęs aktyvumas taip pat nustatytas neutralės pusėje. Matavimo taške Nr. 9, apie 0,5 m aukštyje, impulsų amplitudės siekė iki 115 mV, o taške Nr. 10, apie 1,8 m aukštyje, – iki 140 mV. Taške Nr. 10 ypač aiškiai matomas impulsų pasikartojimas dviejose periodo dalyse, todėl šis pasiskirstymas taip pat gali rodyti paviršinio arba sąsajos tipo dalinių išlydžių požymius. Pirmųjų matavimų metu prie šuntinio reaktoriaus neutralės buvo pastebėtas pažeistas neutralės viršįtampių ribotuvas, todėl neutralės pusėje užfiksuotas padidėjęs impulsinis aktyvumas siejamas galimu ribotuvo defektu.



**32 pav.** Neutralės viršitampių ribotuvas

Apibendrinant galima teigti, kad svarbiausios stebėtinos 400 kV šuntinio reaktoriaus zonos yra valdymo spintos ir neutralės pusės. Šiose vietose užfiksuotos didžiausios impulsų amplitudės ir aiškesnis impulsų pasikartojimas tam tikrose sinusoidės periodo dalyse. Neutralės pusės rezultatai papildomai siejami su pirmųjų matavimų metu pastebėtu pažeistu neutralės viršitampių ribotuvu. Kadangi toks signalų pobūdis gali būti būdingas paviršiniams arba sąsajos tipo daliniams išlydžiams, šias zonas tikslinga papildomai stebėti ir vertinti atliekant tolesnius diagnostinius matavimus.

### **2.6.2. AT-1 autotransformatoriaus pirmieji akustiniai matavimai**

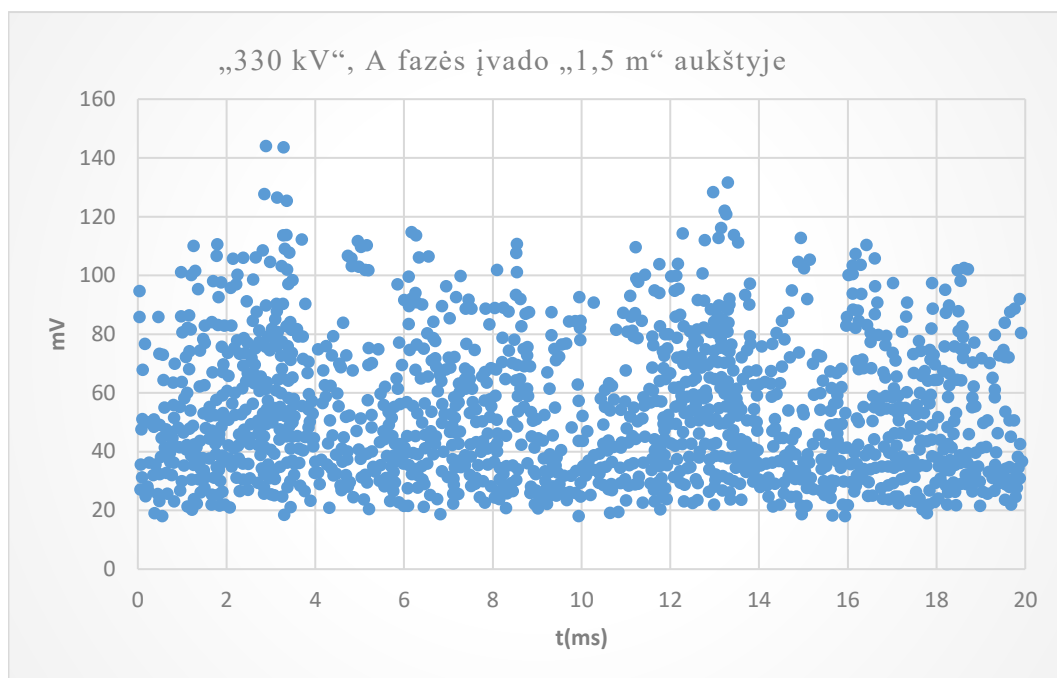
Toliau analogišku principu tęsiami AT-1 autotransformatoriaus akustinių matavimų ir duomenų apdorojimo darbai. Vadovaujantis matavimo taškų išdėstymo schemomis (25–26 pav.), kiekviename numatyta taške pritvirtinamas ultragarsinis jutiklis ir atliekami akustiniai matavimai. Gauti duomenys iš „DOBLE DFA300“ įrangos peržiūrėti naudojant „PDViewer“ programinę įrangą.

Kaip ir ankstesniu atveju, iš visų atliktų matavimų detalesnei analizei atrenkami tie matavimo taškai, kuriuose nustatyti ryškesni akustinių signalų nuokrypiai nuo įprastinių reikšmių. Iš karto pateikiami skaitmenizuoti atrinktų matavimo taškų grafikai, parengti tolesniam duomenų apdorojimui, analizei ir klasifikavimui. Likę matavimo protokolai, kuriuose reikšmingų dalinių išlydžių požymių arba kitų nuokrypių nenustatyta, pateikiami 1 priede.

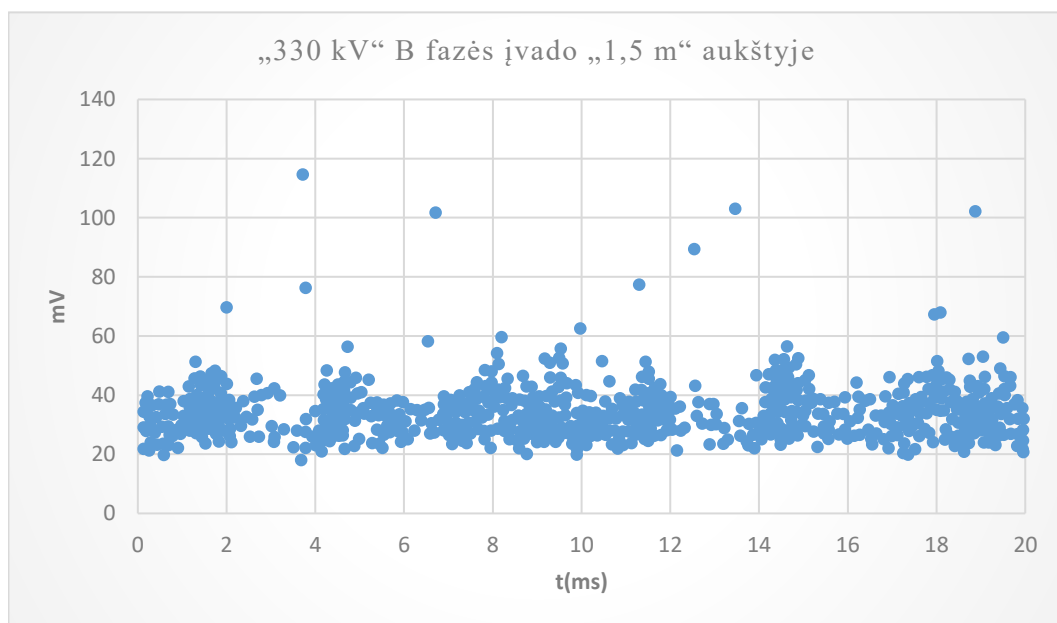
Iš 36–47 pav. matyti, kad didžiausi vidinių dalinių išlydžių signalai užregistruoti šiuose matavimo taškuose:

1. matavimo taške Nr. 1, prie 330 kV A fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 115 mV;
2. matavimo taške Nr. 3, prie 330 kV B fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 50 mV;
3. matavimo taške Nr. 12, prie 110 kV C fazės įvado, 2,8 m aukštyje – iki 45 mV;
4. matavimo taške Nr. 18, atšakų perjungiklio pusėje, 110 kV krašte, 2,8 m aukštyje – iki 75 mV;

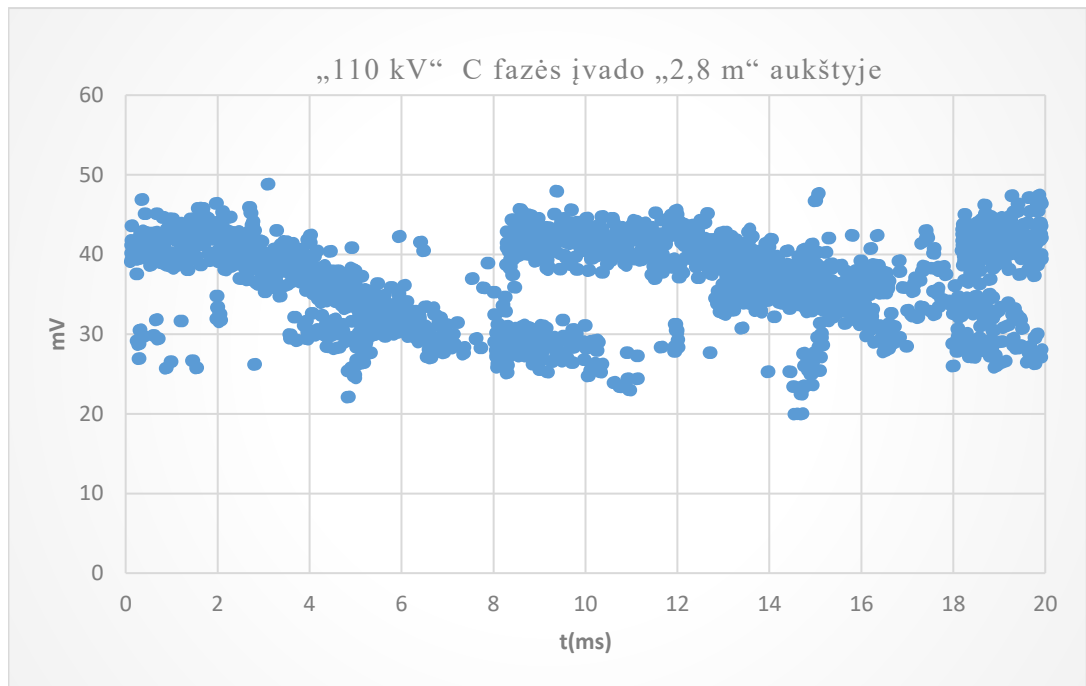
5. matavimo taške Nr. 19, atšakų perjungiklio pusėje, 330 kV įvadų krašte, 1,5 m aukštyje – iki 36 mV;
6. matavimo taške Nr. 20, atšakų perjungiklio pusėje, 330 kV įvadų krašte, 2,8 m aukštyje – iki 32 mV.



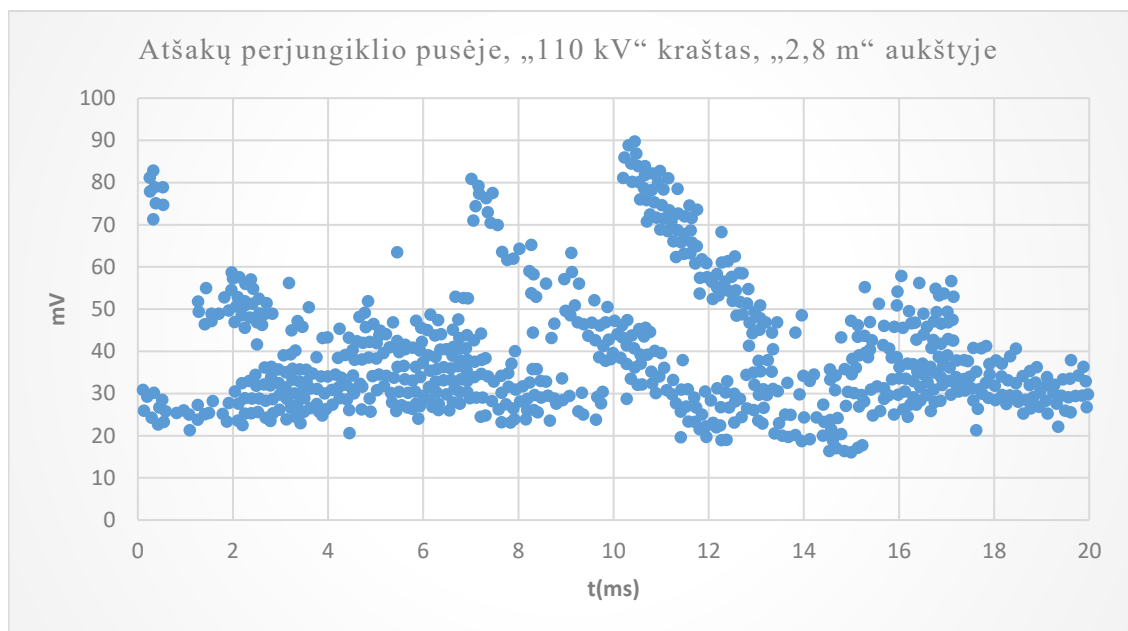
**33 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 1



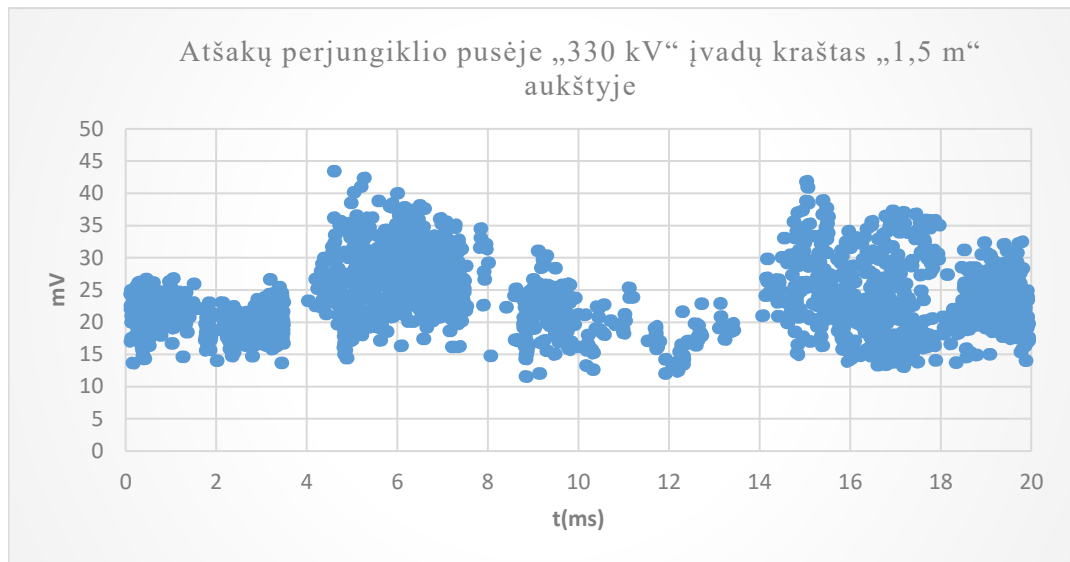
**34 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 3



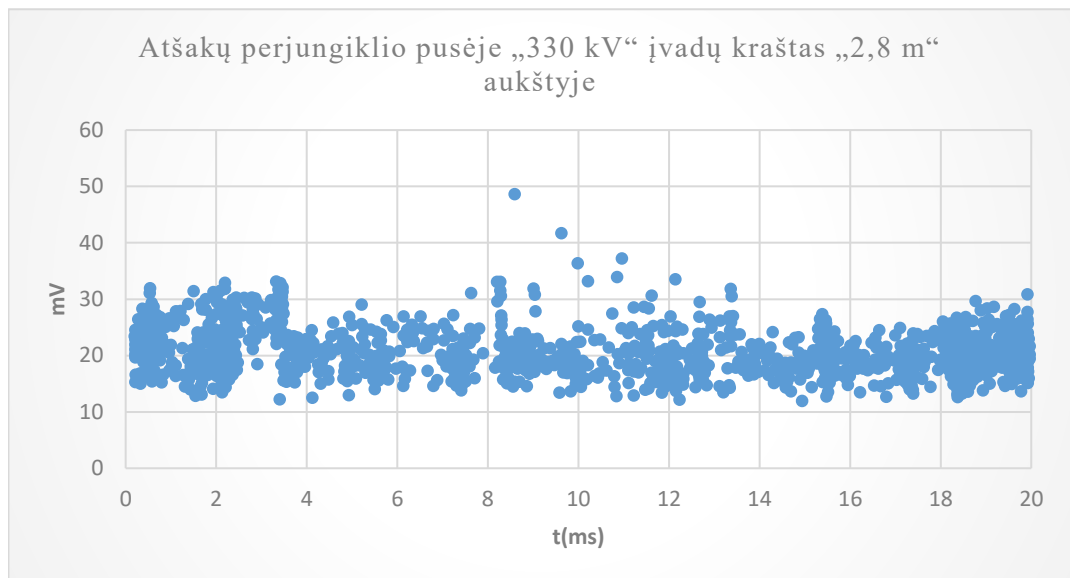
**35 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 12



**36 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 18



**37 pav.** Matavimo taškas Nr. 19



**38 pav.** Matavimo taškas Nr. 20

Atlikus 330/110/10 kV autotransformatoriaus AT-1 akustinius matavimus pagal 50 Hz periodo fazinį pasiskirstymą, grafikuose matyti, kad dalinių išlydžių impulsai skirtinguose matavimo taškuose pasiskirsto nevienodai. Ryškiausias fazinis pasikartojimas nustatytas matavimo taške Nr. 1, kuriame impulsai telkiasi I ir III kvadrantuose, maždaug 2–4 ms ir 12–14 ms intervaluose. Toks pasiskirstymas gali būti būdingas paviršiniams arba sąsajos tipo daliniams išlydžiams.

Panašus, tačiau mažesnio intensyvumo pasiskirstymas stebimas ir matavimo taške Nr. 18, kur impulsai ryškiau telkiasi apie 0–2 ms ir 10–12 ms. Matavimo taške Nr. 19 taip pat matomas pasikartojantis impulsų susitelkimas kas pusperiodį, tačiau dėl mažesnės amplitudės šis taškas vertintinas kaip silpnescio aktyvumo zona.

Matavimo taškuose Nr. 3, Nr. 12 ir Nr. 20 impulsai pasiskirstę tolygiau, be aiškių dviejų pagrindinių fazinių telkinių, todėl šių taškų aktyvumas labiau vertintinas kaip mažesnio intensyvumo arba foninis.

Bendrai pagal fazinį pasiskirstymą labiausiai išsiskiria matavimo taškai Nr. 1 ir Nr. 18, kurie turėtų būti laikomi pagrindinėmis stebėtinomis AT-1 zonomis.

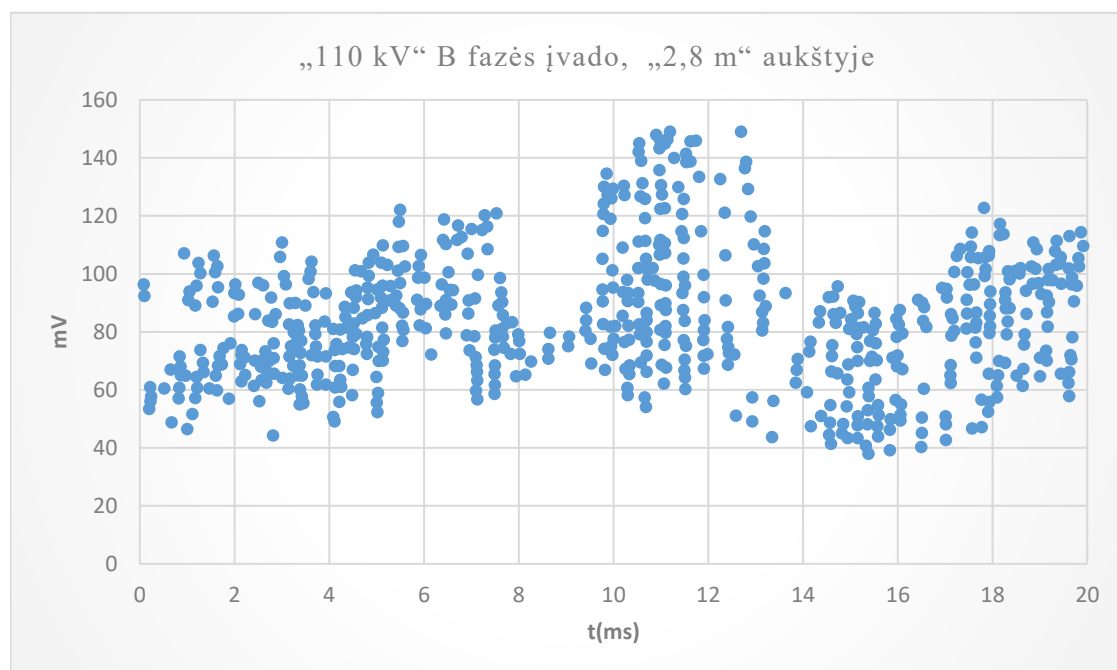
### 2.6.3. AT-2 autotransformatoriaus pirmieji akustiniai matavimai

Toliau tuo pačiu principu atliekamas AT-2 autotransformatoriaus akustinių signalų registravimas ir gautų duomenų apdorojimas. Vadovaujantis matavimo taškų išdėstymo schemomis (25–26 pav.), kiekvienoje numatytoje vietoje pritvirtinamas ultragarsinis jutiklis ir registruojami akustiniai signalai. Surinkti duomenys iš „DOBLE DFA300“ įrangos peržiūrimi, o pirminiai rezultatai įvertinami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą.

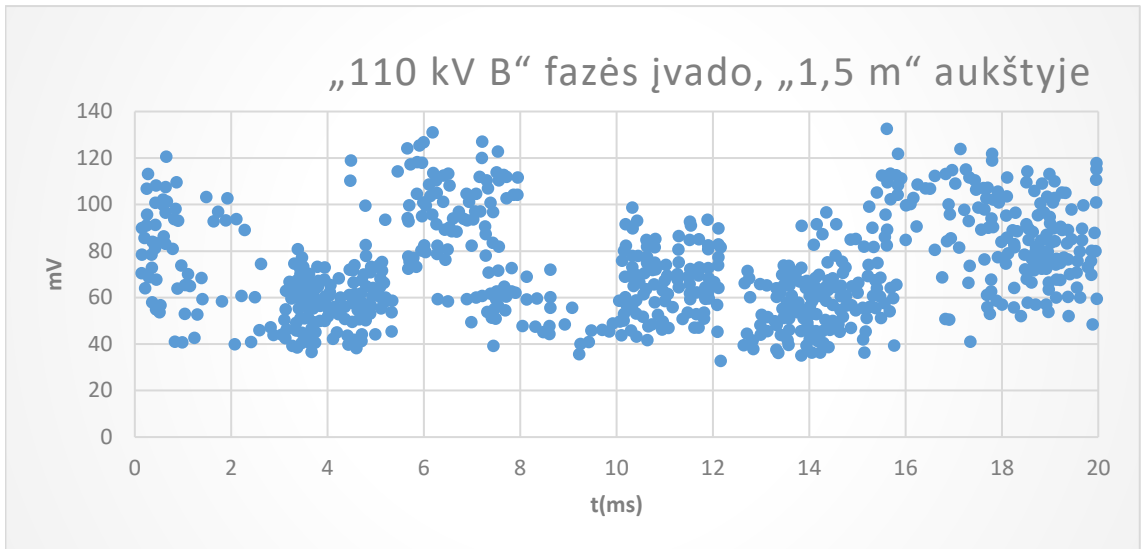
Kaip ir ankstesniuose tyrimo etapuose, iš visų užregistruotų rezultatų detalesnei analizei atrenkamos tos vietos, kuriose pastebimi ryškesni akustinių signalų nuokrypiai nuo įprastinių reikšmių. Šiame skyriuje iš karto pateikiami skaitmenizuoti atrinktų taškų grafikai, parengti tolesniam apdorojimui, analizei ir klasifikavimui. Likę protokolai, kuriuose reikšmingų užfiksuotų pikų ar kitų nuokrypių nenustatyta, pateikiami 2 priede.

Didžiausi vidinių dalinių išlydžių signalai užfiksuoti šiuose matavimo taškuose:

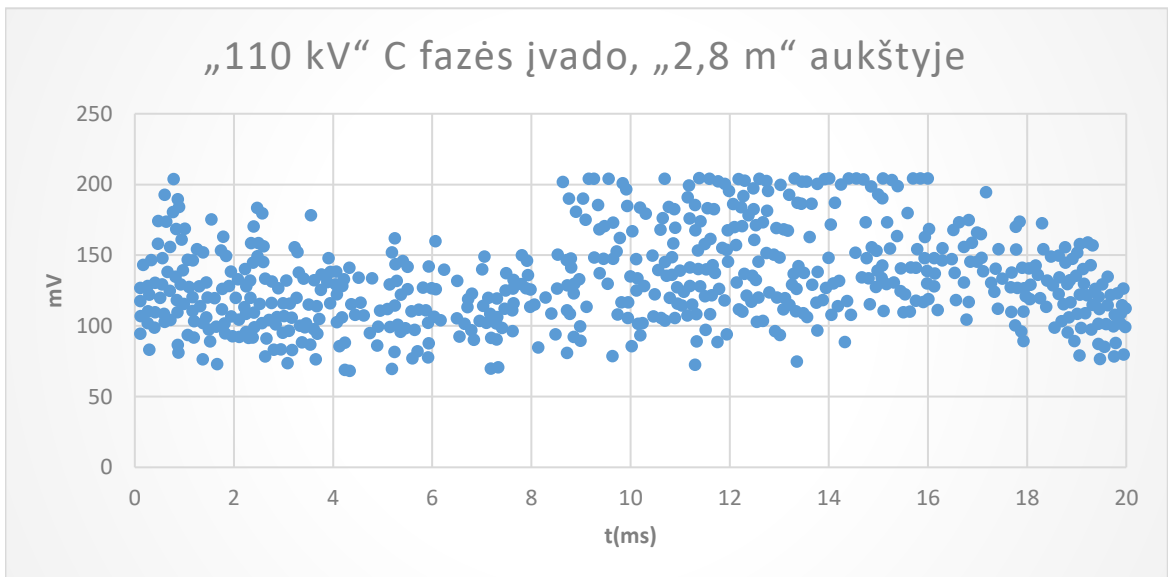
1. matavimo taške Nr. 4, prie 110 kV B fazės įvado, 2,8 m aukštyje – iki 135 mV;
2. matavimo taške Nr. 3, prie 110 kV B fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 120 mV;
3. matavimo taške Nr. 6, prie 110 kV C fazės įvado, 2,8 m aukštyje – iki 200 mV;
4. matavimo taške Nr. 5, prie 110 kV C fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 150 mV;
5. matavimo taške Nr. 17, atšakų perjungiklio pusėje, 110 kV krašte, 1,5 m aukštyje;
6. matavimo taške Nr. 18, atšakų perjungiklio pusėje, 110 kV krašte, 2,8 m aukštyje.



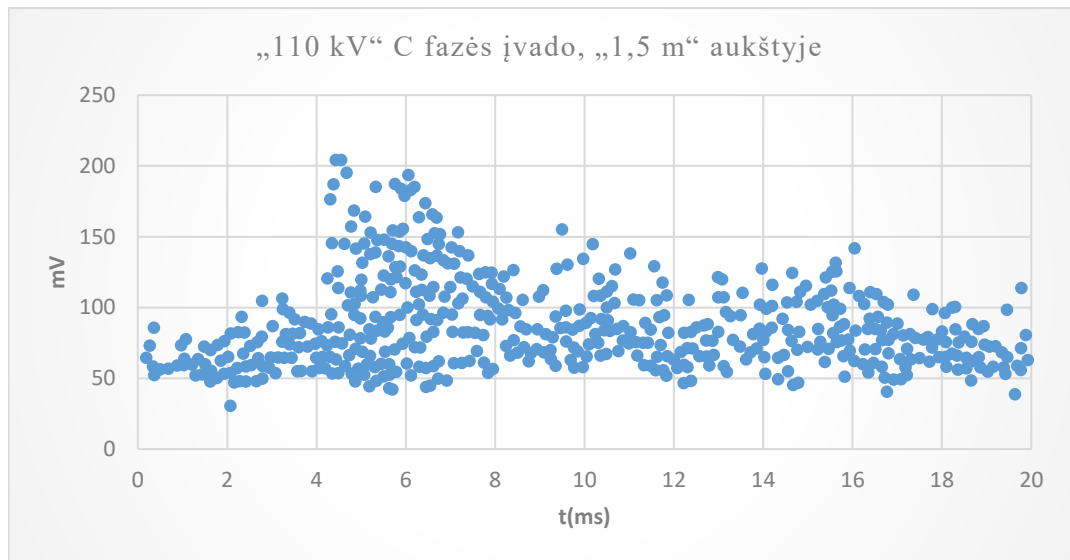
39 pav. Matavimo taškas Nr. 4



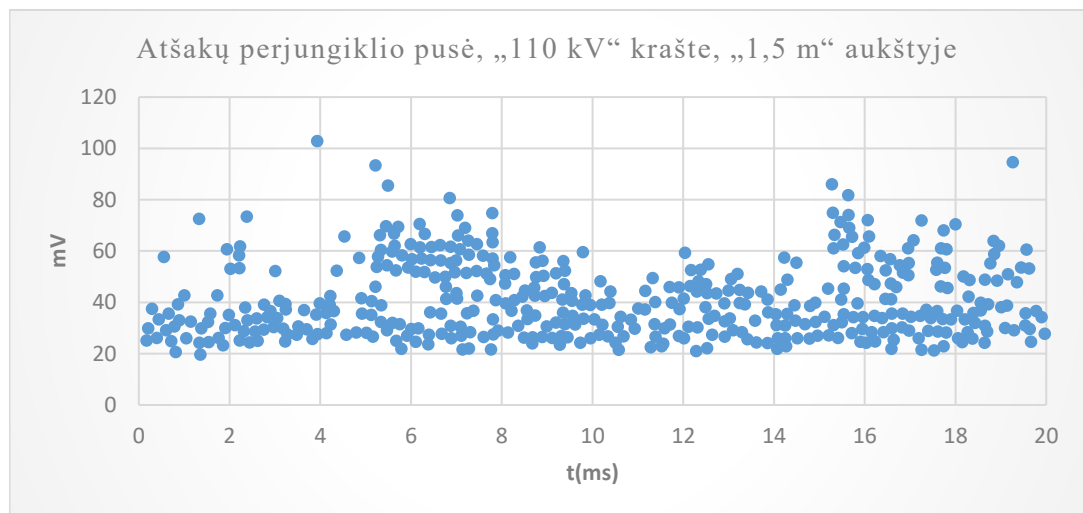
**40 pav.** Matavimo taškas Nr. 3



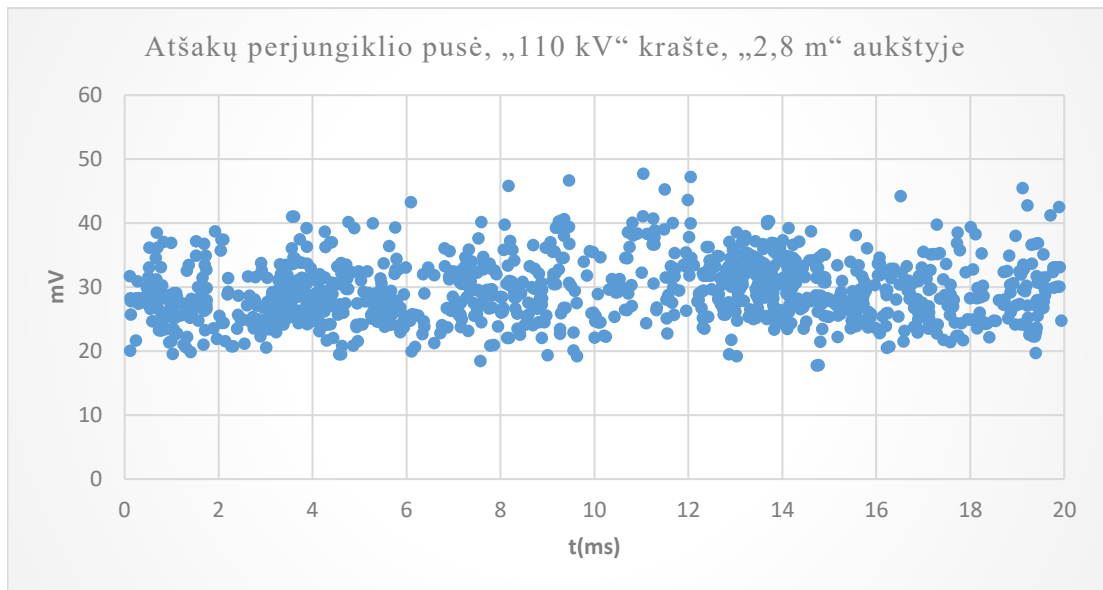
**41 pav.** Matavimo taškas Nr. 6



**42 pav.** Matavimo taškas Nr. 5



**43 pav.** Matavimo taškas Nr. 17



**44 pav.** Matavimo taškas Nr. 18

Vertinant AT-2 autotransformatoriaus akustinių matavimų rezultatus pagal dalinių išlydžių fazinio pasiskirstymo teoriją, matyti, kad ryškiausias aktyvumas užfiksuotas 110 kV C fazės įvado srityje, ypač matavimo taške Nr. 6, apie 2,8 m aukštyje. Šiame taške impulsų amplitudės siekia iki 200 mV, o jų pasiskirstymas nėra visiškai atsitiktinis – didesnis aktyvumas telkiasi tam tikrose 20 ms periodo dalyse, ypač apie 10–15 ms intervalą.

Reikšmingas aktyvumas taip pat matomas matavimo taške Nr. 5, 110 kV C fazės įvado srityje, apie 1,5 m aukštyje. Čia impulsai ryškiau susitelkia apie 5–8 ms intervalą, o tai rodo faziškai priklausomą akustinį aktyvumą. Taškai Nr. 4 ir Nr. 3, esantys 110 kV B fazės įvado srityje, taip pat pasižymi padidėjusiomis amplitudėmis, tačiau impulsų pasiskirstymas juose labiau išplitęs per kelias periodo sritis.

Atšakų perjungiklio pusėje labiau išsiskiria matavimo taškas Nr. 17, kuriame matomas impulsų pasikartojimas maždaug kas pusperiodį – apie 5–8 ms ir 15–17 ms. Toks pasiskirstymas gali būti siejamas su paviršinių arba sąsajos tipo dalinių išlydžių požymiais. Matavimo taške Nr. 18 signalai yra mažesnio intensyvumo ir tolygiau pasiskirstę, todėl šis taškas vertintinas kaip mažesnio prioriteto stebėjimo zona.

Apibendrinant galima teigti, kad pagal amplitudę ir impulsų fazinį pasiskirstymą pagrindinės AT-2 stebėtinos zonos yra 110 kV C fazės įvadas, ypač taškai Nr. 6 ir Nr. 5, taip pat 110 kV B fazės įvado taškai Nr. 4 ir Nr. 3. Atšakų perjungiklio pusėje papildomai išskirtinas taškas Nr. 17, kuriame impulsų pasiskirstymas labiausiai primena paviršinių arba sąsajos tipo dalinių išlydžių pobūdį.

#### **2.6.4. 400 kV šuntinio reaktoriaus pakartotiniai akustiniai matavimai**

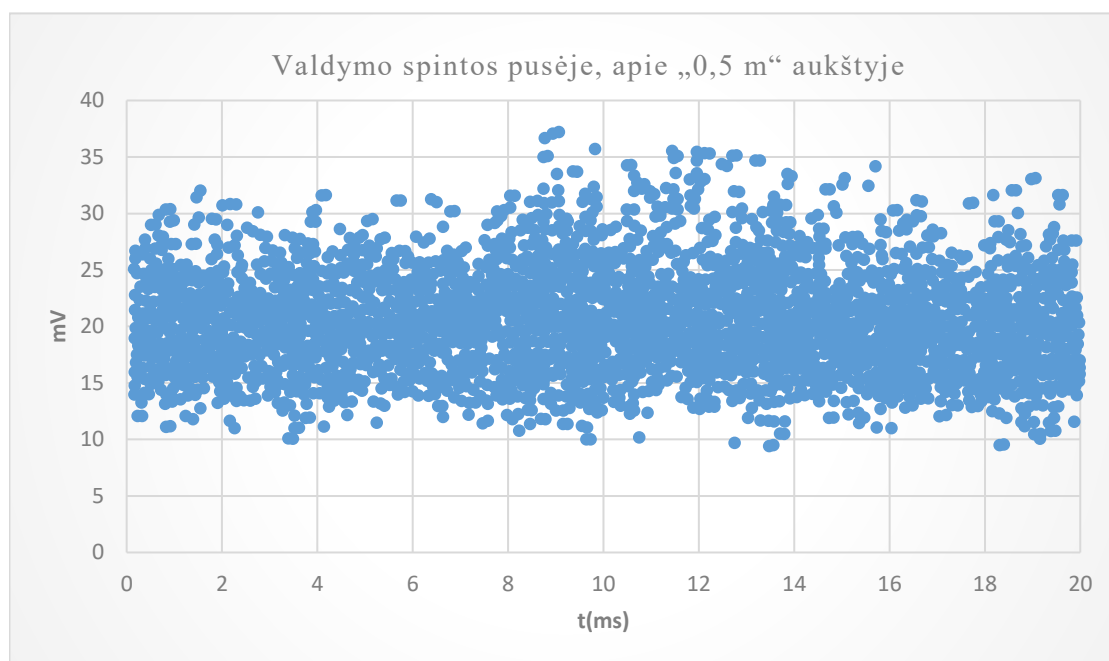
Toliau analogišku principu kaip ir ankstesniame 2.6.1 punkte atliekami pakartotiniai 400 kV šuntinio reaktoriaus akustiniai matavimai bei gautų duomenų apdorojimas. Vadovaujantis matavimo taškų išdėstymo schema (24 pav.), kiekviename numatyta taške pritvirtinamas ultragarsinis jutiklis ir registruojami akustiniai signalai. Nauji matavimų duomenys, gauti naudojant „DOUBLE DFA300“ įrangą, peržiūrimi, o pirminiai rezultatai įvertinami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą.

Kaip ir ankstesniame tyrimo etape, detalesnei analizei atrenkami tie matavimo taškai, kuriuose nustatyti ryškesni akustinių signalų nuokrypiai nuo įprastinių reikšmių arba užfiksuoti didesni dalinių išlydžių pikai. Šiame skyriuje pateikiami pakartotinių matavimų metu atrinktų taškų skaitmenizuoti grafikai, parengti tolesniam duomenų apdorojimui, analizei ir klasifikavimui. Matavimo protokolai, kuriuose reikšmingų dalinių išlydžių požymių ar kitų nuokrypių nenustatyta, pateikiami 5 priede.

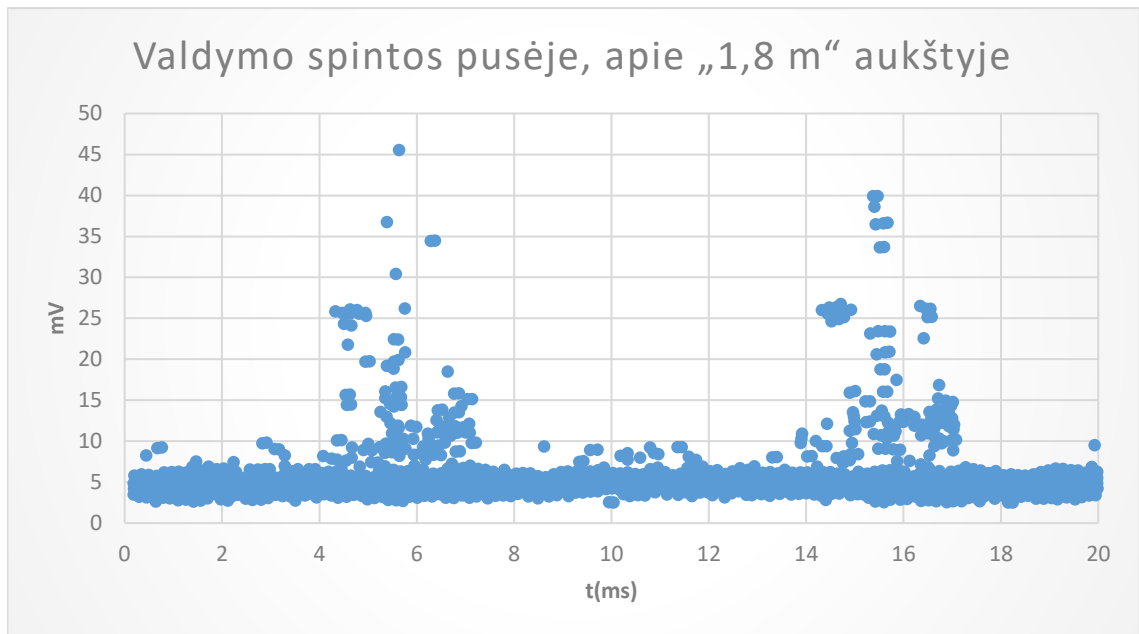
Iš 27–35 pav. matyti, kad didžiausi vidinių dalinių išlydžių signalai užregistruoti šiuose matavimo taškuose:

1. matavimo taške Nr. 7, valdymo spintos pusėje, apie 0,5 m aukštyje – iki 37 mV;
2. matavimo taške Nr. 8, valdymo spintos pusėje, apie 1,8 m aukštyje – iki 46 mV;
3. matavimo taške Nr. 9, neutralės pusėje, apie 0,5 m aukštyje – iki 10 mV;
4. matavimo taške Nr. 10, neutralės pusėje, apie 1,8 m aukštyje – iki 18 mV;
5. matavimo taške Nr. 3, prie 400 kV B fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 36 mV.

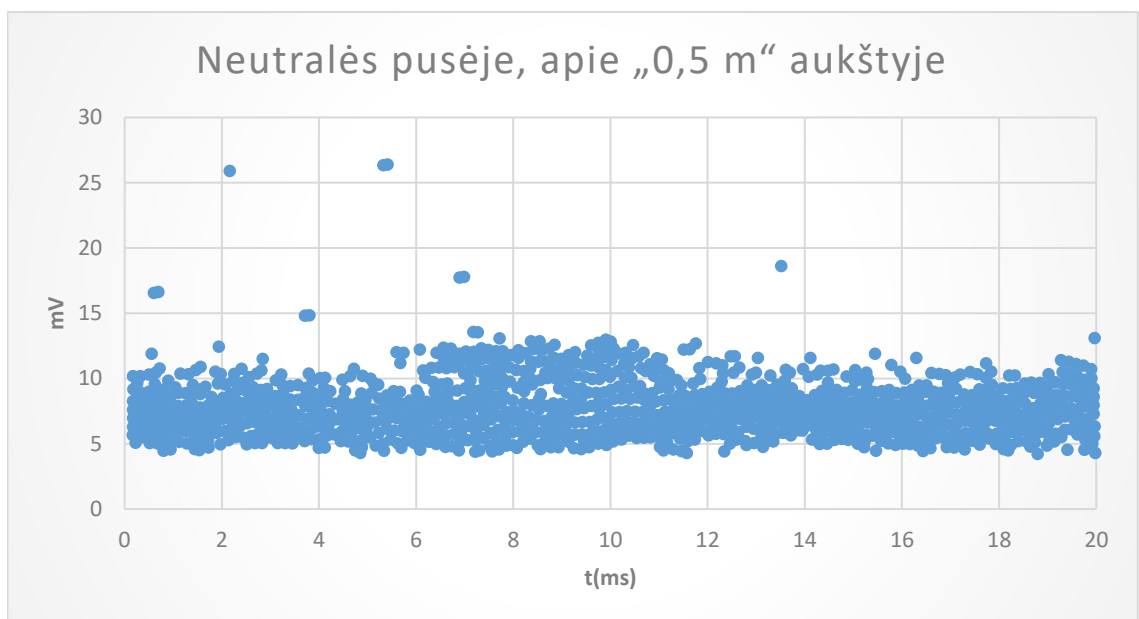
Tolesnei analizei šis duomenų formatas nėra pakankamai patogus, nes iš „PDViewer“ programinės įrangos eksportuoti grafikai pateikiami PDF formatu, o duomenims apdoroti, analizuoti ir klasifikuoti reikalingi PNG ir CSV formatai. Dėl šios priežasties buvo atliktas duomenų skaitmenizavimas.



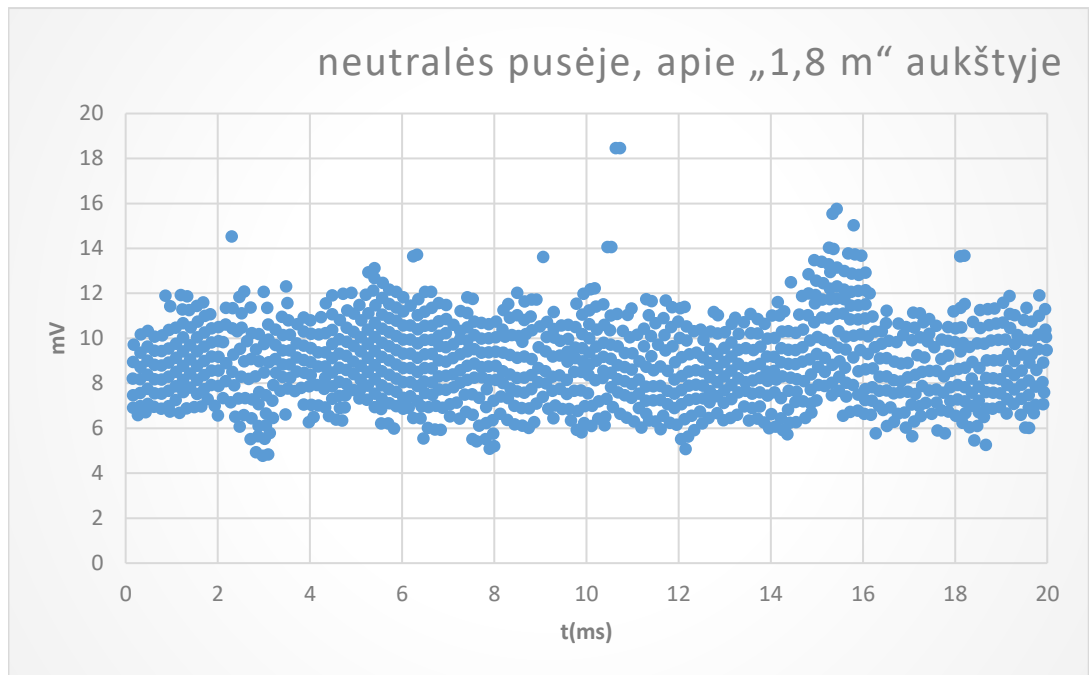
45 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 7



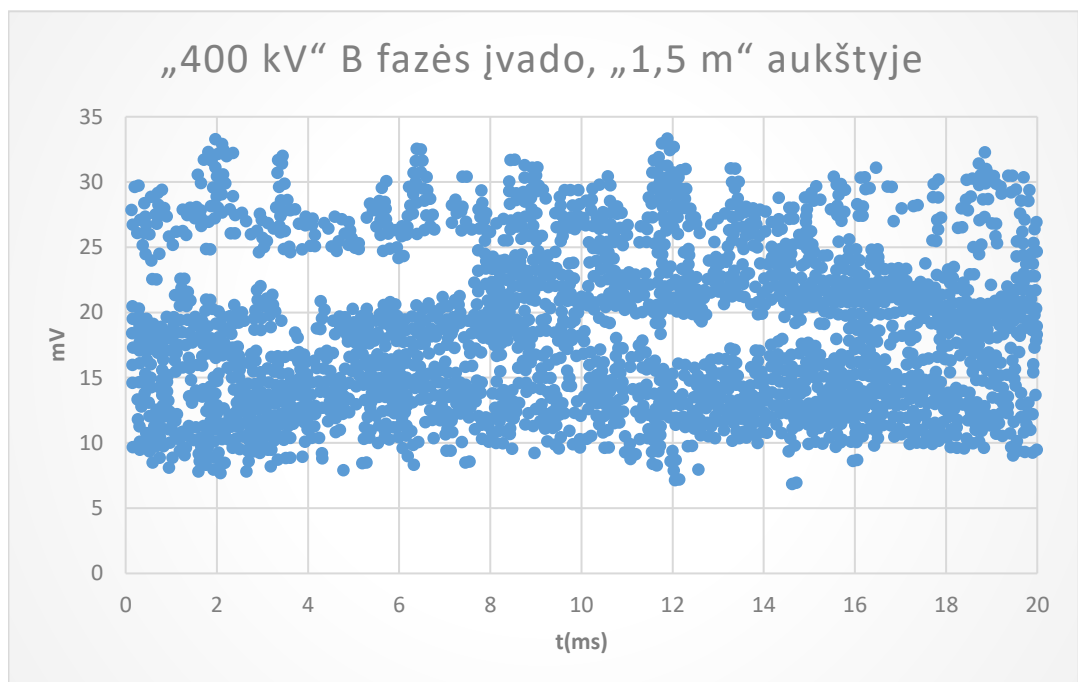
46 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 8



47 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 9



48 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 10



49 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 3

Vertinant 2025 m. gruodžio 13 d. pakartotinių akustinių matavimų rezultatus pagal 50 Hz periodo fazinį pasiskirstymą, matyti, kad daugumoje matavimo taškų impulsai nesudaro dviejų aiškių telkinių per vieną sinusoidės periodą. Kadangi vienas 50 Hz periodas atitinka 20 ms, impulsų pasiskirstymas grafikuose gali būti siejamas su fazės kampu: 0–5 ms atitinka I kvadrantą, 5–10 ms – II kvadrantą, 10–15 ms – III kvadrantą, o 15–20 ms – IV kvadrantą.

Ryškesniausiai pasikartojantis aktyvumas nustatytas matavimo taške Nr. 8, valdymo spintos pusėje, apie 1,8 m aukštyje. Šiame taške impulsų pikai telkiasi maždaug 5–7 ms ir 15–17 ms intervaluose, t. y.

pasikartoja kas pusperiodį. Toks pasiskirstymas gali būti siejamas su paviršinių arba sąsajos tipo dalinių išlydžių požymiais, nors užfiksuota amplitudė, palyginti su ankstesniais matavimais, yra sumažėjusi iki 46 mV.

Matavimo taške Nr. 7, valdymo spintos pusėje, apie 0,5 m aukštyje, signalai siekia iki 37 mV, tačiau impulsų sklaida yra gana tolygi per visą 20 ms periodą. Aiškių dviejų pasikartojančių fazinių telkinių šiame taške nepastebima, todėl šis aktyvumas labiau vertintinas kaip mažesnio intensyvumo arba foninis akustinis aktyvumas.

Neutralės pusėje, matavimo taškuose Nr. 9 ir Nr. 10, užfiksuotos reikšmės yra nedidelės – atitinkamai iki 10 mV ir 18 mV. Šiuose grafikuose impulsai pasiskirstę gana tolygiai, be aiškaus pasikartojimo I ir III arba II ir IV kvadrantuose. Pakartotinių matavimų metu neutralės viršįtampių ribotumas jau buvo pakeistas, todėl neutralės pusėje nebebuvo fiksuojamas toks didelis impulsinis aktyvumas kaip pirmųjų matavimų metu. Šis pokytis leidžia daryti prielaidą, kad pirmųjų matavimų metu neutralės zonoje nustatytas padidėjęs aktyvumas buvo susijęs su pažeistu neutralės viršįtampių ribotuvu. Todėl pagal fazinį pasiskirstymą reikšmingų dalinių išlydžių požymių šiuose taškuose pakartotiniuose matavimuose nenustatyta.

Papildomai išskirtas matavimo taškas Nr. 3, esantis 400 kV B fazės įvado srityje, apie 1,5 m aukštyje, kuriame reikšmės siekia iki 36 mV. Šiame taške impulsai išsidėstę per visą periodą, tačiau aiškaus dviejų fazinių telkinių pasikartojimo nematyti. Todėl šis taškas vertintinas kaip stebėtinas, bet ne kaip pagrindinė dalinių išlydžių aktyvumo zona.

Apibendrinant galima teigti, kad pakartotinių matavimų metu reikšmingiausias stebėtinas taškas yra Nr. 8, nes jame matomas impulsų pasikartojimas atskirose sinusoidės periodo dalyse. Vis dėlto bendras dalinių išlydžių aktyvumo lygis, palyginti su ankstesniais matavimais, yra sumažėjęs. Taškuose Nr. 7, Nr. 9, Nr. 10 ir Nr. 3 užfiksuoti signalai yra mažesnio intensyvumo ir neturi aiškaus fazinio pasiskirstymo.

#### **2.6.5. AT-1 autotransformatoriaus pakartotiniai akustiniai matavimai**

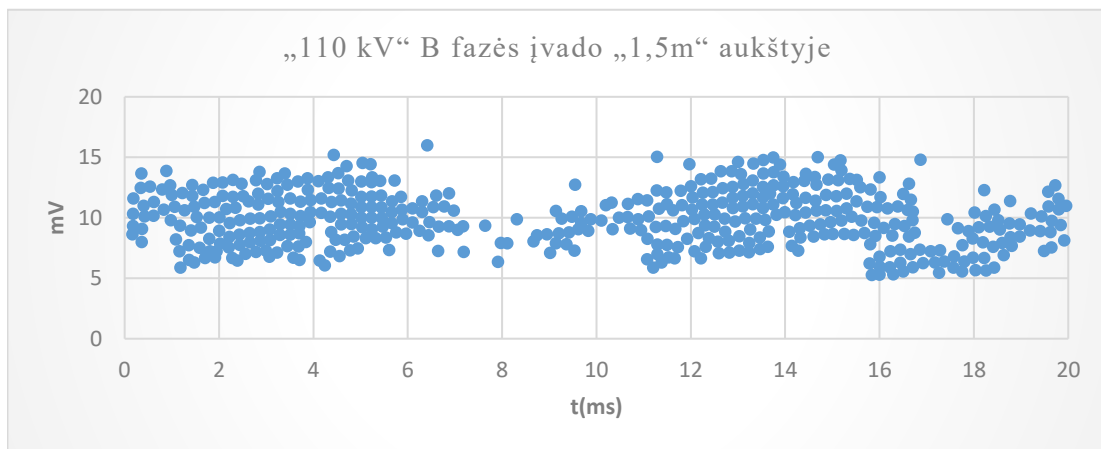
Toliau analogišku principu kaip ir 2.6.2 punkte atliekami pakartotiniai AT-1 autotransformatoriaus akustiniai matavimai bei gautų duomenų apdorojimas. Vadovaujantis matavimo taškų išdėstymo schemomis (25–26 pav.), kiekviename numatytame taške pritvirtinamas ultragarsinis jutiklis ir registruojami akustiniai signalai. Nauji matavimų duomenys, gauti naudojant „DOUBLE DFA300“ įrangą, peržiūrėti, o pirminiai rezultatai įvertinami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą.

Kaip ir ankstesniame tyrimo etape, detalesnei analizei atrenkami tie matavimo taškai, kuriuose nustatyti ryškesni akustinių signalų nuokrypiai nuo įprastinių reikšmių arba užfiksuoti didesni dalinių išlydžių pikai. Šiame skyriuje pateikiami pakartotinių matavimų metu atrinktų taškų skaitmenizuoti grafikai, parengti tolesniam duomenų apdorojimui, analizei ir klasifikavimui. Matavimo protokolai, kuriuose reikšmingų dalinių išlydžių požymių ar kitų nuokrypių nenustatyta, pateikiami 4 priede.

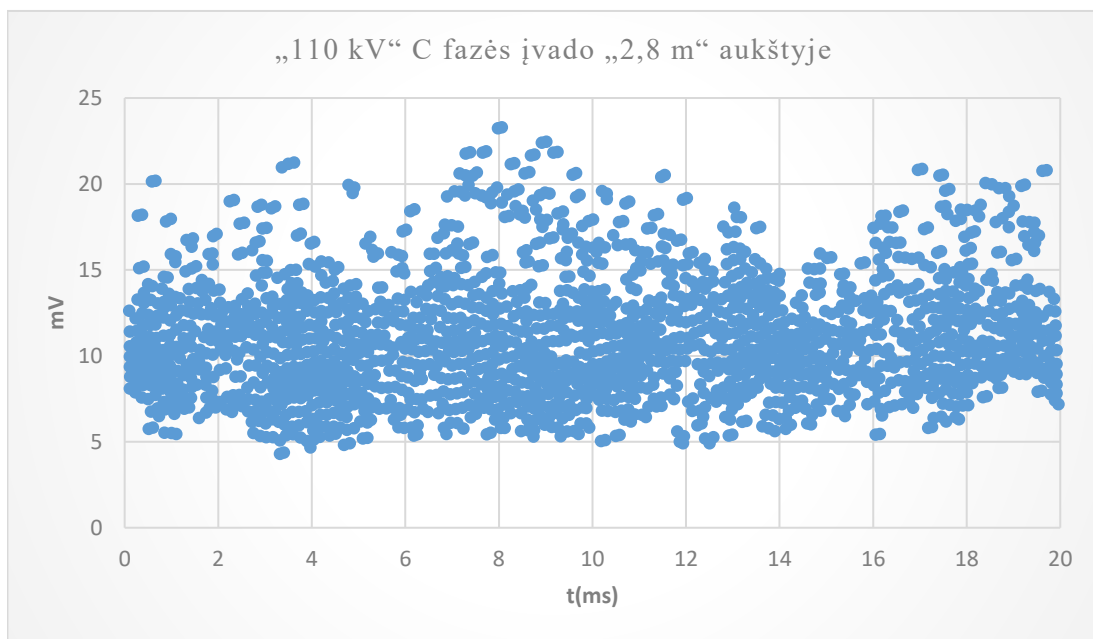
Iš 36–47 pav. matyti, kad didžiausi vidinių dalinių išlydžių signalai užregistruoti šiuose matavimo taškuose:

1. matavimo taške Nr. 13, prie 110 kV B fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 16 mV;
2. matavimo taške Nr. 12, prie 110 kV C fazės įvado, 2,8 m aukštyje – iki 25 mV;
3. matavimo taške Nr. 11, prie 110 kV C fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 25 mV;

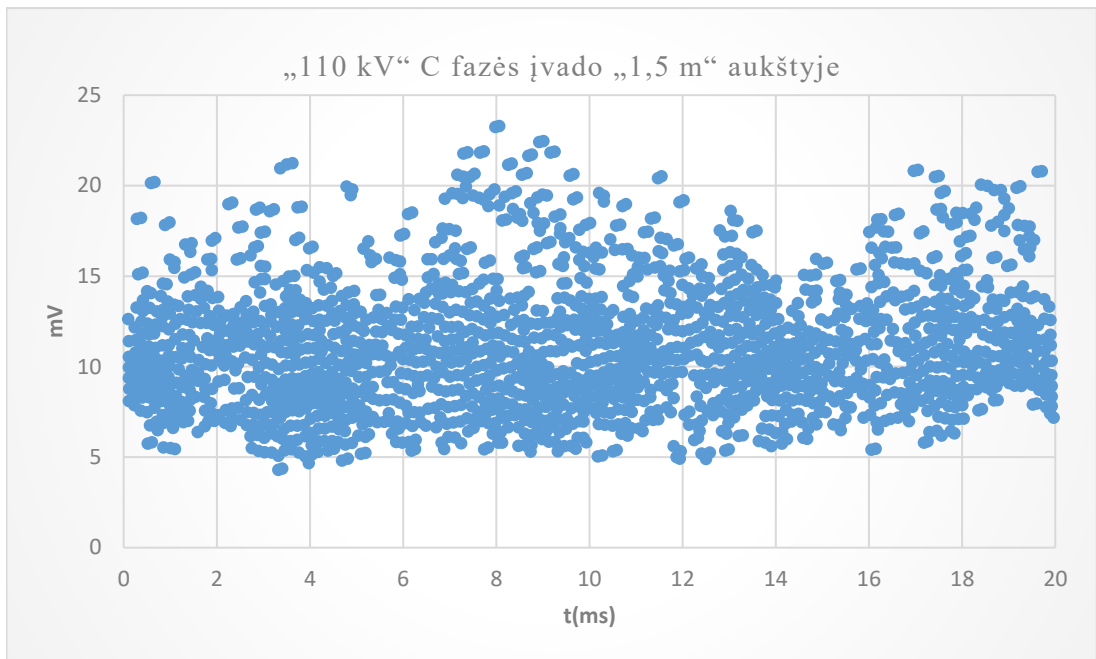
4. matavimo taške Nr. 1, prie 330 kV A fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 100 mV;
5. matavimo taške Nr. 6, prie 330 kV C fazės įvado, 2,8 m aukštyje – iki 25 mV;
6. matavimo taške Nr. 18, atšakų perjungiklio pusėje, 110 kV krašte, 2,8 m aukštyje – iki 75 mV.



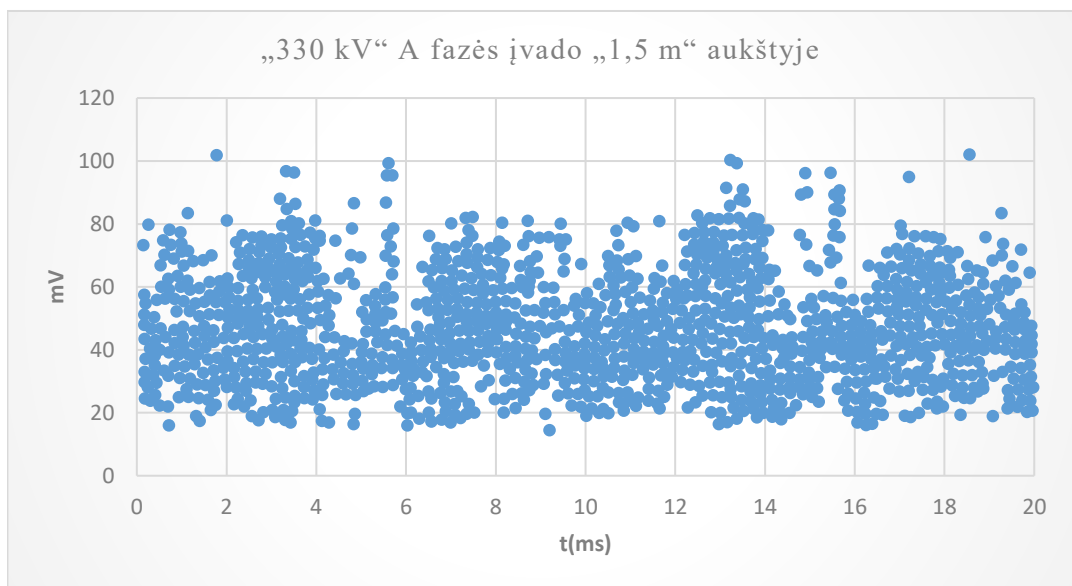
**50 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 13



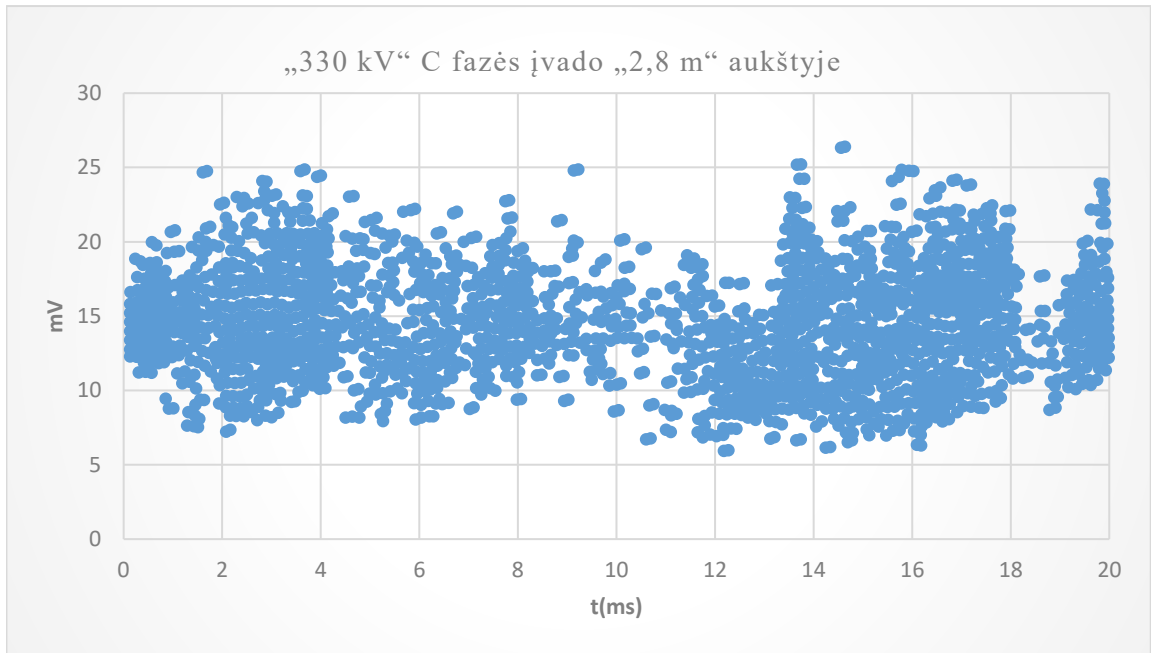
**51 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 12



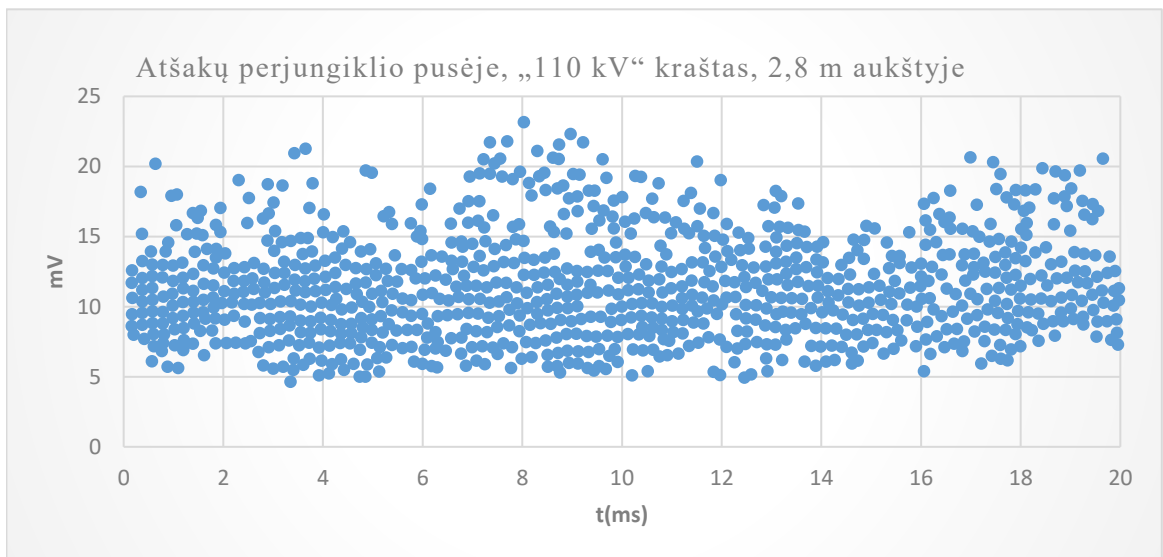
52 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 11



53 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 1



**54 pav.** Matavimo taškas Nr. 6



**55 pav.** Matavimo taškas Nr. 18

Vertinant dalinių išlydžių impulsų pasiskirstymą per 20 ms periodą, matyti, kad daugumoje matavimo taškų signalai pasiskirstę gana tolygiai per visą sinusoidės periodą. Ryškiausias aktyvumas nustatytas matavimo taške Nr. 1, kuriame impulsai fiksuojami visame 0–20 ms intervale, o amplitudės siekia iki 100 mV. Vis dėlto šiame taške impulsai nėra aiškiai susitelkę tik į du fazinius telkinius, todėl pagal 20 ms periodo analizę aktyvumas vertintinas kaip plačiai pasiskirstęs.

Matavimo taškuose Nr. 12 ir Nr. 11 impulsai taip pat pasiskirstę gana tolygiai, be aiškaus fazinio pasikartojimo. Tačiau matavimo taške Nr. 13, prie 110 kV B fazės įvado, 1,5 m aukštyje, pastebimas silpnas fazinis pasikartojimas: impulsų telkiniai ryškiau matomi 0–5 ms ir 10–15 ms intervaluose, t. y. I ir III kvadratuose. Toks pasiskirstymas gali rodyti silpną paviršinio arba sąsajos tipo dalinių išlydžių požymį, tačiau dėl mažos amplitudės, siekiančios tik iki 16 mV, šis taškas vertintinas kaip stebėtinai, bet ne kaip pagrindinis dalinių išlydžių šaltinis.

Matavimo taškuose Nr. 6 ir Nr. 18 pastebimas nežymus aktyvumo padidėjimas atskirose periodo dalyse, tačiau amplitudės nėra didelės, todėl šie taškai vertintini kaip stebėtini, bet ne kaip aiškiai išreikšti paviršinio ar sąsajos tipo dalinių išlydžių šaltiniai.

Apibendrinant galima teigti, kad atliktų matavimų rezultatai nerodo ryškaus dviejų fazinių telkinių susiformavimo, būdingo aiškiems daliniams išlydžiams. Pagrindinė stebėtina vieta išlieka matavimo taškas Nr. 1, tačiau jo aktyvumas pasiskirstęs plačiai per visą periodą. Papildomai stebėtinas matavimo taškas Nr. 13, kuriame, nepaisant mažos amplitudės, matomas pasikartojantis impulsų aktyvumas I ir III kvadratuose.

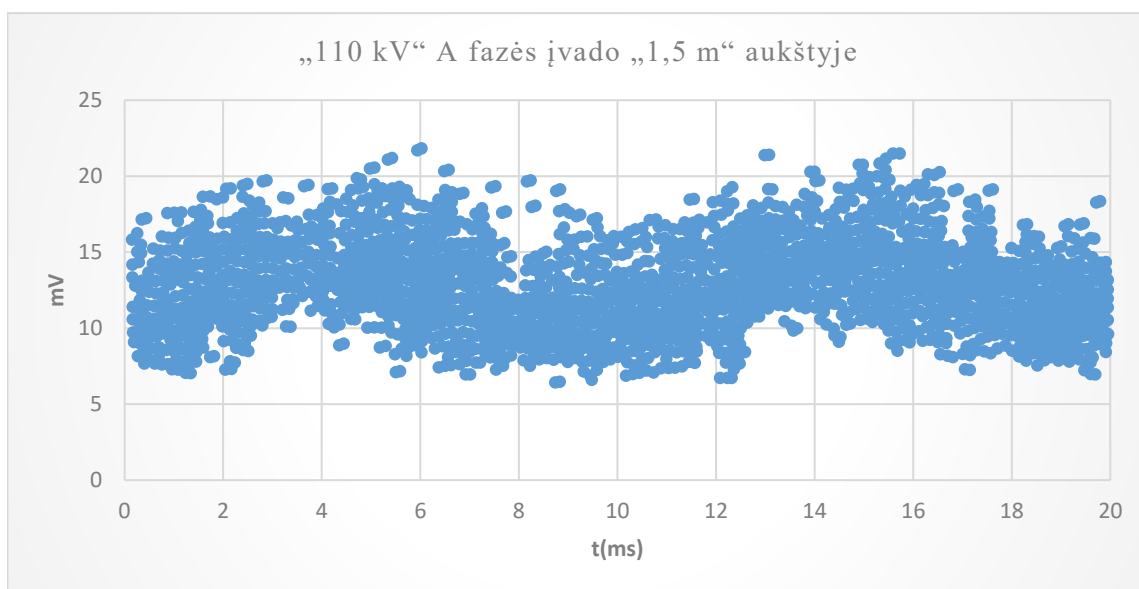
### 2.6.6. AT-2 autotransformatoriaus pakartotiniai akustiniai matavimai

Toliau analogišku principu kaip ir 2.6.3 punkte atliekami pakartotiniai AT-2 autotransformatoriaus akustiniai matavimai bei gautų duomenų apdorojimas. Vadovaujantis matavimo taškų išdėstymo schemomis (25–26 pav.), kiekviename numatytame taške pritvirtinamas ultragarsinis jutiklis ir registruojami akustiniai signalai. Nauji matavimų duomenys, gauti naudojant „DOBLE DFA300“ įrangą, peržiūrimi, o pirminiai rezultatai įvertinami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą.

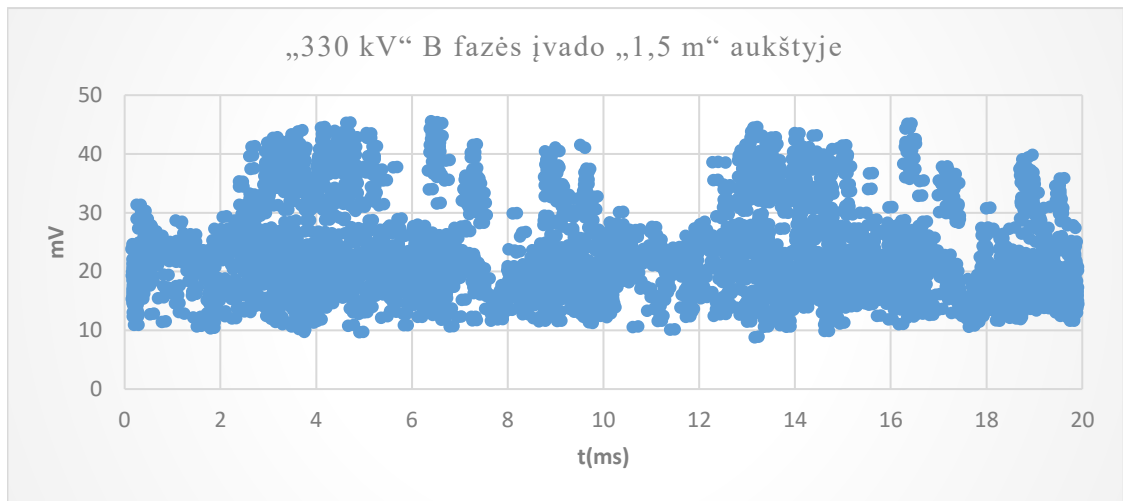
Kaip ir ankstesniame tyrimo etape, detalesnei analizei atrenkami tie matavimo taškai, kuriuose nustatyti ryškesni akustinių signalų nuokrypiai nuo įprastinių reikšmių arba užfiksuoti didesni dalinių išlydžių pikai. Šiame skyriuje pateikiami pakartotinių matavimų metu atrinktų taškų skaitmenizuoti grafikai, parengti tolesniam duomenų apdorojimui, analizei ir klasifikavimui. Matavimo protokolai, kuriuose reikšmingų dalinių išlydžių požymių ar kitų nuokrypių nenustatyta, pateikiami 4 priede.

Iš 82–89 pav. matyti, kad didžiausi vidinių dalinių išlydžių signalai užregistruoti šiuose matavimo taškuose:

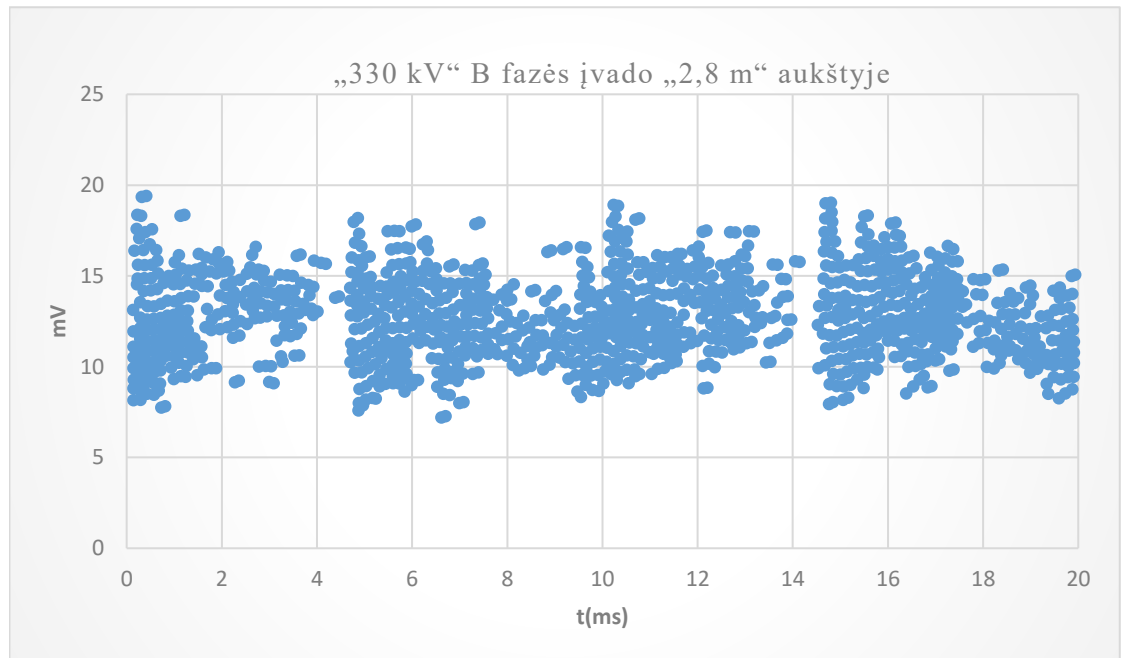
1. matavimo taške Nr. 11, prie 110 kV A fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 23 mV;
2. matavimo taške Nr. 3, prie 330 kV B fazės įvado, 1,5 m aukštyje – iki 47 mV;
3. matavimo taške Nr. 4, prie 330 kV B fazės įvado, 2,8 m aukštyje – iki 20 mV;
4. matavimo taške Nr. 18, atšakų perjungiklio pusėje, 110 kV krašte, 2,8 m aukštyje – iki 45 mV.



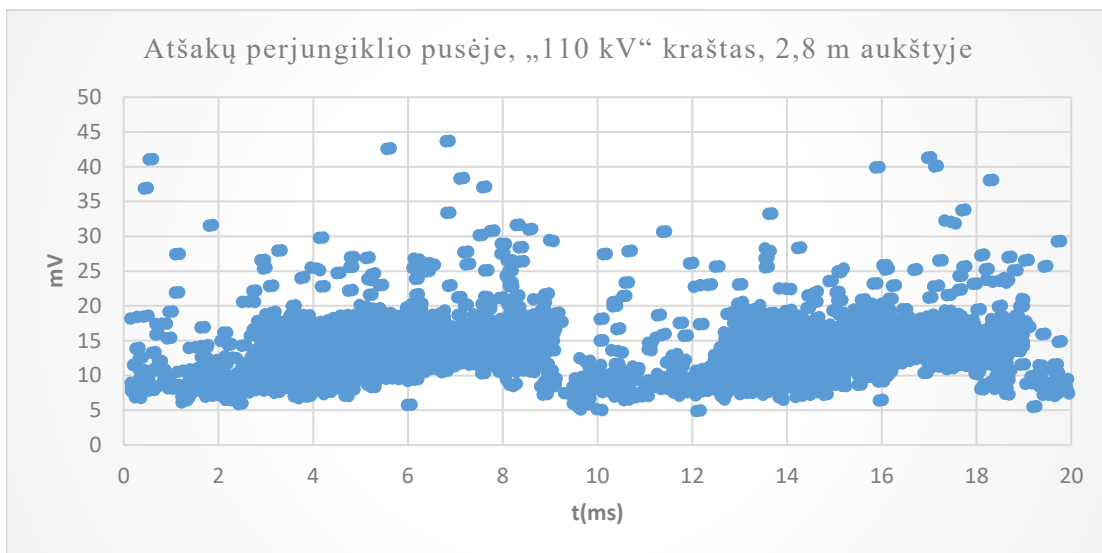
56 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 11



57 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 3



58 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 4



**59 pav.** Skaitmenizuotas matavimo taškas Nr. 18

Vertinant atliktų matavimų dalinių išlydžių impulsų pasiskirstymą per 20 ms periodą, matyti, kad ryškiausias fazinis pasikartojimas užfiksuotas matavimo taškuose Nr. 3 ir Nr. 18. Kadangi vienas 50 Hz periodas atitinka 20 ms, impulsų telkiniai, pasikartojantys maždaug kas 10 ms, gali būti siejami su faziškai priklausomu dalinių išlydžių aktyvumu.

Matavimo taške Nr. 3, prie 330 kV B fazės įvado, 1,5 m aukštyje, užfiksuota didžiausia reikšmė – iki 47 mV. Grafike matomi ryškesni impulsų telkiniai apie 3–5 ms ir 13–15 ms intervaluose. Toks pasikartojimas kas pusperiodį gali būti būdingas paviršiniams arba sąsajos tipo daliniams išlydžiams, todėl šis taškas vertintinas kaip pagrindinė stebėtina zona.

Matavimo taške Nr. 18, atšakų perjungiklio pusėje, 110 kV krašte, 2,8 m aukštyje, signalai siekia iki 45 mV. Šiame grafike taip pat matomi du platesni aktyvumo telkiniai – maždaug 2–8 ms ir 12–18 ms intervaluose. Tai rodo pasikartojantį aktyvumą kas pusperiodį, todėl šis taškas taip pat laikytinas reikšmingu stebėsenai.

Matavimo taške Nr. 11, prie 110 kV A fazės įvado, 1,5 m aukštyje, amplitudės siekia iki 23 mV. Nors grafike pastebimas silpnas pasikartojimas apie 3–6 ms ir 13–16 ms, dėl mažos amplitudės šis aktyvumas vertintinas kaip nedidelio intensyvumo.

Matavimo taške Nr. 4, prie 330 kV B fazės įvado, 2,8 m aukštyje, signalai siekia iki 20 mV ir yra gana tolygiai pasiskirstę per visą 20 ms periodą. Aiškiaus dviejų fazinių telkinių susiformavimo šiame taške nematyti, todėl jis vertintinas kaip mažesnio prioriteto stebėjimo zona.

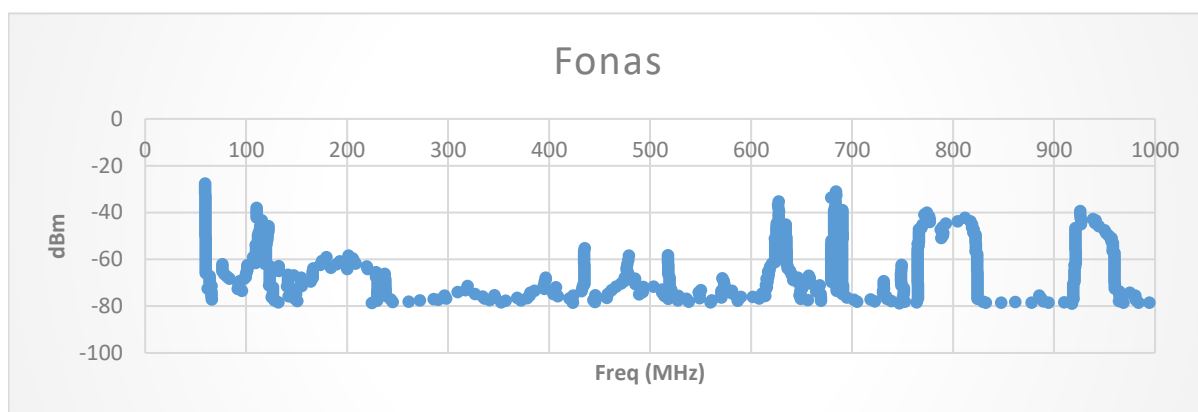
Apibendrinant galima teigti, kad pagal 20 ms periodo analizę labiausiai išsiskiria matavimo taškai Nr. 3 ir Nr. 18, kuriuose impulsai pasikartoja maždaug kas pusperiodį. Tai gali rodyti paviršinių arba sąsajos tipo dalinių išlydžių požymius, tačiau galutinei klasifikacijai atlikti reikėtų faziškai sinchronizuotų PRPD matavimų.

## 2.6.7. 400 kV šuntinio reaktoriaus RFI matavimai

Matavimus atlikus „DOBLE DFA300“ įranga, gauti duomenys buvo pateikti ir analizuojami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą. Ši programinė įranga leidžia efektyviai peržiūrėti, redaguoti ir eksportuoti matavimo duomenis į įvairius ataskaitų formatus.

Prieš pradėdant RFI matavimus, naudojant „DOBLE DFA300“ įrangą, būtina atlikti aplinkos fono matavimą. Aplinkos fono matavimai leidžia nustatyti ir įvertinti galimus išorinius trikdžius, kurie gali būti klaidingai interpretuojami kaip daliniai išlydžiai. Atliekant šį etapą taip pat sukalibruojama įranga, nustatomos matavimo ribos, paklaidos ir mastelis. Todėl fono matavimai yra būtini siekiant užtikrinti teisingą ir patikimą dalinių išlydžių analizę bei išvengti klaidingų išvadų dėl neteisingai identifikuoatų signalų.

Vadovaujantis matavimo taškų išdėstymo schema (24 pav.), matavimai buvo atliekami kiekviename numatytae taške. Iš viso atlikta 10 matavimų. Toliau darbe detaliau analizuojami tik tie matavimo taškai, kuriuose pastebėti reikšmingesni akustinių parametrų nuokrypiai nuo įprastinių reikšmių. Kiti matavimo protokolai, kuriuose reikšmingų nuokrypių nenustatyta, pateikiami 7 priede.

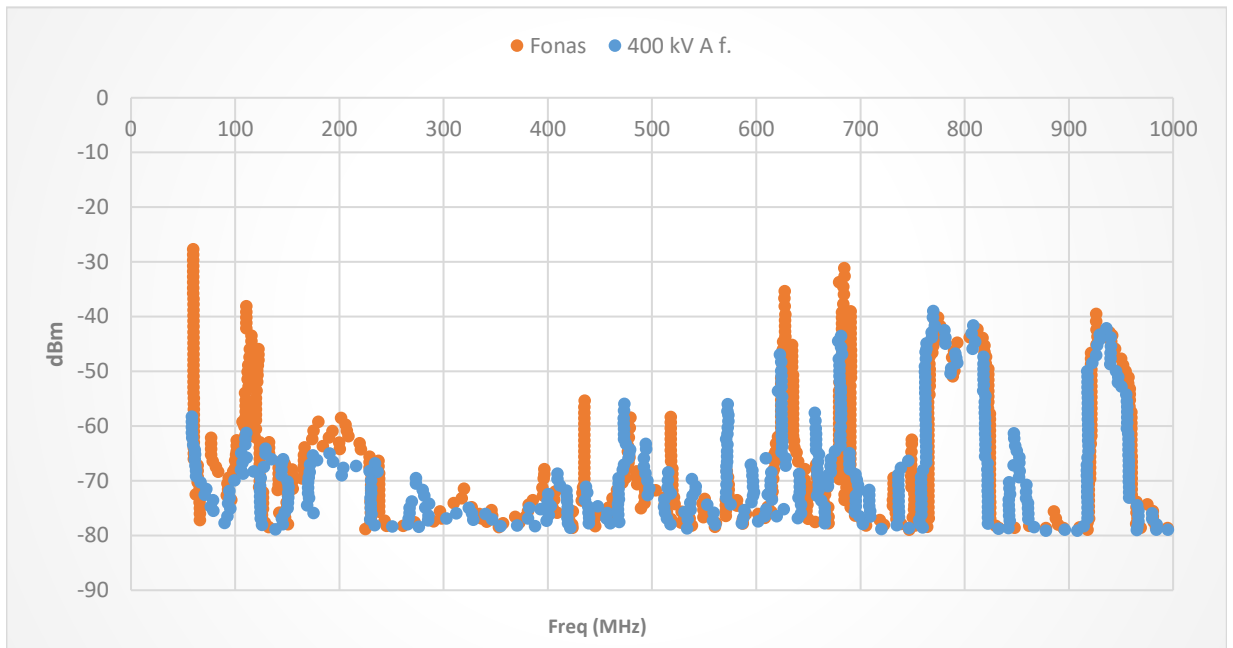


60 pav. Skaitymenizuotas šuntinio reaktoriaus aplinkos fonas

Iš 90 pav. matyti, kad matavimo aplinkoje fiksuojamas foninis elektromagnetinis triukšmas, kurio lygis skirtinguose dažnių ruožuose nėra vienodas. Spektre pastebimos atskiros padidėjusio signalo lygio smailės, kurios gali būti susijusios ne su šuntinio reaktoriaus defektais, o su aplinkoje veikiančiais radijo ryšio ir transliavimo šaltiniais. Žemesniame dažnių ruože, apie 87,5–108 MHz, smailės gali būti siejamos su FM radijo transliacijomis. 470–694 MHz diapazone galimi skaitmeninės antžeminės televizijos siųstuvų signalai, o 700–900 MHz ruože fiksuojami padidėjimai gali būti susiję su mobiliojo ryšio sistemomis, įskaitant 4G ir 5G tinkluose naudojamus dažnių ruožus. Kiti galimi foninio triukšmo šaltiniai gali būti vietiniai ryšio siųstuvai, apsaugos ar valdymo įranga, matavimo įrangos savasis triukšmas bei kiti netoliese veikiančys elektroniniai įrenginiai. Todėl šis fono matavimas yra svarbus kaip atskaitinis spektras, leidžiantis vėliau atskirti aplinkos triukšmą nuo galimų tiriamo šuntinio reaktoriaus skleidžiamų signalų.

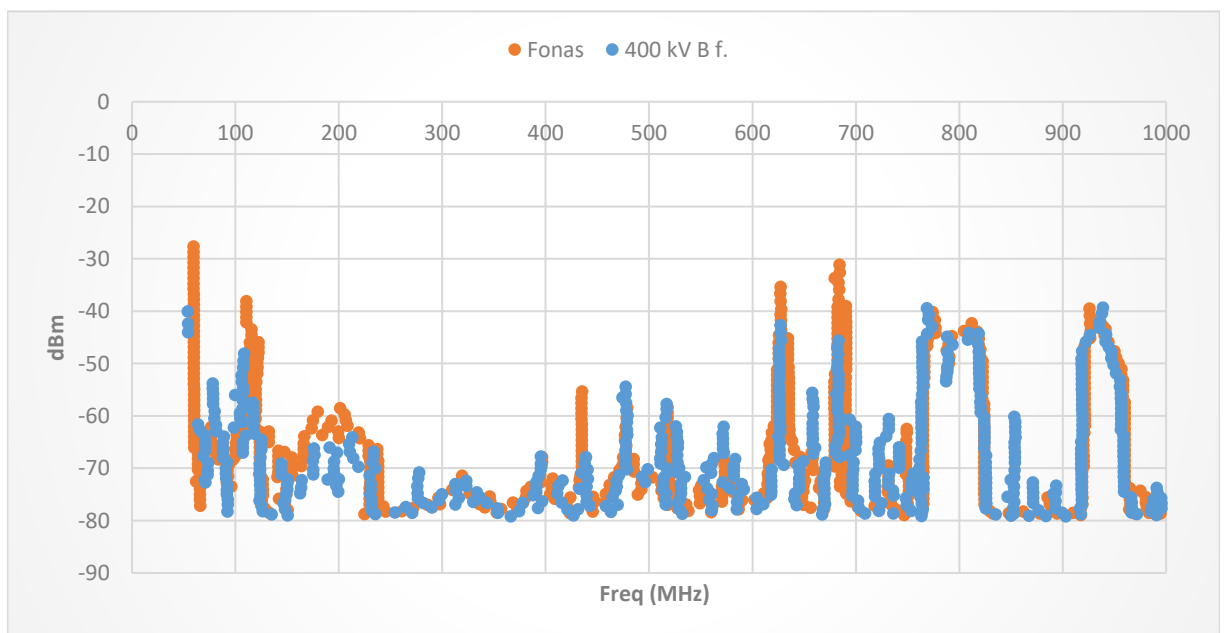
Dėl šios priežasties, vertinant šuntinio reaktoriaus matavimų rezultatus, būtina lyginti juos su fono spektru ir nevertinti aplinkos radijo signalų kaip įrenginio defektų požymių.

400 kV A fazės signalas didžiojoje spektro dalyje sutampa su foniniu lygiu. Ryškesni padidėjimai pastebimi aukštesnių dažnių srityje, tačiau panašios smailės matomos ir aplinkos fone. Dėl šios priežasties galima teigti, kad šie signalai labiau sietini su išoriniais elektromagnetiniais šaltiniais, o ne su aiškiais A fazės defektų požymiais.



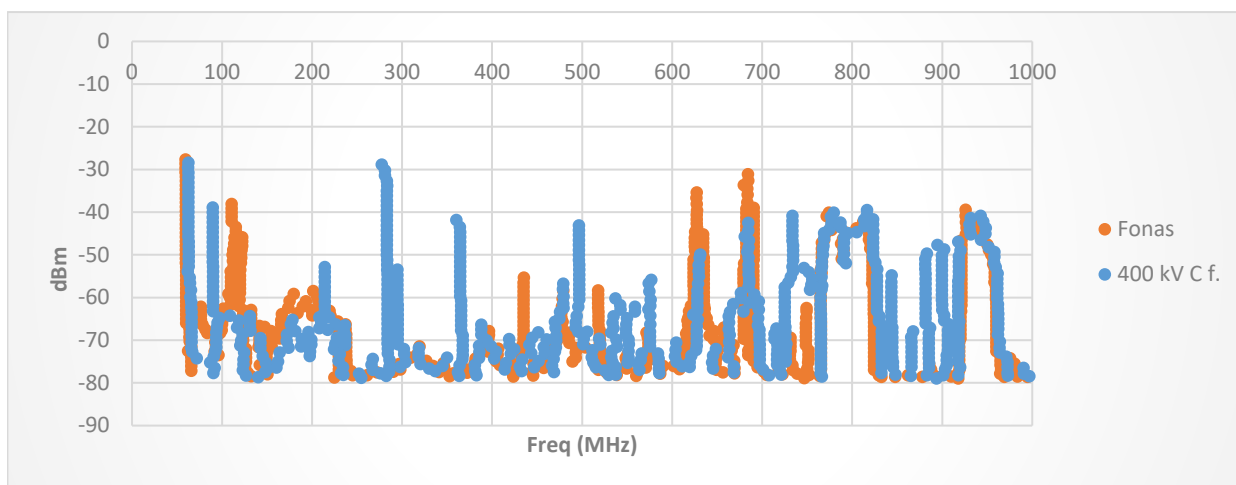
61 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas 6 400 kV A fazė

400 kV B fazės matavimo rezultatuose taip pat matyti, kad signalas aiškiai neatsiskiria nuo fono. Nors kai kuriuose dažnių ruožuose pastebimi padidėję signalų lygiai, jų pobūdis ir dažninė padėtis iš esmės atitinka foninio triukšmo spektrą. Todėl pagal šį matavimą nėra pagrindo teigti, kad B fazėje pasireiškia dalinių išlydžių požymiai.



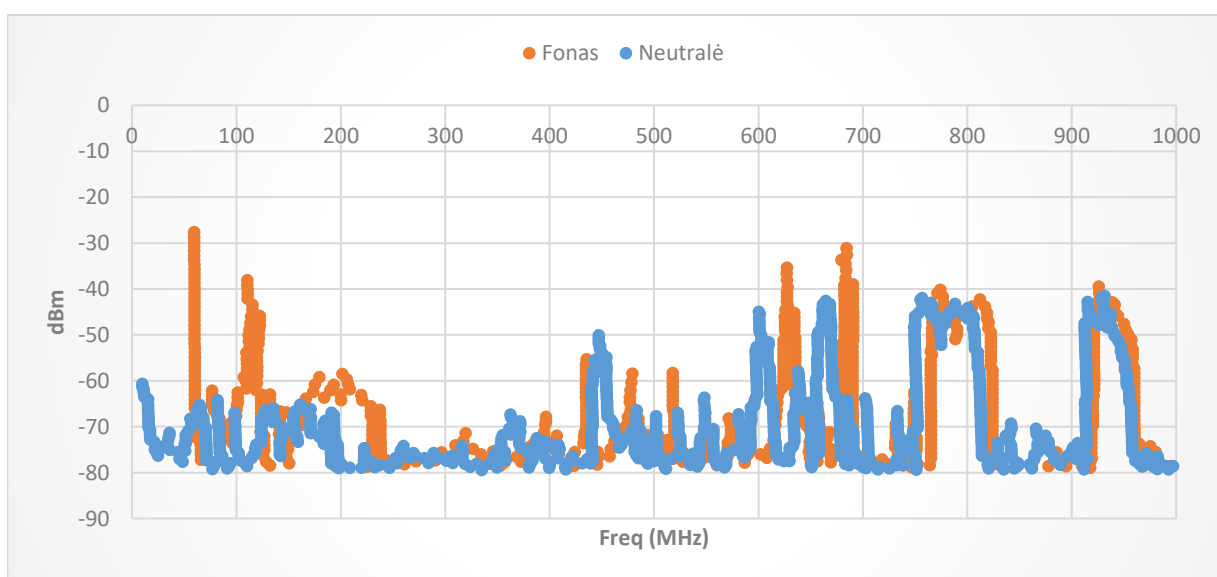
62 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas 4 400 kV B fazė

400 kV C fazės signalo skirtumas nuo aplinkos fono labiausiai išryškėja maždaug 200–300 MHz, 350–380 MHz, 480–500 MHz, 560–610 MHz ir 730–900 MHz dažnių ruožuose. Ryškiausi nuokrypiai pastebimi 200–300 MHz intervale, kuriame C fazės signalas aiškiai viršija foninį lygį.



63 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas 2 400 kV C fazė

Neutralėje išmatuotas signalas daugelyje dažnių ruožų taip pat išlieka artimas aplinkos fonui. Kai kuriose spektro vietose pastebimi padidėjimai, tačiau jie nėra pakankamai ryškūs ir nuoseklūs, kad juos būtų galima patikimai priskirti daliniams išlydžiams. Neutralės matavimai šiuo atveju padeda įvertinti bendrą elektromagnetinio fono įtaką matavimo rezultatams.

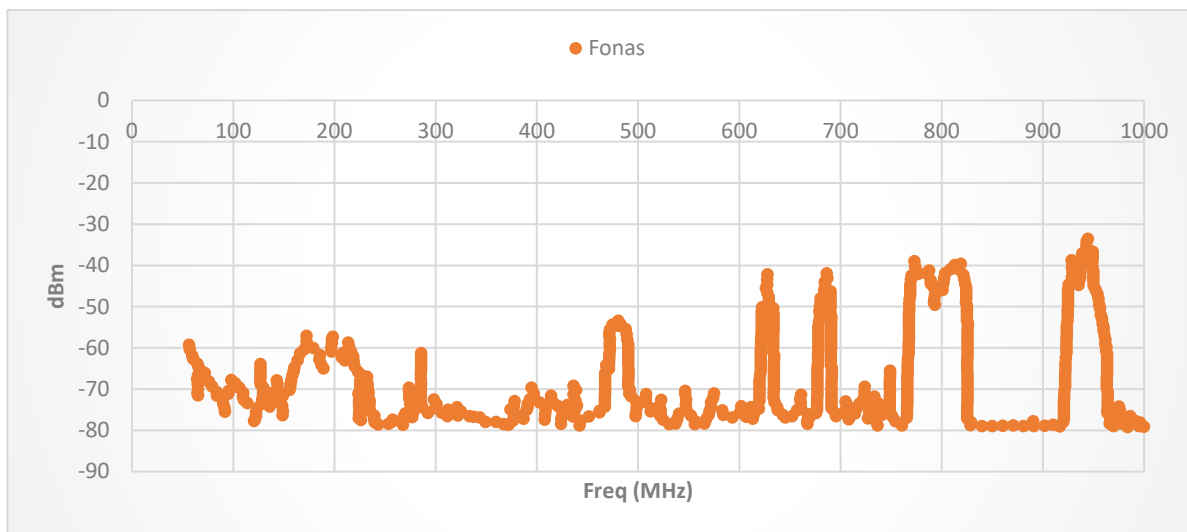


64 pav. Skaitmenizuotas matavimo taškas 10 400 kV neutralė

### 2.6.8. AT-1 autotransformatoriaus RFI matavimai

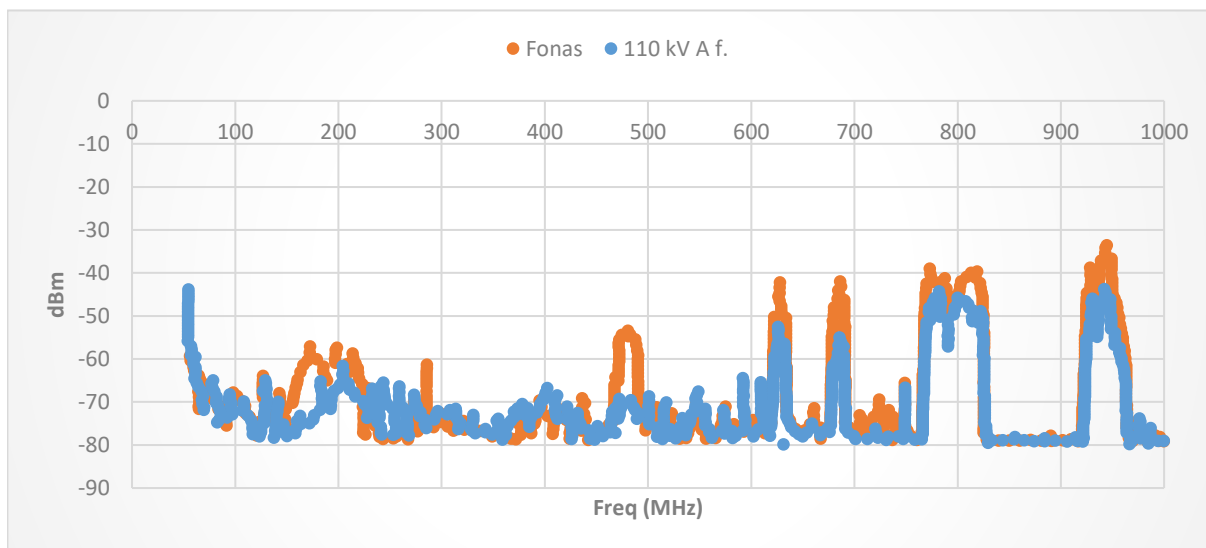
Remiantis sensorių išdėstymo schemomis (25–26 pav.), atliekami autotransformatoriaus AT-1 radijo dažnių trikdžių (RFI) matavimai. Prieš pagrindinius matavimus pirmiausia įvertinamas aplinkos fonas, kuris leidžia atskirti išorinius elektromagnetinius trikdžius nuo galimų tiriamo įrenginio skleidžiamų signalų. Gauti duomenys analizuojami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą, o

kiekvieno matavimo rezultatai lyginami su foniniu spektru. Toliau darbe detaliau nagrinėjami tie matavimo taškai, kuriuose matomi ryškesni RFI signalo nuokrypiai nuo fono. Matavimai, kuriuose reikšmingų skirtumų nenustatoma, pateikiami 6 priede.



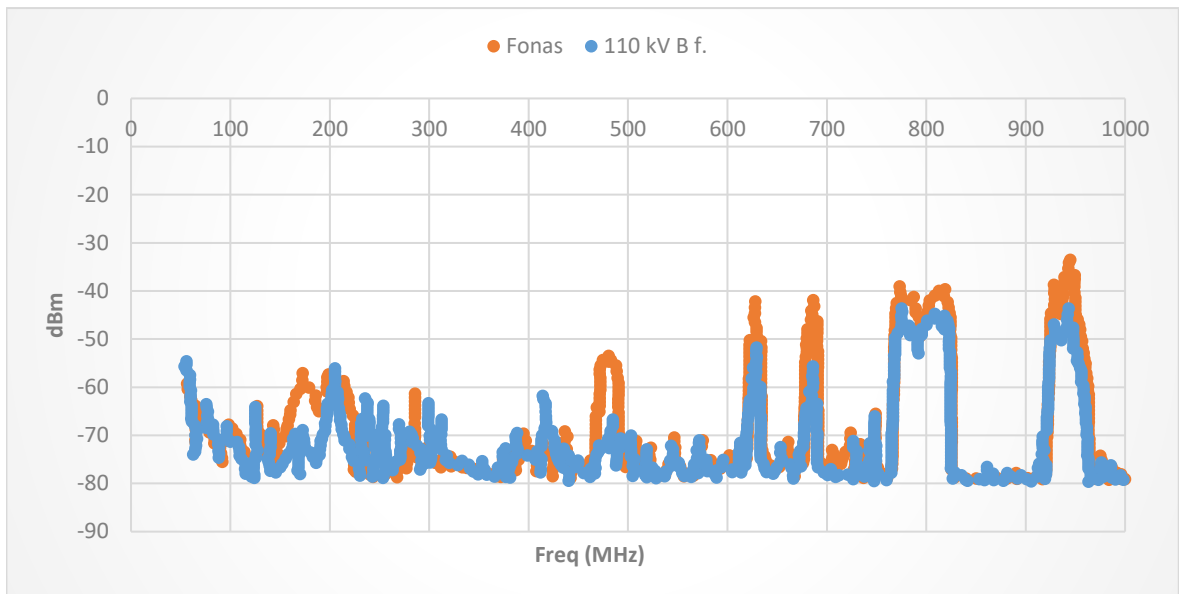
**65 pav.** Skaitmenizuotas autotransformatoriaus AT-1 aplinkos fonas

Ryškesnis skirtumas matomas tik žemesniame dažnių ruože, maždaug 40–70 MHz. Aukštesniuose dažniuose, ypač 750–850 MHz ir 900–960 MHz, signalas daugiausia sutampa su fonu.



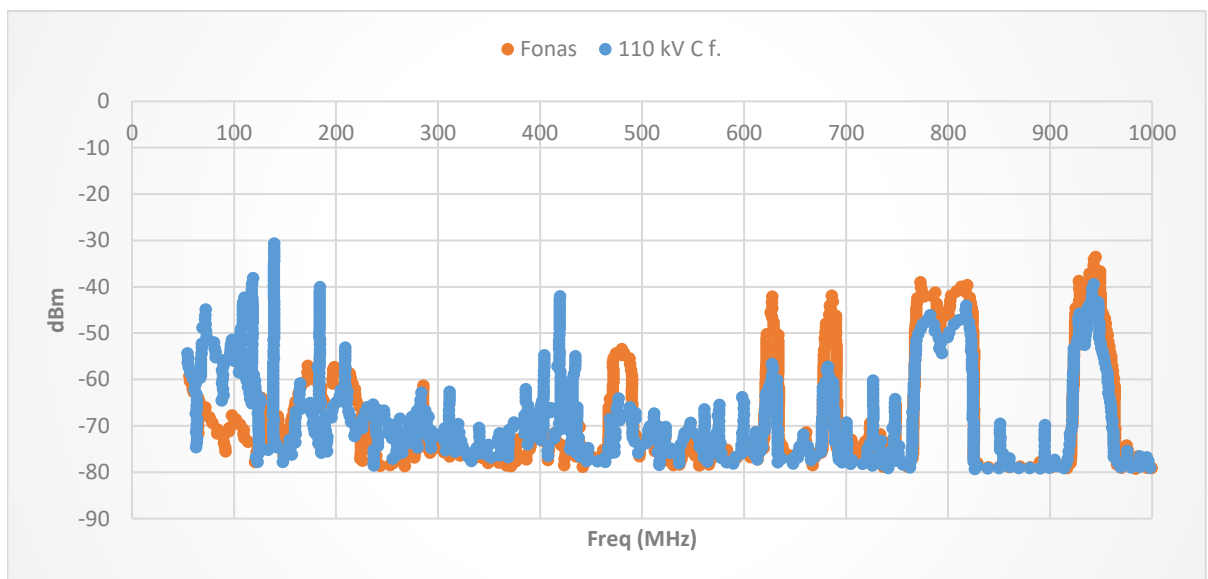
**66 pav.** Skaitmenizuotas 110 kV A fazė

Nedideli skirtumai matomi maždaug 50–80 MHz ir 250–400 MHz ruožuose, tačiau jie nėra labai ryškūs.



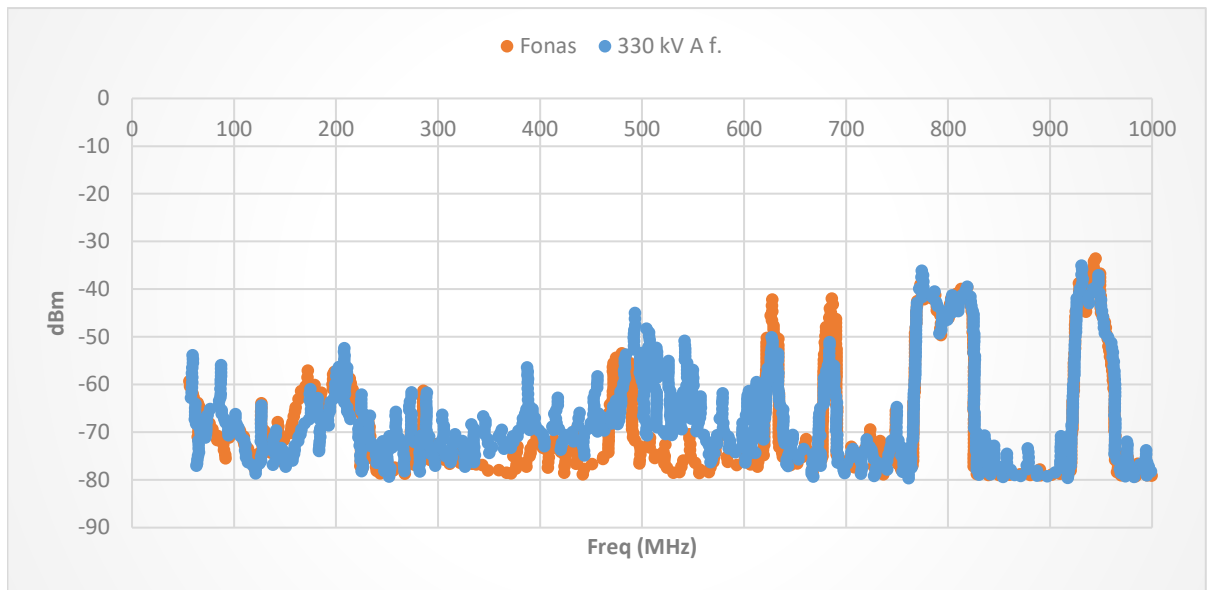
**67 pav.** Skaitmenizuotas 110 kV B fazė

Matomi aiškesni nuokrypiai nuo fono matomi maždaug 40–150 MHz ruože. Taip pat pastebimi papildomi signalai apie 400–470 MHz.



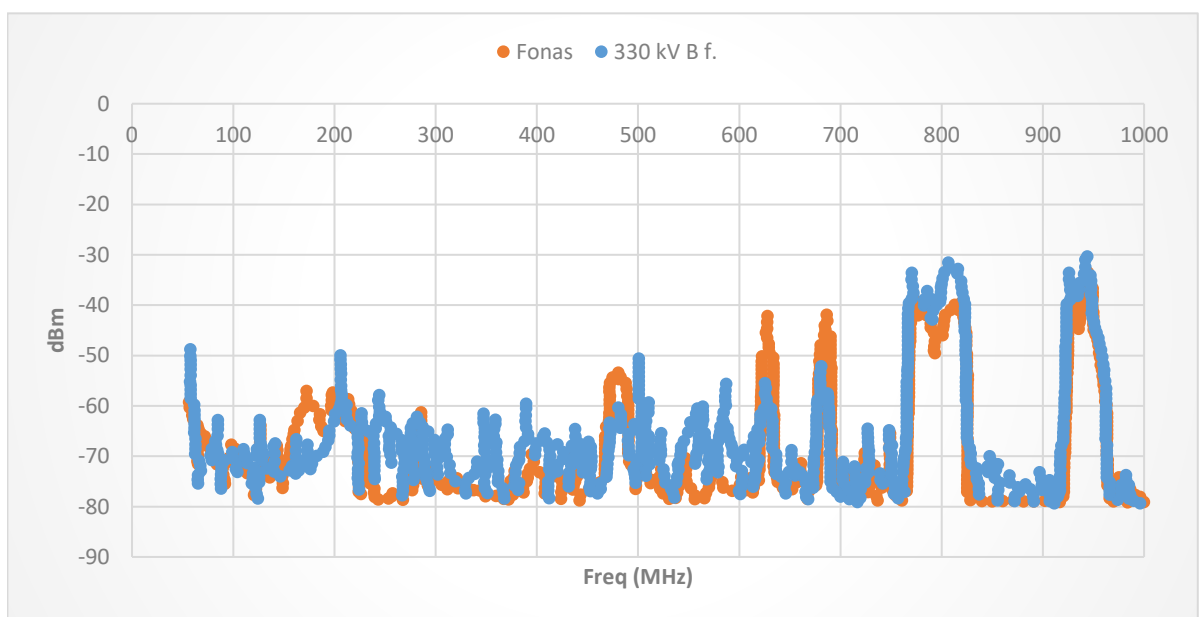
**68 pav.** Skaitmenizuotas 110 kV C fazė

Matom, kad nuo fono labiau išsiskiria maždaug 80–180 MHz, 250–350 MHz ir 400–500 MHz ruožai.



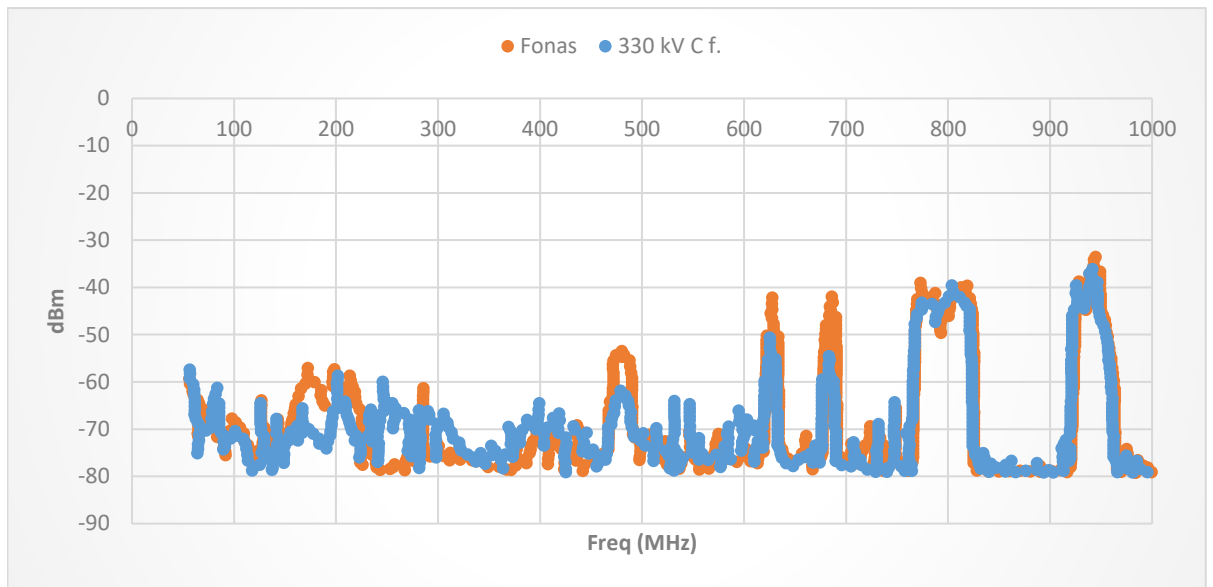
**69 pav.** Skaitmenizuotas 330 kV A fazė

Matomi skirtumai maždaug 40–70 MHz, 250–350 MHz ir 400–550 MHz ruožuose.



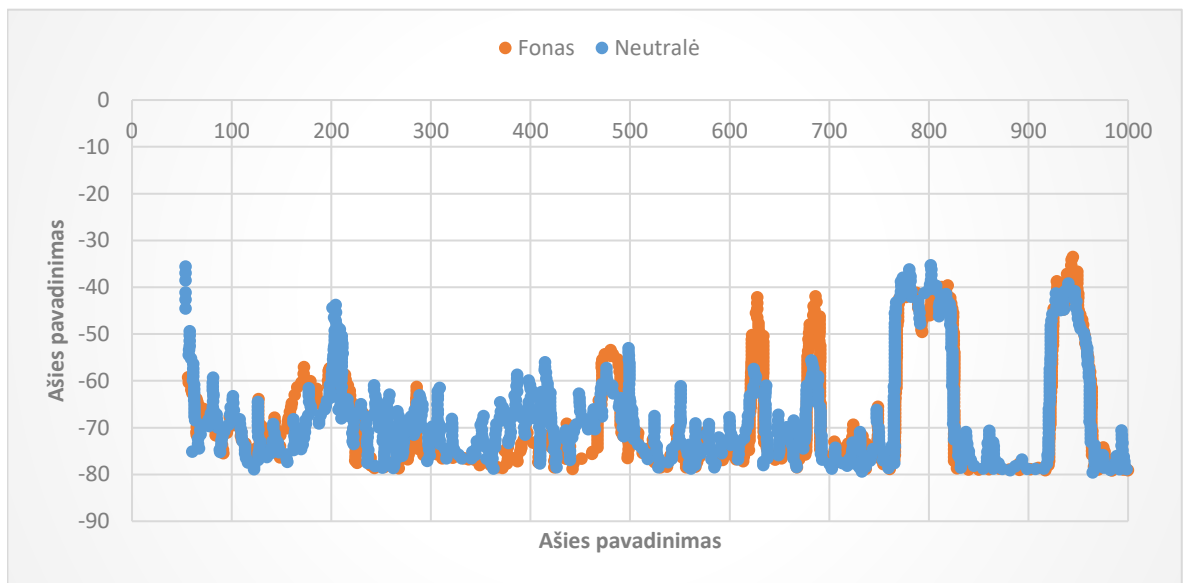
**70 pav.** Skaitmenizuotas 330 kV B fazė

Nedideli skirtumai matomi maždaug 80–130 MHz, 200–300 MHz ir 400–470 MHz ruožuose.



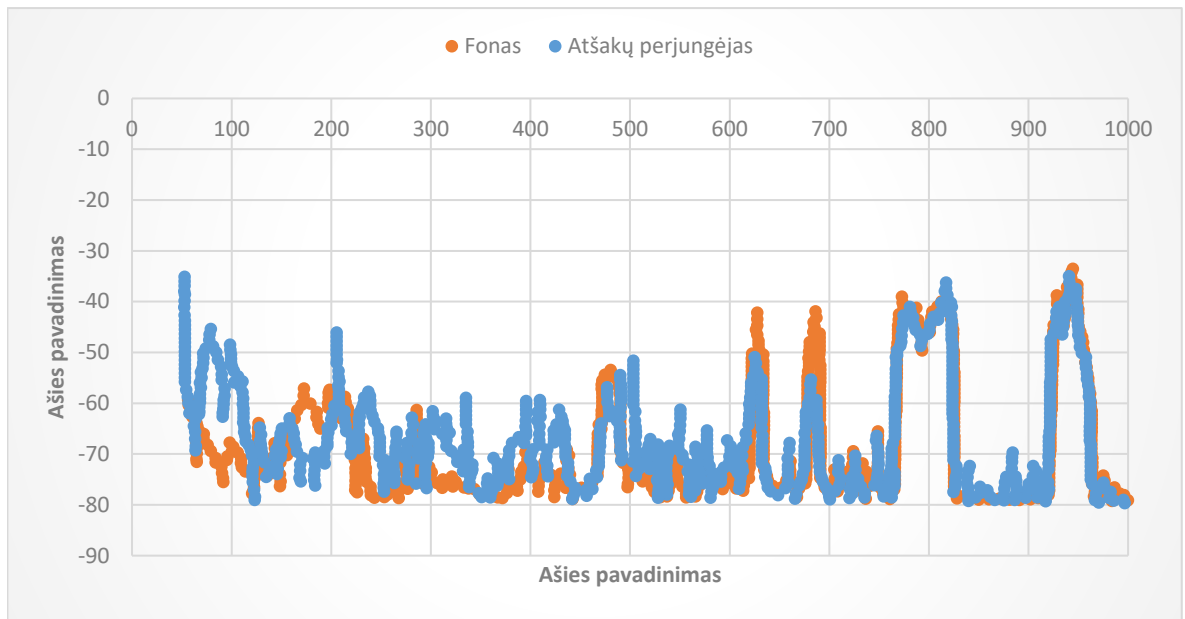
71 pav. Skaitmenizuotas 330 kV C fazė

Nedideli skirtumai matomi maždaug 80–130 MHz, 200–300 MHz ir 400–470 MHz ruožuose.



72 pav. Skaitmenizuotas 330 kV neutralė

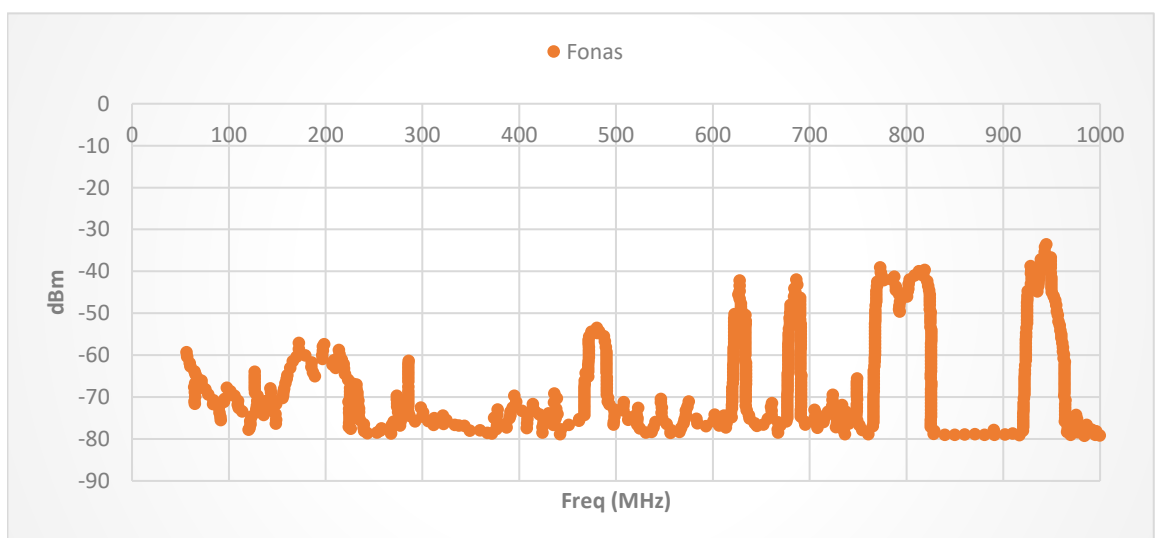
Labiausiai nuo fono išsiskiria maždaug 40–100 MHz ruožas. Papildomi, bet silpnesni skirtumai pastebimi apie 180–230 MHz ir 380–470 MHz.



73 pav. Skaitmenizuotas 330 kV atšakų perjungėjas

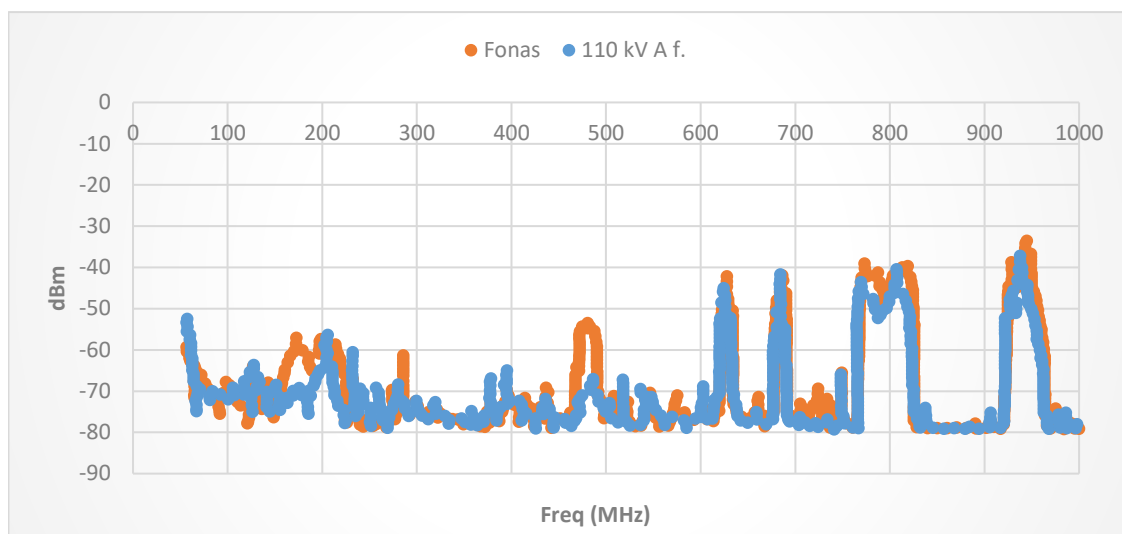
### 2.6.9. AT-2 autotransformatoriaus RFI matavimai

Analogiškai AT-1 matavimams, vadovaujantis sensorių išdėstymo schemomis (25–26 pav.), atliekami autotransformatoriaus AT-2 radijo dažnių trikdžių (RFI) matavimai. Prieš pradėdant pagrindinių matavimo taškų analizę, įvertinamas aplinkos fonas, kuris naudojamas kaip atskaitinis spektras. Tai leidžia patikimiau atskirti išorinius elektromagnetinius trikdžius nuo galimų autotransformatoriaus sklaidžiamų signalų. Matavimo duomenys apdorojami ir analizuojami naudojant „PDViewer“ programinę įrangą, o kiekvieno taško rezultatai lyginami su foniniu matavimu. Tolesnėje analizėje išsamiau aptariami tik tie matavimo taškai, kuriuose pastebimi aiškesni RFI signalo nuokrypiai nuo aplinkos fono, o matavimai be reikšmingų skirtumų pateikiami 6 priede.



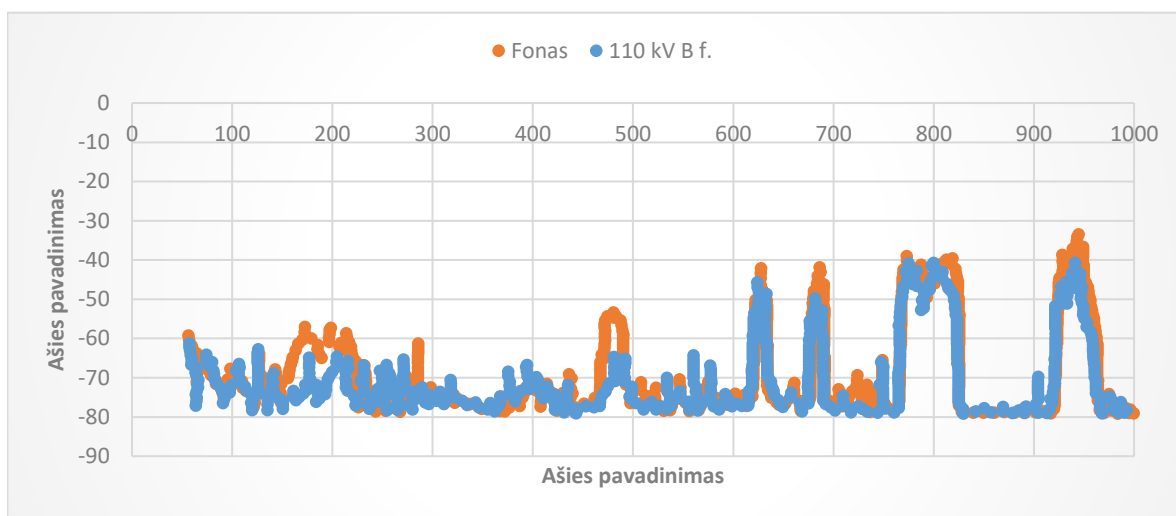
74 pav. Skaitmenizuotas autotransformatoriaus AT-2 aplinkos fonas

Matome, kad didžiojoje dažnių diapazono dalyje matavimo kreivė yra artima aplinkos fonui. Ryškesnis skirtumas nepastebimas.



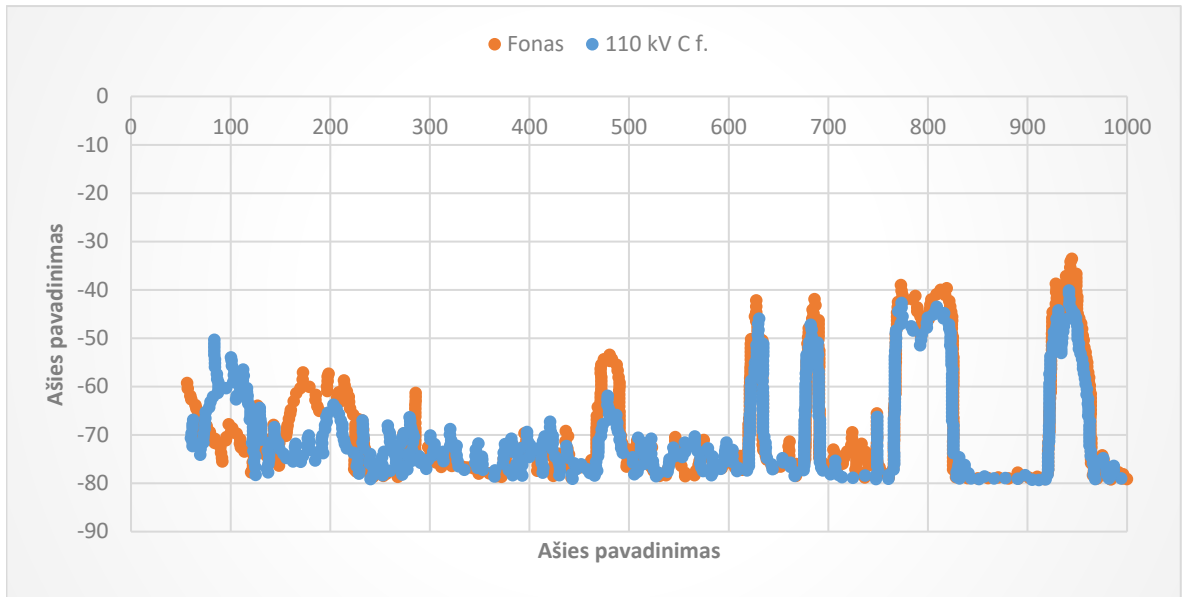
75 pav. Skaitmenizuotas 110 kV A fazė

Atliktame matavime didžiojoje dažnių diapazono dalyje matavimo kreivė yra artima aplinkos fonui. Ryškesnis skirtumas nepastebimas.



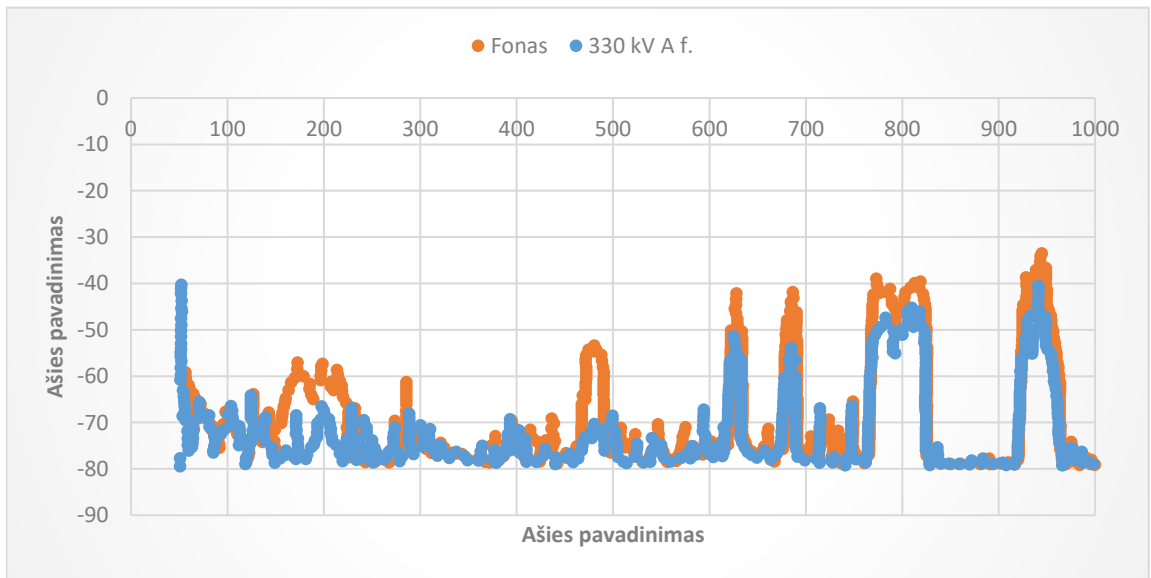
76 pav. Skaitmenizuotas 110 kV B fazė

Ryškesni signalo nuokrypiai nuo fono matomi maždaug 40–120 MHz dažnių ruože



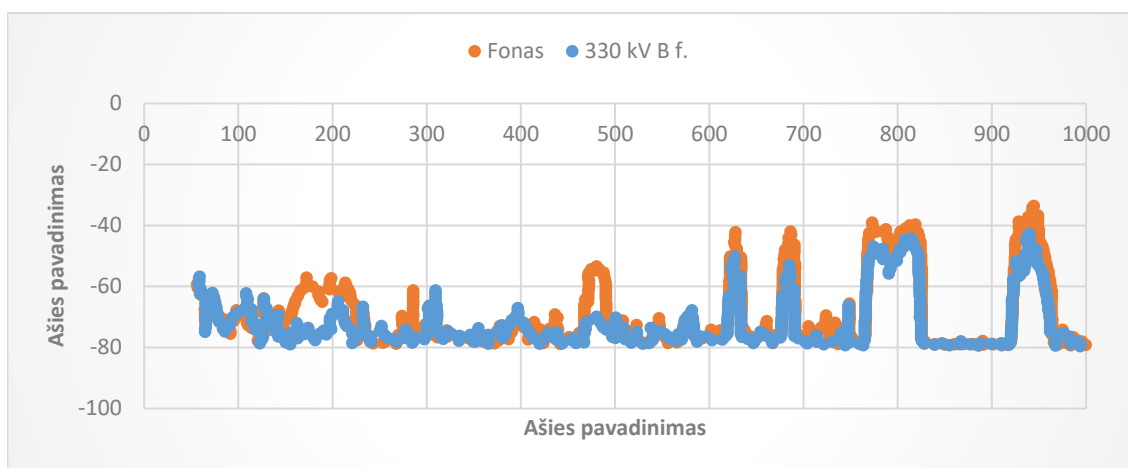
77 pav. Skaitmenizuotas 110 kV C fazė

Matavime didžiojoje dažnių diapazono dalyje matavimo kreivė yra artima aplinkos fonui. Ryškesnis skirtumas nepastebimas.



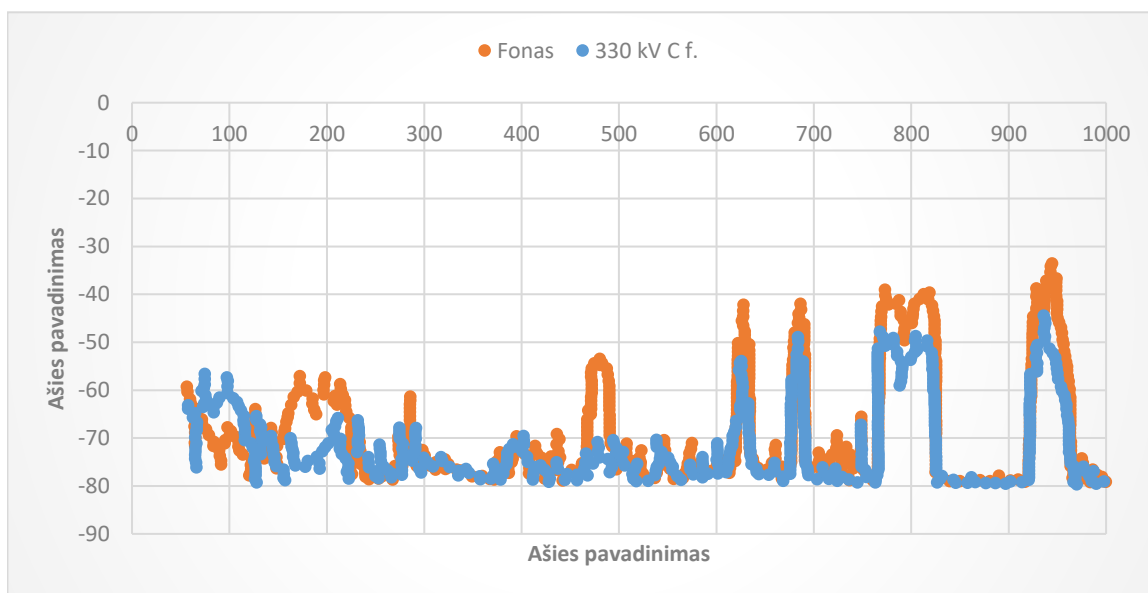
78 pav. Skaitmenizuotas 330 kV A fazė

Atliktame matavime didžiojoje dažnių diapazono dalyje matavimo kreivė yra artima aplinkos fonui. Ryškesnis skirtumas nepastebimas.



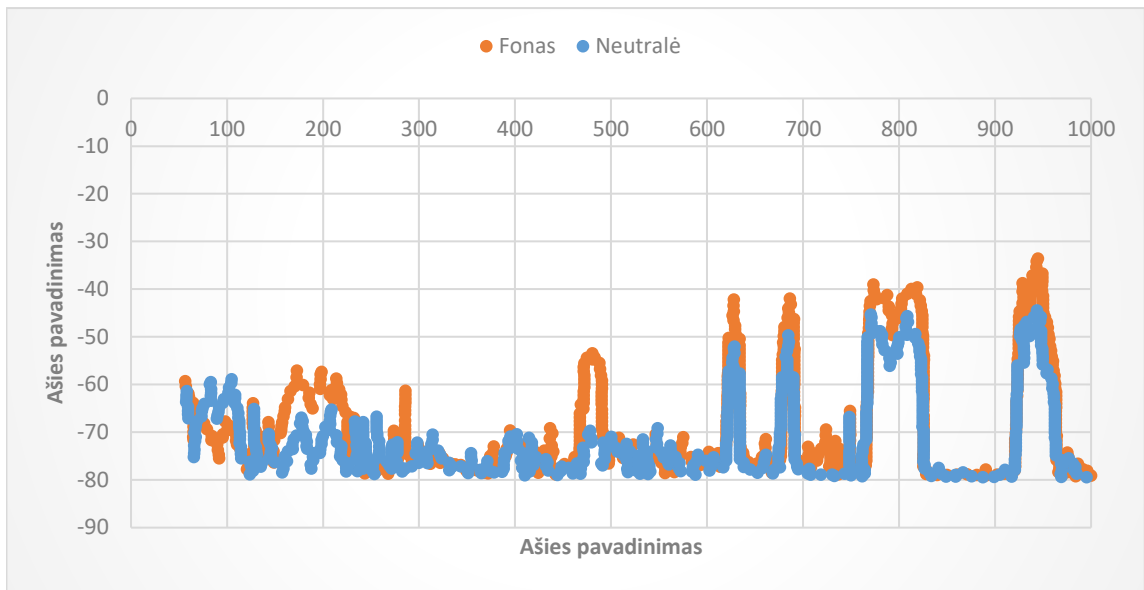
79 pav. Skaitmenizuotas 330 kV B fazė

Aiškių ir nuoseklių nuokrypių nuo fono nematome.



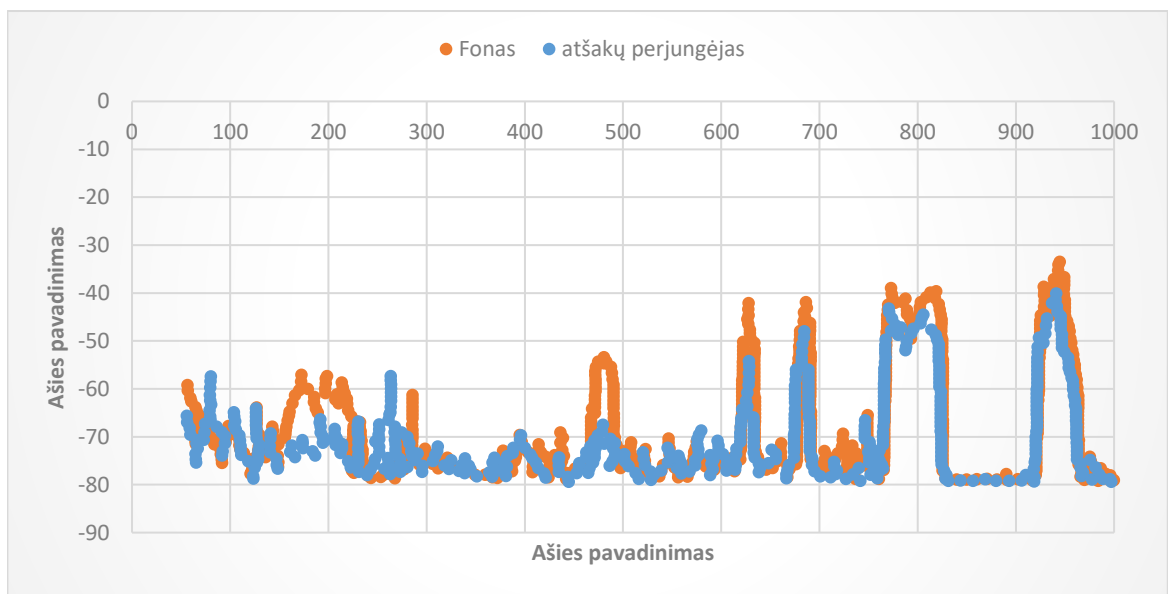
80 pav. Skaitmenizuotas 330 kV C fazė

Pastebimi nedideli skirtumai nuo aplinkos fono žemesnių dažnių srityje, daugiausia apie 40–120 MHz. Taip pat galima išskirti pavienius signalo lygio padidėjimus maždaug 180–230 MHz ir 350–450 MHz dažnių ruožuose, tačiau jie nėra aiškiai dominuojantys.



81 pav. Skaitmenizuotas 330 kV neutralė

Aktyvumas pastebimas žemųjų dažnių srityje, maždaug 40–150 MHz ruože. Papildomi, tačiau mažiau išreikšti skirtumai matomi apie 180–250 MHz ir 380–470 MHz dažnių ruožuose.



82 pav. Skaitmenizuotas 330 kV atšakų perjungėjas

## 2.7. Duomenų apdorojimas ir diagnostinių požymių vertinimo kriterijai

Atlikus akustinės emisijos (AE) ir radijo dažnių trikdžių (RFI) matavimus, gauti rezultatai vertinami ne tik pagal absoliučią signalo amplitudę, bet ir pagal signalo pobūdį, pasikartojimą, santykį su aplinkos fonu ir matavimo vietą įrenginio konstrukcijoje. Kadangi dalinių išlydžių matavimai eksploatacinėmis sąlygomis yra veikiami aplinkos triukšmo, mechaninių virpesių, elektromagnetinių trikdžių ir matavimo vietos ypatumų, rezultatų interpretacija atliekama atsargiai.

Akustinės emisijos matavimuose pagrindinis dėmesys skiriamas impulsų amplitudei, jų pasiskirstymui per 20 ms periodą ir pasikartojimui atskirose sinusoidės periodo dalyse. Kadangi vienas 50 Hz įtampos periodas atitinka 20 ms, impulsų susitelkimas dviejose periodo srityse gali būti vertinamas kaip reikšmingesnis požymis negu per visą periodą atsitiktinai pasiskirstę impulsai. Vis dėlto šiame darbe mV reikšmės vertinamos kaip santykiniai diagnostiniai rodikliai, o ne kaip IEC 60270 metodu nustatomas matomasis krūvis, išreiškiamas pC.

RFI matavimuose pagrindinis vertinimo kriterijus yra matavimo kreivės atsiskyrimas nuo aplinkos fono. DOBLE DFA300 įranga taikoma tiek RFI, tiek AE matavimams, o prieš RFI analizę būtina atlikti fono matavimą, kad aplinkos elektromagnetiniai trikdžiai nebūtų klaidingai priskirti daliniams išlydžiams.

**8 lentelė.** Diagnostinių požymių vertinimo kriterijai

Vertinimo kriterijus	AE matavimuose	RFI matavimuose	Diagnostinė reikšmė
Signalų amplitudė	Vertinama didžiausia pikinė reikšmė, mV	Vertinamas signalo lygis, dBm	Didesnė reikšmė rodo aktyvesnį signalą, tačiau pati savaime nepatvirtina PD buvimo
Pasikartojimas	Vertinamas reikšmingas impulsų kartojimasis kas pusperiodį	Vertinamas reikšmingas pasikartojantis nuokrypis nuo fono	Didina matavimo taško diagnostinį patikimumą
Santykis su fonu	Vertinamas pagal bendrą triukšmo lygį ir impulsų pobūdį	Būtina tiesiogiai lyginti su fono spektru	Leidžia atskirti aplinkos trikdžius nuo galimų įrenginio signalų
Matavimo vieta	Įvadai, neutralė, OLTC, valdymo spintos zona	Įvadai, neutralė, OLTC, valdymo spintos zona	Padeda susieti signalą su konkrečia konstrukcine zona
Galutinė interpretacija	Indikacinė	Indikacinė	Reikalinga lyginti su kitais diagnostikos metodais, ypač DGA

### 2.7.1. Akustinės emisijos (AE) matavimų rezultatų analizė

Akustinės emisijos (AE) matavimų rezultatai vertinami pagal užfiksuotų impulsų amplitudę, jų pasiskirstymą viename 50 Hz įtampos periode ir pasikartojimą atskirose periodo dalyse. Kadangi vienas 50 Hz tinklo įtampos periodas atitinka 20 ms, impulsų pasiskirstymas laiko ašyje leidžia preliminariai įvertinti jų ryšį su įtampos faze. Šiame darbe 20 ms periodas sąlygiškai skirstomas į keturias dalis: 0–5 ms, 5–10 ms, 10–15 ms ir 15–20 ms. Diagnostiniu požiūriu reikšmingesniais laikomi tie matavimo taškai, kuriuose impulsai nėra pasiskirstę atsitiktinai per visą periodą, bet telkiasi atskirose periodo dalyse ir kartojasi maždaug kas pusperiodį, t. y. maždaug kas 10 ms.

Toks vertinimo principas leidžia atskirti galimai faziškai priklausomą akustinį aktyvumą nuo atsitiktinio arba foninio akustinio triukšmo. Didesnė impulso amplitudė pati savaime nėra pakankamas pagrindas matavimo tašką laikyti reikšmingu. Jeigu aukštesnės amplitudės impulsai pasiskirsto tolygiai per visą 20 ms periodą, toks aktyvumas vertinamas atsargiau. Priešingai, mažesnės amplitudės signalas, kuris aiškiai kartojasi atskirose periodo dalyse, gali būti diagnostiniu požiūriu reikšmingesnis.

**9 lentelė.** AE matavimų vertinimo kriterijai

Vertinimo kriterijus	Diagnostinė reikšmė
Didžiausia impulsų amplitudė, mV	Parodo santykinį signalo intensyvumą, tačiau viena pati nepatvirtina dalinių išlydžių buvimo
Impulsų pasiskirstymas per 20 ms periodą	Leidžia įvertinti, ar signalas yra atsitiktinis, ar susijęs su įtampos faze
Impulsų pasikartojimas kas pusperiodį	Laikomas svarbiausiu diagnostiniu požymiu šiame vertinime
Impulsų telkimasis I–III arba II–IV periodo dalyse	Gali rodyti faziškai priklausomą akustinį aktyvumą
Tolygus pasiskirstymas per visą periodą	Labiau būdingas foniniam triukšmui, mechaniniams virpesiams arba mažiau reikšmingam aktyvumui
Matavimo vieta konstrukcijoje	Padedą susieti signalą su įvado, neutralės, valdymo spintos ar atšakų perjungiklio zona

Pirmųjų 400 kV šuntinio reaktoriaus akustinių matavimų metu didžiausias aktyvumas nustatytas valdymo spintos ir neutralės pusėse. Matavimo taške Nr. 7, valdymo spintos pusėje, apie 0,5 m aukštyje, impulsų amplitudė siekė iki 200 mV. Nors tai buvo didžiausia šio matavimo etapo reikšmė, impulsai šiame taške nebuvo aiškiai susitelkę į du siaurus fazinius telkinius, todėl šis taškas vertintas kaip padidėjusio akustinio aktyvumo zona, bet ne kaip aiškiausias faziškai pasikartojančio aktyvumo požymis. Matavimo taške Nr. 8, taip pat valdymo spintos pusėje, apie 1,8 m aukštyje, impulsų amplitudė siekė iki 170 mV, tačiau šiame taške buvo matomi aiškesni du impulsų telkiniai per vieną 20 ms periodą. Dėl šios priežasties taškas Nr. 8 vertintas kaip diagnostiniu požiūriu reikšmingesnis, negu būtų galima spręsti vien pagal amplitudę. Neutralės pusėje išsiskyrė matavimo taškai Nr. 9 ir Nr. 10, kuriuose amplitudės atitinkamai siekė iki 115 mV ir 140 mV. Iš jų reikšmingesnis buvo taškas Nr. 10, nes jame aiškiau matomas impulsų pasikartojimas dviejose periodo dalyse. Šių matavimų metu prie šuntinio reaktoriaus neutralės buvo pastebėtas pažeistas neutralės viršįtampių ribotuvas, todėl neutralės pusėje užfiksuotas aktyvumas vertintas kaip galimai susijęs su šiuo defektu.

Pakartotinių 400 kV šuntinio reaktoriaus akustinių matavimų metu bendras signalo lygis sumažėjo. Tuo metu neutralės viršįtampių ribotuvas jau buvo pakeistas, todėl neutralės pusės taškuose Nr. 9 ir Nr. 10 amplitudės sumažėjo iki 10 mV ir 18 mV, o didelio impulsinio aktyvumo nebebuvo fiksuojama. Fazinio pasikartojimo požiūriu ryškiausiai išsiskyrė matavimo taškas Nr. 8, esantis valdymo spintos pusėje, apie 1,8 m aukštyje. Šiame taške impulsų pikai telkėsi maždaug 5–7 ms ir 15–17 ms intervaluose, t. y. kartojosi maždaug kas pusperiodį. Nors amplitudė sumažėjo iki 46 mV, toks pasiskirstymo pobūdis leidžia šį tašką laikyti reikšmingiausiu pakartotinių šuntinio reaktoriaus matavimų tašku. Matavimo taške Nr. 7 signalai siekė iki 37 mV, tačiau impulsų sklaida buvo gana tolygi per visą periodą. Papildomai vertintas taškas Nr. 3, esantis 400 kV B fazės įvado srityje, kuriame signalas siekė iki 36 mV, tačiau taip pat nebuvo aiškaus pusperiodinio pasikartojimo. Todėl pagal pasirinktą kriterijų pagrindiniu stebėtinu tašku laikomas Nr. 8, o neutralės aktyvumo sumažėjimas laikomas svarbiu ribotuvo pakeitimo poveikio požymiu.

AT-1 autotransformatoriaus pirmųjų akustinių matavimų metu didžiausias aktyvumas nustatytas 330 kV A fazės įvado srityje, matavimo taške Nr. 1, kuriame amplitudė siekė iki 115 mV. Šiame taške impulsai telkėsi maždaug 2–4 ms ir 12–14 ms intervaluose, todėl jų pasikartojimas atitiko maždaug pusperiodžio intervalą. Dėl šios priežasties taškas Nr. 1 laikytas vienu reikšmingiausių AT-1 pirmųjų matavimų taškų. Panašus, tačiau mažesnio intensyvumo pasiskirstymas nustatytas matavimo taške

Nr. 18, atšakų perjungiklio 110 kV pusėje, kuriame impulsai ryškiau telkėsi apie 0–2 ms ir 10–12 ms. Matavimo taškas Nr. 19 taip pat rodė tam tikrą pasikartojimą kas pusperiodį, tačiau dėl mažesnės amplitudės jis vertintas kaip silpnosios aktyvumo zona. Tuo tarpu taškuose Nr. 3, Nr. 12 ir Nr. 20 impulsai pasiskirstė tolygiau, todėl šie taškai laikyti mažiau reikšmingais.

Pakartotinių AT-1 akustinių matavimų metu didžiausia amplitudė vėl fiksuota matavimo taške Nr. 1, 330 kV A fazės įvado srityje, kur signalas siekė iki 100 mV. Tačiau šiame matavime impulsai išsidėstė plačiau per visą 0–20 ms periodą ir nebuvo aiškiai susitelkę tik į dvi fazines sritis. Todėl, taikant pusperiodinio pasikartojimo kriterijų, šis taškas vertintas atsargiau negu pirmųjų matavimų metu. Matavimo taške Nr. 18, atšakų perjungiklio 110 kV pusėje, signalas siekė iki 75 mV, todėl ši zona išliko stebėtina, ypač atsižvelgiant į atšakų perjungiklio konstrukcinę reikšmę. Vis dėlto, palyginti su pirmųjų AT-1 matavimų rezultatais, pakartotiniuose matavimuose fazinis pasikartojimas nebuvo toks aiškus, todėl šie rezultatai laikomi labiau indikaciniais.

AT-2 autotransformatoriaus pirmųjų akustinių matavimų metu didžiausias aktyvumas fiksuotas 110 kV C fazės įvado srityje. Matavimo taške Nr. 6, apie 2,8 m aukštyje, impulsų amplitudės siekė iki 200 mV, o didesnis aktyvumas telkėsi tam tikrose 20 ms periodo dalyse, ypač apie 10–15 ms intervalą. Matavimo taške Nr. 5, esančiame 110 kV C fazės įvado srityje, apie 1,5 m aukštyje, impulsai ryškiau susitelkė apie 5–8 ms intervalą. Šie taškai rodė padidėjusį akustinį aktyvumą 110 kV C fazės įvado zonoje, tačiau pagal griežtą pusperiodinio pasikartojimo kriterijų labiausiai išsiskyrė atšakų perjungiklio pusės matavimo taškas Nr. 17. Jame impulsai kartojosi maždaug 5–8 ms ir 15–17 ms intervaluose, t. y. kas pusperiodį. Todėl taškas Nr. 17 vertintas kaip diagnostiniu požiūriu reikšmingas, net jeigu jo amplitudė nebuvo pati didžiausia. Matavimo taškas Nr. 18 pasižymėjo mažesniu ir tolygesniu aktyvumu, todėl laikytas mažesnio prioriteto stebėjimo zona.

Pakartotinių AT-2 akustinių matavimų metu bendras aktyvumo lygis buvo mažesnis negu pirmųjų matavimų metu. Pagal impulsų pasiskirstymo pobūdį reikšmingiausiais laikyti tie taškai, kuriuose išliko pasikartojimas kas pusperiodį. Šiuo požiūriu išsiskyrė matavimo taškas Nr. 3, esantis 330 kV B fazės įvado srityje, kuriame impulsų aktyvumas telkėsi apie 3–5 ms ir 13–15 ms. Taip pat stebėtinai matavimo taškas Nr. 18, esantis atšakų perjungiklio 110 kV pusėje, kuriame impulsai pasireiškė platesniuose, tačiau pasikartojančiuose 2–8 ms ir 12–18 ms intervaluose. Nors šių taškų amplitudės buvo mažesnės negu pirmųjų matavimų metu, jų pasiskirstymo pobūdis atitiko pasirinktą diagnostinį kriterijų, todėl šie taškai paliekami tolesnei stebėsenai.

**10 lentelė.** AE matavimų rezultatų suvestinė

Įrenginys	Matavimo etapas	Išsiskiriantys taškai	Amplitudė	Impulsų pasiskirstymo pobūdis	Diagnostinis vertinimas
400 kV šuntinis reaktorius	Pirmasis matavimas	Nr. 8	iki 170 mV	Matomi du impulsų telkiniai per 20 ms periodą	Reikšmingas
400 kV šuntinis reaktorius	Pirmasis matavimas	Nr. 10	iki 140 mV	Aiškesnis pasikartojimas dviejose periodo dalyse	Reikšmingas; neutralės pusėje aktyvumas siejamas su pastebėtu pažeistu neutralės viršįtampių ribotuvu
400 kV šuntinis reaktorius	Pirmasis matavimas	Nr. 7	iki 200 mV	Aktyvumas didelis, bet pasiskirstymas platesnis	Stebėtinai, bet ne pagrindinis

Įrenginys	Matavimo etapas	Išsiskiriantys taškai	Amplitudė	Impulsų pasiskirstymo pobūdis	Diagnostinis vertinimas
400 kV šuntinis reaktorius	Pakartotinis matavimas	Nr. 8	iki 46 mV	Telkiniai apie 5–7 ms ir 15–17 ms	Reikšmingiausias pakartotinių matavimų taškas
400 kV šuntinis reaktorius	Pakartotinis matavimas	Nr. 7, Nr. 9, Nr. 10, Nr. 3	iki 37 mV	Pasiskirstymas tolygesnis; neutralės taškuose Nr. 9 ir Nr. 10 po ribotuvo pakeitimo aktyvumas sumažėjęs	Mažiau reikšmingi; neutralės pusėje didelio aktyvumo nebefiksuota
AT-1	Pirmasis matavimas	Nr. 1	iki 115 mV	Telkiniai apie 2–4 ms ir 12–14 ms	Reikšmingas
AT-1	Pirmasis matavimas	Nr. 18	iki 75 mV	Telkiniai apie 0–2 ms ir 10–12 ms	Reikšmingas
AT-1	Pirmasis matavimas	Nr. 19	iki 36 mV	Matomas silpnėsnis pasikartojimas	Papildomai stebėtinus
AT-1	Pakartotinis matavimas	Nr. 1	iki 100 mV	Impulsai plačiau pasiskirstę per 20 ms periodą	Vertintinas atsargiai
AT-1	Pakartotinis matavimas	Nr. 18	iki 75 mV	Stebėtinus dėl pasikartojančio aktyvumo ir konstrukcinės zonos	Papildomai stebėtinus
AT-2	Pirmasis matavimas	Nr. 6	iki 200 mV	Aktyvumas telkiasi apie 10–15 ms	Reikšmingas pagal amplitudę
AT-2	Pirmasis matavimas	Nr. 5	iki 150 mV	Aktyvumas telkiasi apie 5–8 ms	Stebėtinus
AT-2	Pirmasis matavimas	Nr. 17	—	Telkiniai apie 5–8 ms ir 15–17 ms	Reikšmingas pagal pusperiodinį pasikartojimą
AT-2	Pakartotinis matavimas	Nr. 3	iki 47 mV	Telkiniai apie 3–5 ms ir 13–15 ms	Reikšmingas
AT-2	Pakartotinis matavimas	Nr. 18	iki 45 mV	Aktyvumas kartojasi apie 2–8 ms ir 12–18 ms	Reikšmingas, bet vertintinas atsargiai dėl platesnių telkinių

Apibendrinant AE matavimų rezultatus, galima teigti, kad didžiausios amplitudės ne visada sutampa su diagnostiniu požiūriu reikšmingiausiais taškais. Taikant pusperiodinio pasikartojimo kriterijų, svarbiausiais laikomi tie matavimo taškai, kuriuose impulsai telkiasi dviejose 20 ms periodo dalyse ir kartojasi maždaug kas 10 ms. Pagal šį vertinimą reikšmingiausi yra 400 kV šuntinio reaktoriaus taškai Nr. 8 ir Nr. 10 pirmųjų matavimų metu bei Nr. 8 pakartotinių matavimų metu, AT-1 taškai Nr. 1 ir Nr. 18 pirmųjų matavimų metu, taip pat AT-2 taškas Nr. 17 pirmųjų matavimų metu ir taškai Nr. 3 bei Nr. 18 pakartotinių matavimų metu.

Taškai, kuriuose impulsų amplitudė yra didelė, bet pasiskirstymas per 20 ms periodą yra platus arba tolygus, vertinami kaip stebėtinai, tačiau ne kaip pagrindiniai dalinių išlydžių požymiai. Todėl galutinėje diagnostinėje analizėje AE rezultatai turi būti vertinami kartu su RFI matavimais, aplinkos fonu, pakartotinumų požymiais ir alyvos dujų chromatografijos (DGA) duomenimis.

## 2.7.2. Radijo dažnių trikdžių (RFI) matavimų rezultatų analizė

Prieš atliekant pagrindinius RFI matavimus, būtina įvertinti aplinkos elektromagnetinį foną, nes eksploatacinėje aplinkoje dalis dažnių spektre matomų pikų gali būti susijusi ne su tiriamo įrenginio izoliacijos būkle, o su išoriniais elektromagnetinių trikdžių šaltiniais. Pavyzdžiui, tam tikrus pikus 87,5–108 MHz dažnių ruože gali sukelti FM radijo stotys. 470–790 MHz diapazone gali būti registruojami skaitmeninės antžeminės televizijos (DTT) signalai, o apie 800 MHz dažnių ruože matomi pikai gali būti susiję su mobiliojo ryšio tinklais, nes Lietuvoje ir Europoje šis dažnių ruožas naudojamas 4G ryšiui. Be to, papildomus trikdžius gali sukelti ir kiti eksploatacinės aplinkos šaltiniai, pavyzdžiui, patalpų apšvietimo įranga ar kiti elektros įrenginiai.

Todėl RFI matavimų analizėje vertinamas ne vien absoliutus piko dydis, bet ir jo santykis su aplinkos fonu. Jeigu matavimo taške užfiksuotas pikas sutampa su foninio spektro pikų arba patenka į dažnių ruožą, kuriame tikėtini išoriniai radijo, televizijos ar mobiliojo ryšio signalai, toks aktyvumas vertinamas atsargiai ir nelaikomas pakankamu dalinių išlydžių požymiu. Diagnostiniu požiūriu reikšmingesniais laikomi tie dažnių ruožai, kuriuose matavimo kreivė aiškiai viršija foną, signalas pasireiškia konkrečiame matavimo taške ir nėra būdingas aplinkos elektromagnetiniams trikdžiams.

11 lentelė. RFI matavimų vertinimo kriterijai

Dažnių ruožas	Galimi išoriniai šaltiniai	Vertinimas šiame darbe
87,5–108 MHz	FM radijo stotys	Šiame ruože užfiksuoti pikai vertinami atsargiai, nes gali būti susiję su išorinėmis radijo transliacijomis
470–790 MHz	Skaitmeninė antžeminė televizija (DTT)	Signalai šiame ruože lyginami su aplinkos fonu, nes gali būti susiję su televizijos transliacijomis
Apie 800 MHz	Mobiliojo ryšio tinklai, 4G	Šiame ruože užfiksuoti pikai nelaikomi pakankamu PD požymiu be aiškaus atsiskyrimo nuo fono
Kiti dažniai	Elektros įrenginiai ar kiti aplinkos trikdžių šaltiniai	Vertinama individualiai, atsižvelgiant į fono matavimus ir signalo pasikartojimą konkrečiame matavimo taške

400 kV šuntinio reaktoriaus RFI matavimuose A ir B fazių bei neutralės signalai daugelyje dažnių ruožų buvo artimi aplinkos fonui. Labiausiai išsiskyrė 400 kV C fazės matavimas, kuriame ryškesni nuokrypiai nuo fono buvo matomi maždaug 200–300 MHz, 350–380 MHz, 480–500 MHz, 560–610 MHz ir 730–900 MHz ruožuose. Ryškiausias skirtumas pastebėtas 200–300 MHz intervale, todėl C fazės matavimas laikytas reikšmingiausiu šuntinio reaktoriaus RFI matavimu. Vis dėlto 480–500 MHz ir 560–610 MHz ruožai vertintini atsargiai, nes jie patenka į dažnių sritį, kurioje gali būti skaitmeninės antžeminės televizijos (DTT) signalų, o 730–900 MHz ruože galimi ir mobiliojo ryšio tinklų, ypač apie 800 MHz, sukelti trikdžiai.

AT-1 autotransformatoriaus RFI matavimuose reikšmingesni nuokrypiai nustatyti 110 kV C fazėje, 330 kV A ir B fazėse bei atšakų perjungiklio zonoje. 110 kV C fazėje signalas labiau išsiskyrė 40–150 MHz ir 400–470 MHz ruožuose. 330 kV A fazėje nuokrypiai buvo matomi apie 80–180 MHz, 250–350 MHz ir 400–500 MHz, o 330 kV B fazėje – apie 40–70 MHz, 250–350 MHz ir 400–550 MHz. Atšakų perjungiklio zonoje išsiskyrė 40–100 MHz, 180–230 MHz ir 380–470 MHz ruožai. Šie rezultatai rodo padidėjusį elektromagnetinį aktyvumą, tačiau 87,5–108 MHz intervale esantys pikai gali būti susiję su FM radijo stočių signalais, o 470–550 MHz ruože matomi nuokrypiai gali iš dalies

sutapti su DTT signalų diapazonu. Dėl šios priežasties šie ruožai vertinami tik lyginant su aplinkos fono matavimu.

AT-2 autotransformatoriaus RFI matavimuose bendras signalų atsiskyrimas nuo fono buvo mažesnis negu AT-1 atveju. Reikšmingesnis nuokrypis buvo matomas 110 kV C fazėje, kur signalas išsiskyrė maždaug 40–120 MHz ruože. Neutralės matavime pastebėti skirtumai apie 40–120 MHz, 180–230 MHz ir 350–450 MHz, o atšakų perjungiklio zonoje – apie 40–150 MHz, 180–250 MHz ir 380–470 MHz. Kiti AT-2 matavimo taškai daugiausia sutapo su aplinkos fonu. Kadangi 40–120 MHz ruožas iš dalies apima FM radijo stočių dažnius, šio intervalo pikai nelaikomi pakankamu dalinių išlydžių požymiu be aiškaus atsiskyrimo nuo fono. Be to, kai kuriuos žemesnio intensyvumo trikdžius galėjo lemti ir kiti eksploatacinės aplinkos šaltiniai, pavyzdžiui, patalpų apšvietimas ar netoliese veikiančios elektros įrenginiai.

**12 lentelė.** RFI matavimų rezultatų suvestinė

Įrenginys	Reikšmingesni matavimo taškai	Nuo fono išsiskiriantys ruožai	Reikšmingumo lygis	Vertinimas
400 kV šuntinis reaktorius	C fazė	200–300; 350–380; 480–500; 560–610; 730–900 MHz	Labai reikšmingas	Ryškiausiai išsiskiriantis šuntinio reaktoriaus RFI matavimas. Ypač svarbus 200–300 MHz ruožas, kuriame signalas aiškiai viršija foną. 480–610 MHz ir 730–900 MHz ruožai vertinami atsargiai dėl galimos DTT ir mobiliojo ryšio signalų įtakos.
AT-1	110 kV C fazė	40–150; 400–470 MHz	Labai reikšmingas	Vienas ryškiausių AT-1 matavimo taškų. Signalas išsiskiria tiek VHF srityje, tiek UHF srities pradžioje. 87,5–108 MHz intervalas vertinamas atsargiai dėl galimos FM radijo stočių įtakos.
AT-1	330 kV A fazė	80–180; 250–350; 400–500 MHz	Labai reikšmingas	Nuokrypiai pasireiškia keliuose dažnių ruožuose, įskaitant UHF sritį. Taškas svarbus tolesnei analizei, tačiau 87,5–108 MHz ir apie 470–500 MHz ruožai turi būti lyginami su aplinkos fonu.
AT-1	330 kV B fazė	40–70; 250–350; 400–550 MHz	Labai reikšmingas	Ryškus 400–550 MHz ruožas, kuris patenka į UHF sritį. Vertinamas kaip vienas svarbesnių AT-1 matavimų, tačiau 470–550 MHz dalis gali sutapti su DTT signalų diapazonu.
AT-1	Atšakų perjungiklis	40–100; 180–230; 380–470 MHz	Reikšmingas	Stebėtinai dėl atšakų perjungiklio konstrukcinės svarbos ir 380–470 MHz ruožo atsiskyrimo nuo fono. 87,5–100 MHz intervalas vertinamas atsargiai dėl galimų FM radijo signalų.
AT-2	110 kV C fazė	40–120 MHz	Reikšmingas	Reikšmingiausias AT-2 fazinis RFI matavimas, tačiau nuokrypis daugiausia pasireiškia žemesnių dažnių srityje. Kadangi 87,5–108 MHz intervale galimi FM radijo stočių signalai, šis ruožas nelaikomas pakankamu PD požymiu be aiškaus atsiskyrimo nuo fono.
AT-2	Neutralė	40–120; 180–230; 350–450 MHz	Papildomai stebėtinai	Matomi keli nuokrypiai, tačiau jie nėra tokie ryškūs kaip AT-1 atveju. Reikalinga lyginti su AE ir DGA duomenimis.
AT-2	Atšakų perjungiklis	40–150; 180–250; 380–470 MHz	Reikšmingas	Stebėtina zona dėl konstrukcinės reikšmės. 380–470 MHz ruožas patenka į UHF srities pradžią, tačiau nuokrypiai mažiau išreikšti negu AT-1 atveju. 87,5–108 MHz intervalas vertinamas atsargiai dėl galimos FM radijo įtakos.

### 2.7.3. Kompleksinis dalinių išlydžių matavimų įvertinimas

Atlikus akustinės emisijos (AE) ir radijo dažnių trikdžių (RFI) matavimų analizę, rezultatai vertinami kompleksiskai. Abu metodai leidžia įvertinti skirtingus galimų dalinių išlydžių požymius: AE matavimuose analizuojamas impulsų pasiskirstymas per 20 ms periodą ir jų pasikartojimas kas pusperiodį, o RFI matavimuose vertinamas elektromagnetinio signalo atsiskyrimas nuo aplinkos fono dažnių srityje. Kadangi metodų jautrumas ir trikdžių pobūdis skiriasi, galutinė išvada negali būti grindžiama vienu matavimo tipu.

Akustinės emisijos matavimuose diagnostiniu požiūriu reikšmingesniais laikomi tie taškai, kuriuose impulsai telkiasi atskirose periodo dalyse ir kartojasi maždaug kas 10 ms. Toks pasikartojimas gali rodyti su tinklo įtampos faze susijusį impulsinį aktyvumą. Tačiau vien akustinio signalo nepakanka konkrečiam dalinių išlydžių tipui nustatyti, nes AE matavimai nepateikia konvencinių PRPD parametrų ir matomojo krūvio pC vienetais.

RFI matavimuose reikšmingesniais laikomi tie taškai, kuriuose matavimo signalas aiškiai atsiskiria nuo aplinkos fono. Tokie nuokrypiai leidžia išskirti zonas, kuriose pasireiškia padidėjęs elektromagnetinis aktyvumas. Vis dėlto RFI matavimai taip pat yra indikaciniai, nes dalis dažnių ruožų gali būti veikiami išorinių elektromagnetinių trikdžių. Dėl šios priežasties patikimiausiai vertinami tie matavimo taškai, kuriuose AE ir RFI požymiai sutampa arba pasireiškia toje pačioje konstrukcinėje zonoje

**13 lentelė.** Kompleksinis AE ir RFI matavimų rezultatų palyginimas

Įrenginys / zona	AE požymiai	RFI požymiai	Kompleksinis vertinimas
400 kV šuntinis reaktorius, C fazė	AE matavimuose aiškus fazinis pasikartojimas tiesiogiai neišskiriamas	Ryškiausias RFI nuokrypis: 200–300, 350–380, 480–500, 560–610 ir 730–900 MHz	Stebėtina zona pagal RFI rezultatus; reikalingas papildomas patvirtinimas AE arba DGA duomenimis
400 kV šuntinis reaktorius, valdymo spintos pusė	Taškas Nr. 8 išsiskiria impulsų pasikartojimu kas pusperiodį	RFI požymiai šioje zonoje nėra pagrindiniai	Akustiškai stebėtina zona; pakartotiniuose matavimuose išlieka reikšmingiausias šuntinio reaktoriaus AE taškas
AT-1, 330 kV A fazė	Taškas Nr. 1 išsiskiria AE matavimuose, impulsai kartojasi kas pusperiodį	RFI matavime matomi 80–180, 250–350 ir 400–500 MHz nuokrypiai	Viena reikšmingiausių zonų, nes požymiai matomi taikant abu metodus
AT-1, 330 kV B fazė	AE požymiai nėra tokie ryškūs	RFI matavime išsiskiria 40–70, 250–350 ir 400–550 MHz ruožai	Reikšminga pagal RFI rezultatus, papildomai stebėtina zona
AT-1, 110 kV C fazė	AE požymiai nėra pagrindiniai	RFI matavime išsiskiria 40–150 ir 400–470 MHz ruožai	Reikšminga pagal RFI rezultatus, tačiau AE požymiai silpnesni
AT-1, atšakų perjungiklis	Taškas Nr. 18 išsiskiria AE matavimuose	RFI matavime išsiskiria 40–100, 180–230 ir 380–470 MHz ruožai	Reikšminga stebėtina zona, nes požymiai pasireiškia taikant abu metodus
AT-2, 110 kV C fazė	Pirmųjų AE matavimų metu fiksuotas padidėjęs aktyvumas	RFI matavime išsiskiria 40–120 MHz ruožas	Stebėtina zona, tačiau RFI požymis daugiausia pasireiškia VHF srityje

Įrenginys / zona	AE požymiai	RFI požymiai	Kompleksinis vertinimas
AT-2, neutralė	AE požymiai nėra pagrindiniai	RFI matavime matomi 40–120, 180–230 ir 350–450 MHz ruožai	Papildomai stebėtina zona
AT-2, atšakų perjungiklis	Taškai Nr. 17 ir Nr. 18 išsiskiria impulsų pasikartojimu kas pusperiodį	RFI matavime išsiskiria 40–150, 180–250 ir 380–470 MHz ruožai	Reikšminga stebėtina zona, nes sutampa AE ir RFI požymiai
AT-2, 330 kV B fazė	Pakartotiniuose AE matavimuose taškas Nr. 3 išsiskiria impulsų pasikartojimu	RFI požymiai nėra ryškūs	Stebėtina pagal AE rezultatus, tačiau RFI patvirtinimo nėra
400 kV šuntinis reaktorius, neutralės pusė	Pirmųjų AE matavimų metu taškuose Nr. 9 ir Nr. 10 fiksuotas padidėjęs aktyvumas; pakartotiniuose matavimuose, pakeitus neutralės viršįtampių ribotuvą, aktyvumas sumažėjo	RFI neutralės signalas daugelyje ruožų buvo artimas aplinkos fonui	Papildomai stebėtina zona; PD matavimai galėjo operatyviai užfiksuoti pažeisto neutralės viršįtampių ribotuvo sukeltą lokalų aktyvumą

Svarbiausiomis laikomos tos zonos, kuriose požymiai pasireiškė taikant abu metodus. Šiuo požiūriu labiausiai išsiskyrė AT-1 330 kV A fazės įvado zona, AT-1 atšakų perjungiklio zona ir AT-2 atšakų perjungiklio zona. Šiose vietose fiksuoti tiek akustiniai impulsai, turintys pasikartojimo kas pusperiodį požymių, tiek RFI signalo nuokrypiai nuo aplinkos fonu.

Atskirai vertinama 400 kV šuntinio reaktoriaus C fazė, kurioje nustatytas ryškiausias RFI signalo atsiskyrimas nuo fonu. Tačiau AE matavimuose šioje zonoje aiškių fazinio pasikartojimo požymių neišskirta, todėl šis rezultatas laikomas padidėjusio elektromagnetinio aktyvumo požymiu, kurį būtina tikrinti papildomais matavimais.

AT-2 110 kV C fazė taip pat laikoma stebėtina, nes pirmųjų AE matavimų metu šioje zonoje fiksuotas didesnis aktyvumas, o RFI matavimuose matomas 40–120 MHz ruožo nuokrypis. Vis dėlto šis RFI požymis pasireiškia žemesnių dažnių srityje, todėl jo diagnostinis patikimumas yra mažesnis negu tų signalų, kurie aiškiau pasireiškia UHF ruože ir atsiskiria nuo fonu.

## 2.8. Dalinių išlydžių ir alyvos chromatografijos rezultatų analizė

Atlikus akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių matavimų analizę, šie rezultatai buvo palyginti su alyvoje ištirpusių dujų chromatografinės analizės duomenimis. Toks palyginimas leido įvertinti, ar AE ir RFI metodais nustatyti galimi dalinių išlydžių požymiai turi atitinkamą cheminį pėdsaką transformatorinėje alyvoje. Patikimiausiais laikyti tie atvejai, kai akustiniai ir elektromagnetiniai požymiai pasireiškė toje pačioje konstrukcinėje zonoje, o DGA rezultatai papildomai patvirtino galimo defekto kryptį.

DGA analizėje vertintos pagrindinės diagnostinės dujos: vandenilis  $H_2$ , metanas  $CH_4$ , etanas  $C_2H_6$ , etilenas  $C_2H_4$ , acetilenas  $C_2H_2$ , anglies monoksidas  $CO$  ir anglies dioksidas  $CO_2$ .  $H_2$  ir  $CH_4$  koncentracijų didėjimas buvo siejamas su silpno elektrinio aktyvumo požymiais,  $C_2H_2$  atsiradimas arba didėjimas – su pavojingesniais elektriniais išlydžiais, o  $CO$  ir  $CO_2$  koncentracijų augimas ir popierinės izoliacijos senėjimu arba terminiu irimu. Toliau pateiktose lentelėse sujungti kiekvieno įrenginio PD ir DGA duomenys bei pateikta galutinė integruota interpretacija.

Dujų koncentracijų pokytis tarp dviejų matavimo etapų buvo apskaičiuotas kaip antrojo ir pirmojo tyrimo rezultatų skirtumas, o prieaugio greitis – kaip šio skirtumo ir laiko intervalo tarp mėginių santykis. Ši metodika taikyta vertinant visų pagrindinių diagnostinių dujų kitimą tiriamų įrenginių alyvoje [8].

$$\Delta C_i = C_{i,2} - C_{i,1}, \quad (2.2)$$

$$r_i = \frac{C_{i,2} - C_{i,1}}{\Delta t}, \quad (2.3)$$

čia  $\Delta C_i$  – i-osios dujos koncentracijos pokytis, ppm;  $C_{i,1}$  – i-osios dujos koncentracija pirmojo matavimo metu, ppm;  $C_{i,2}$  – i-osios dujos koncentracija antrojo matavimo metu, ppm;  $\Delta t$  – laiko intervalas tarp matavimų, mėn.;  $r_i$  – i-osios dujos koncentracijos prieaugio greitis, ppm/mėn.

Tyrimo metu alyvos chromatografinės analizės duomenims apdoroti buvo sukurtas skaitmeninis analizės modelis Python programavimo kalba JupyterLab aplinkoje. Modelis automatizuoja Excel faile pateiktų duomenų nuskaitymą, dujų koncentracijų apdorojimą, diagnostinių dujų santykių ir dujų prieaugio spartos ml/d skaičiavimą bei rezultatų grafinį pateikimą. Taikant šį modelį užtikrinamas skaičiavimų pakartojamumas, atsekamumas ir sumažinama rankinių skaičiavimų klaidų tikimybė. Pilnas programos kodas pateikiamas 8 darbo priede.

```
# Dujų prieaugio spartos skaičiavimas ml/d
days_between_measurements = oil_summary["Data"].diff().dt.total_seconds() / 86400
days_between_measurements = days_between_measurements.replace(0, np.nan)

gas_growth_rate = pd.DataFrame({
    "Nuo": oil_summary["Data"].shift(1),
    "Iki": oil_summary["Data"],
    "Dienų intervalas": days_between_measurements,
    "Alyvos masė m, kg": oil_mass_kg,
    "Tankis q, kg/m3": oil_density_kg_m3,
    "m/q, m3": oil_volume_factor,
})

for column in growth_rate_columns:
    gas_growth_rate[f"{column}, prieaugis ml/d"] = (
        oil_summary[column].diff() * oil_volume_factor / days_between_measurements
    )
```

**83 pav.** Dujų prieaugio spartos skaičiavimo fragmentas Python aplinkoje

Diagnostinis suderinamumas šiame darbe suprantamas kaip kompleksinis rodiklis, parodantis, kiek PD ir DGA metodais gauti rezultatai rodo tą pačią defekto vystymosi kryptį. Aukštas suderinamumas nustatomas tada, kai fiziniai ir cheminiai požymiai vieni kitus patvirtina, vidutinis kai nustatomas tik dalinis sutapimas, o žemas kai PD ir DGA duomenys labiau rodo skirtingus procesus.

**14 lentelė.** 400 kV šuntinio reaktoriaus PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
PD požymių duomenys				
AE aktyvumas	Nr. 8 – iki 170 mV; Nr. 10 – iki 140 mV; Nr. 7 – iki 200 mV, tačiau šis taškas vertintinas kaip mažiau diagnostiški	Nr. 8 – iki 46 mV; Nr. 7, Nr. 9, Nr. 10 ir Nr. 3 – iki 37 mV, tačiau šie taškai vertintini kaip mažiau reikšmingi. Po	AE aktyvumas sumažėjo.	Pakartotinių AE matavimų metu aktyvumas buvo mažesnis. Reikšmingiausias išliko taškas Nr. 8, o neutralės zonos aktyvumo sumažėjimas sietinas

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
	reikšmingas. Neutralės pusėje užfiksuotas aktyvumas sutapo su nustatytu neutralės viršįtampių ribotuvo pažeidimu.	neutralės viršįtampių ribotuvo pakeitimo didelio aktyvumo neutralės taškuose nebefiksuota.		su pažeisto viršįtampių ribotuvo pakeitimu.
RFI aktyvumas	C fazėje nustatyti ryškūs aktyvumo ruožai: 200–300, 350–380, 480–500, 560–610 ir 730–900 MHz. Aktyvumas vertintinas kaip labai reikšmingas.	Duomenys nepateikti.	RFI aktyvumo dinamika nevertinama.	Ryškiausias elektromagnetinio aktyvumo požymis pirmojo matavimo metu nustatytas C fazėje. Nesant pakartotinio RFI matavimo, šio aktyvumo kitimo vertinti negalima.
Tikėtina PD požymių lokalizacija	Pagal RFI duomenis – C fazė; pagal AE duomenis – valdymo spintos pusė, ypač taškas Nr. 8. Neutralės pusėje AE aktyvumas siejamas su pažeistu neutralės viršįtampių ribotuvu.	Pagal AE duomenis stebėtina išlieka valdymo spintos pusė. Neutralės pusėje po viršįtampių ribotuvo pakeitimo aktyvumas sumažėjo.	Lokalizacija iš dalies pakito; neutralės defekto požymiai sumažėjo po viršįtampių ribotuvo pakeitimo.	AE ir RFI duomenys nenurodo vieno aiškaus bendro dalinių išlydžių židinio. Vis dėlto neutralės aktyvumo sumažėjimas po viršįtampių ribotuvo pakeitimo rodo, kad dalis pirminio aktyvumo buvo susijusi su konkrečiu lokalizuotu defektu.
PD požymių išvada	Užfiksuoti atskiri galimi PD požymiai, ypač C fazėje pagal RFI duomenis, taške Nr. 8 pagal AE duomenis ir neutralės pusėje prie pažeisto viršįtampių ribotuvo.	AE aktyvumas sumažėjo, o neutralės pusėje po viršįtampių ribotuvo pakeitimo didelio aktyvumo nenustatyta.	Požymiai nėra stabilūs; neutralės zonos aktyvumas sumažėjo pašalinus nustatytą defektą.	Gauti duomenys leidžia išskirti stebėtinas zonas, tačiau jų nepakanka pagrįstai patvirtinti aktyvų ir besivystantį PD defektą visame įrenginyje. Neutralės viršįtampių ribotuvo atvejis rodo, kad PD matavimai gali operatyviai identifikuoti lokalų defektą, tačiau rezultatai turi būti vertinami kartu su DGA ir kitais techninės būklės rodikliais.
DGA duomenys				
Vandenilis, H <sub>2</sub> , ppm	1,5	1,4	Sumažėjo 0,1 ppm, arba apie 6,7 %.	Ryškaus elektrinio aktyvumo didėjimo pagal H <sub>2</sub> koncentraciją nenustatyta.
Metanas, CH <sub>4</sub> , ppm	3,2	4,9	Padidėjo 1,7 ppm, arba apie 53,1 %.	CH <sub>4</sub> koncentracijos didėjimas gali būti susijęs su silpnu žemos energijos elektriniu arba žemos temperatūros terminiu procesu.
Etanas, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , ppm	1,8	2,5	Padidėjo 0,7 ppm, arba apie 38,9 %.	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> koncentracijos didėjimas gali būti būdingas žemos temperatūros terminiams procesams, tačiau vien šis rodiklis defekto tipo patikimai nenustato.
Etilenas, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , ppm	0,7	0,9	Padidėjo 0,2 ppm, arba apie 28,6 %.	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> koncentracijos didėjimas gali rodyti silpną aukštesnės temperatūros terminį poveikį, tačiau pokytis nėra pakankamas aiškiai terminio defekto išvadai pagrįsti.

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
Acetilenas, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , ppm	0,0	0,0	Reikšmingo pokyčio nenustatyta.	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> nesusidarė, todėl kibirkščiavimo, lankavimo arba aukštos energijos elektrinio išlydžio požymiai pagal DGA duomenis nepatvirtinami.
Anglies monoksidas, CO, ppm	431,6	649,4	Padidėjo 217,8 ppm, arba apie 50,5 %.	Ryškus CO koncentracijos padidėjimas gali būti siejamas su popierinės, arba celiuliozinės, izoliacijos senėjimu arba terminiu irimu.
Anglies dioksidas, CO <sub>2</sub> , ppm	1166,1	1745,3	Padidėjo 579,2 ppm, arba apie 49,7 %.	CO <sub>2</sub> koncentracijos didėjimas taip pat rodo celiuliozinės izoliacijos senėjimo arba irimo tendenciją.
DGA išvada	Dujų koncentracijos buvo palyginti mažos, tačiau CO ir CO <sub>2</sub> jau buvo reikšmingi izoliacijos senėjimo indikatoriai.	CO ir CO <sub>2</sub> koncentracijos reikšmingai padidėjo, o acetileno nesusidarė.	Dominuoja izoliacijos senėjimo arba terminio irimo tendencija.	DGA duomenyse vyrauja celiuliozinės izoliacijos senėjimo arba irimo požymiai. Aiškių PD, kibirkščiavimo ar lankinio proceso požymių pagal dujų sudėtį nenustatyta.
Bendras vertinimas				
Bendras vertinimas	AE ir RFI matavimuose išskirtos kelios stebėtinos zonos: pagal AE – valdymo spintos pusė, ypač taškas Nr. 8; pagal RFI – C fazė.	Pakartotiniuose AE matavimuose bendras aktyvumas sumažėjo, tačiau reikšmingiausias išliko taškas Nr. 8.	PD požymiai nėra stabilūs, o skirtingų diagnostikos metodų rezultatai tarpusavyje visiškai nesutampa.	Pagal AE ir RFI matavimus nustatyti tik indikaciniai galimi PD požymiai. RFI duomenyse ryškiausiai išsiskiria C fazė, tačiau AE matavimuose pagrindinis aktyvumas nustatytas valdymo spintos ir neutralės pusėse. Pirmųjų matavimų metu neutralės aktyvumas sutapo su pažeistu neutralės viršįtampių ribotuvu, o po jo pakeitimo pakartotiniuose AE matavimuose didelio aktyvumo nebefiksuota.
Galutinė bendra išvada	Užfiksuoti atskiri galimi PD požymiai, tačiau jie nėra pakankamai nuoseklūs.	Pakartotiniuose AE matavimuose aiškaus aktyvumo stiprėjimo nenustatyta.	Aktyvaus PD defekto požymiai nepatvirtinti.	PD metodai leidžia išskirti atskiras stebėtinas zonas, tačiau AE ir RFI rezultatai tarpusavyje visiškai nesutampa, o pakartotiniuose AE matavimuose aktyvumas sumažėjo. DGA duomenyse acetileno nesusidarė, vandenilio koncentracija nedidėjo, todėl aiškių kibirkščiavimo, lankavimo arba aktyvaus elektrinio išlydžio požymių nenustatyta. Kadangi reikšmingiausiai didėjo CO ir CO <sub>2</sub> koncentracijos, šiuo etapu labiau tikėtinas celiuliozinės izoliacijos senėjimo arba terminio irimo procesas.
Diagnostinis suderinamumas	AE ir RFI požymiai iš dalies rodo galimą lokalizuotą aktyvumą,	DGA pokyčiai labiau atitinka izoliacijos senėjimo arba terminio	Diagnostinis suderinamumas	PD matavimų rezultatai rodo galimą lokalizuotą aktyvumą, tačiau šio aktyvumo lokalizacija

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
	tačiau jų lokalizacija skiriasi.	irimo tendenciją, o ne aktyvų PD procesą.	vertintinas kaip žemas arba ribotas.	nėra vienareikšmė. Neutralės viršįtampių ribotuvo pakeitimas parodė, kad dalis pirmojo matavimo aktyvumo galėjo būti susijusi su konkrečiu lokalizuotu defektu. Vis dėlto DGA duomenys labiau atitinka celiuliozinės izoliacijos senėjimo arba terminio irimo procesus ir nerodo aiškios elektrinio išlydžio tendencijos.
Rekomendacija	Tęsti AE, RFI ir DGA stebėseną, ypatingą dėmesį skiriant C fazei, taškui Nr. 8, valdymo spintos pusei ir neutralės įrangos būklei.	Pakartoti AE ir RFI matavimus po eksploatacinio laikotarpio, siekiant įvertinti, ar aktyvumas atsinaujina arba stiprėja.	Stebėti CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ir C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> koncentracijų dinamiką.	Rekomenduojama tęsti periodinę PD ir DGA stebėseną. Prioritetas turėtų būti skiriamas celiuliozinės izoliacijos senėjimo požymių vertinimui pagal CO ir CO <sub>2</sub> koncentracijų kitimą. Jeigu ateityje atsirastų C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> arba pradėtų didėti H <sub>2</sub> koncentracija, reikėtų atlikti papildomus PD lokalizavimo matavimus ir detalesnę C fazės, valdymo spintos pusės bei neutralės grandinės įrangos patikrą.

14 lentelėje pateiktas 400 kV šuntinio reaktoriaus PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas parodė, kad tiriamame įrenginyje užfiksuoti atskiri galimi dalinių išlydžių požymiai, tačiau jie nėra pakankamai nuoseklūs ir stabiliai intensyvėjantys. Pirmojo matavimo metu reikšmingesni požymiai nustatyti C fazėje pagal RFI duomenis, valdymo spintos pusėje pagal AE duomenis ir neutralės pusėje, kur aktyvumas sutapo su pažeistu neutralės viršįtampių ribotuvu. Po šio ribotuvo pakeitimo pakartotiniuose AE matavimuose neutralės pusėje didelio aktyvumo nebefiksuota, todėl dalis pirminių PD požymių gali būti siejama su pašalintu lokaliu defektu.

DGA rezultatai rodo, kad dominuojanti diagnostinė tendencija yra susijusi ne su aktyviu elektrinio išlydžio procesu, o su celiuliozinės izoliacijos senėjimu arba terminiu irimu. Tai pagrindžia reikšmingas CO koncentracijos padidėjimas nuo 431,6 iki 649,4 ppm ir CO<sub>2</sub> koncentracijos padidėjimas nuo 1166,1 iki 1745,3 ppm. Tuo pačiu metu C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> koncentracija išliko lygi 0,0 ppm, o H<sub>2</sub> koncentracija nežymiai sumažėjo, todėl kibirkščiavimo, lankavimo arba aukštos energijos elektrinio defekto požymiai nepatvirtinami.

Bendras diagnostinis suderinamumas tarp PD matavimų ir DGA rezultatų vertintinas kaip žemas arba ribotas. PD metodai leidžia išskirti atskiras stebėtinas zonas, tačiau jų lokalizacija pagal AE ir RFI metodus nėra vienoda, o pakartotiniuose AE matavimuose aktyvumas sumažėjo. DGA duomenys labiau atitinka izoliacijos senėjimo arba terminio irimo tendenciją. Dėl šios priežasties rekomenduojama tęsti periodinę AE, RFI ir DGA stebėseną, ypatingą dėmesį skiriant CO ir CO<sub>2</sub> koncentracijų dinamikai, C fazės būklei, valdymo spintos pusei bei neutralės grandinės įrangai.

Dėl šios priežasties šio įrenginio diagnostinis suderinamumas vertinamas kaip žemas, tačiau neutralės ribotuvo atvejis patvirtina PD matavimų naudą ankstyvam lokalių defektų nustatymui.

**15 lentelė.** 330 kV autotransformatoriaus AT-1 PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
PD požymių duomenys				
AE aktyvumas	Nr. 1 – iki 115 mV; Nr. 18 – iki 75 mV; Nr. 19 – iki 36 mV, todėl šis taškas taip pat laikytinas stebėtinu.	Nr. 1 – iki 100 mV; Nr. 18 – iki 75 mV.	Aktyvumas iš esmės nekito arba nežymiai sumažėjo.	Išlieka pasikartojantis akustinės emisijos aktyvumas, ypač taškuose Nr. 1 ir Nr. 18. Pakartotinio matavimo duomenys aiškiau AE aktyvumo didėjimo nepatvirtina.
RFI aktyvumas	330 kV A fazė: 80–180, 250–350 ir 400–500 MHz; 330 kV B fazė: 40–70, 250–350 ir 400–550 MHz; 110 kV C fazė: 40–150 ir 400–470 MHz; OLTC: 40–100, 180–230 ir 380–470 MHz.	Duomenys nepateikti.	RFI aktyvumo dinamika nevertinama.	Pirminis RFI matavimas leido identifikuoti reikšmingas stebėtinas zonas, ypač 330 kV A fazę ir OLTC sritį. Tačiau, nesant pakartotinio RFI matavimo, šio aktyvumo kitimo vertinti negalima.
Tikėtina PD požymių lokalizacija	330 kV A fazė ir apkrovos atšakų perjungiklio zona; papildomai stebėtinos 330 kV B ir 110 kV C fazės.	Pagal AE duomenis stebėtinos išlieka 330 kV A fazės ir apkrovos atšakų perjungiklio zonos.	Pagrindinės stebėtinos zonos išlieka tos pačios.	Reikšmingiausios stebėtinos zonos yra 330 kV A fazė ir apkrovos atšakų perjungiklio, arba OLTC, sritis.
PD požymių išvada	Nustatytas lokalizuotas AE ir RFI aktyvumas, labiausiai išreikštas 330 kV A fazės ir OLTC zonose.	Pakartotiniai AE matavimai rodo, kad aktyvumas šiose zonose išlieka.	Aktyvumas vertintinas kaip gana stabilus; ryškus AE aktyvumo didėjimas nepatvirtintas.	PD diagnostikos duomenys rodo pasikartojantį lokalizuotą aktyvumą. Labiausiai stebėtinos zonos yra 330 kV A fazė ir apkrovos atšakų perjungiklio sritis.
DGA duomenys				
Vandenilis, H <sub>2</sub> , ppm	12,2	11,8	Sumažėjo 0,4 ppm, arba apie 3,3 %.	Vandenilio koncentracijos didėjimas nenustatytas, todėl PD tipo defekto požymiai pagal H <sub>2</sub> koncentraciją neišryškėja.
Metanas, CH <sub>4</sub> , ppm	8,3	8,9	Padidėjo 0,6 ppm, arba apie 7,2 %.	Nedidelis CH <sub>4</sub> koncentracijos padidėjimas gali būti siejamas su elektriniu arba mišriu defektu, tačiau vien šis rodiklis defekto tipo patikimai nenustato.
Etanas, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , ppm	1,9	0,2	Sumažėjo 1,7 ppm, arba apie 89,5 %.	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> koncentracijos sumažėjimas nepatvirtina žemos temperatūros terminio proceso intensyvėjimo.
Etilenas, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , ppm	2,0	2,3	Padidėjo 0,3 ppm, arba apie 15,0 %.	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> koncentracijos padidėjimas nėra didelis, tačiau gali būti vertinamas kaip papildomas terminio arba mišraus defekto požymis.
Acetilenas, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , ppm	0,2	2,3	Padidėjo 2,1 ppm, arba apie 1050 %.	Tai reikšmingiausias DGA pokytis. Ryškus C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracijos padidėjimas ir dujų santykių analizė leidžia daryti prielaidą apie D2 tipo defektą – aukštos energijos išlydžius arba lankavimą.

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
Anglies monoksidas, CO, ppm	462,2	506,0	Padidėjo 43,8 ppm, arba apie 9,5 %.	CO koncentracijos padidėjimas yra stebėtinai, tačiau pagal taikytą vertinimo metodiką popierinės izoliacijos irimo požymiai nėra patvirtinti.
Anglies dioksidas, CO <sub>2</sub> , ppm	2087,0	2027,0	Sumažėjo 60,0 ppm, arba apie 2,9 %.	CO <sub>2</sub> koncentracija sumažėjo, o CO <sub>2</sub> /CO santykis išlieka įprastose ribose, todėl celiuliozinės izoliacijos irimo požymiai nepatvirtinami.
DGA santykių išvada	Pirmojo matavimo rezultatai aiškiai neatitiko vieno konkretaus gedimo tipo pagal taikytas santykių ribas.	Pakartotinio matavimo rezultatai priskiriami D2 defekto tipui – aukštos energijos išlydžiams arba lankavimui.	Defekto pobūdis aiškėja elektrinio, aukštos energijos išlydžio kryptimi.	Pagal trijų pagrindinių dujų santykių analizę pakartotinio matavimo rezultatai priskirtini D2 defekto tipui: C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> = 1, CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> ≈ 0,75, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ≈ 11,5.
DGA išvada	Pradiniame matavime elektrinio defekto požymiai nebuvo aiškiai išreikšti, o C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracija buvo labai maža.	Pakartotiniame matavime nustatytas reikšmingas C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracijos padidėjimas; bendra DGA išvada – D2 tipo defektas.	Ryškėja aukštos energijos elektrinio defekto kryptis.	DGA duomenys rodo D2 tipo elektrinio defekto požymius. Papildomai būtina stebėti CO koncentracijos kitimą, tačiau popierinės izoliacijos irimas pagal turimus duomenis nėra patvirtintas.
Bendras vertinimas				
Bendras vertinimas	PD metodais nustatytos stebėtinai zonos, ypač 330 kV A fazės ir apkrovos atšakų perjungiklio srityse.	Pakartotiniai AE matavimai rodo, kad šiose zonose aktyvumas išlieka.	PD požymiai išlieka gana stabilūs, o DGA duomenys rodo stiprėjančią elektrinio defekto kryptį.	AE ir RFI lokalizacijos rezultatai bei DGA D2 išvada tarpusavyje neprieštarauja. DGA rezultatai sustiprina elektrinio pobūdžio defekto prielaidą, tačiau tiksliai defekto vietai nustatyti jų nepakanka.
Galutinė bendra išvada	Pirmojo matavimo metu pagal AE ir RFI požymius nustatytos aiškios stebėtinai zonos.	Pakartotiniai AE matavimai patvirtina, kad aktyvumas pagrindinėse zonose išlieka; pakartotinio DGA vertinimo išvada – D2 tipo defektas.	Elektrinio pobūdžio defekto požymiai sustiprėjo pagal DGA rezultatus, tačiau AE amplitudės didėjimas nepatvirtintas.	PD diagnostikos metodai rodo pasikartojantį lokalizuotą aktyvumą 330 kV A fazės ir OLTC srityje. DGA duomenys reikšmingai sustiprina elektrinio pobūdžio defekto prielaidą, nes C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracija padidėjo nuo 0,2 iki 2,3 ppm, o bendra DGA išvada atitinka D2 tipą – aukštos energijos išlydžius arba lankavimą. Popierinės izoliacijos irimo požymiai pagal turimus duomenis nepatvirtinti.
Diagnostinis suderinamumas	AE ir RFI metodais nustatyti požymiai rodo lokalizuotą aktyvumą 330 kV A fazės ir OLTC zonose.	Pakartotinis DGA vertinimas parodė D2 tipo elektrinio defekto požymius.	Suderinamumas vertintinas kaip vidutiniškai aukštas.	Diagnostinių metodų suderinamumas vertintinas kaip vidutiniškai aukštas: PD metodai leidžia identifikuoti lokalizuotas aktyvias zonas, o DGA rezultatai patvirtina elektrinio pobūdžio defekto kryptį. Vis dėlto pakartotinio RFI matavimo nėra, o AE amplitudė reikšmingai nedidėjo, todėl labai aukšto suderinamumo konstatuoti nerekomenduojama.

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
Rekomendacija	Tęsti AE, RFI ir DGA stebėseną.	Pakartoti DGA ir PD matavimus, prioritetą skiriant 330 kV A fazei ir OLTC zonai.	Stebėti C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , CO koncentracijų ir AE aktyvumo dinamiką.	Rekomenduojama sutrumpinti DGA kontrolės intervalą, pakartoti RFI matavimą ir, jeigu C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracija toliau didėtų arba AE/RFI aktyvumas stiprėtų, planuoti detalesnę OLTC bei 330 kV A fazės mazgų techninę patikrą.

15 lentelėje pateiktas 330 kV autotransformatoriaus AT-1 PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas parodė, kad dalinių išlydžių požymiai yra pasikartojantys ir lokalizuoti. Reikšmingiausios stebėtinos zonos nustatytos 330 kV A fazėje ir apkrovos atšakų perjungiklio, arba OLTC, srityje. Pakartotiniai AE matavimai nepatvirtino ryškaus aktyvumo didėjimo, tačiau parodė, kad aktyvumas pagrindinėse zonose išlieka.

DGA rezultatai rodo aiškesnę elektrinio pobūdžio defekto kryptį. Ypač reikšmingas yra acetileno C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> koncentracijos padidėjimas nuo 0,2 iki 2,3 ppm, kuris kartu su dujų santykių analize leidžia defektą priskirti D2 tipui, t. y. aukštos energijos išlydžiams arba lankavimui. PD diagnostikos ir DGA rezultatų suderinamumas vertintinas kaip vidutiniškai aukštas, nes PD metodai leidžia išskirti tikėtinas aktyvumo zonas, o DGA duomenys pagrindžia elektrinio defekto pobūdį. Vis dėlto, nesant pakartotinio RFI matavimo ir nepadidėjus AE amplitudei, galutinė defekto vieta ir jo intensyvėjimo mastas turėtų būti tikslinami papildomais matavimais.

**16 lentelė.** 330 kV autotransformatoriaus AT-2 PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
PD požymių duomenys				
AE aktyvumas	Nr. 6 – iki 200 mV; Nr. 5 – iki 150 mV; Nr. 17 išsiskyrė pagal pusperiodinį pasikartojimą.	Nr. 3 – iki 47 mV; Nr. 18 – iki 45 mV.	Pagal amplitudę AE aktyvumas sumažėjo, tačiau visiškai neišnyko.	Pakartotinių matavimų metu AE aktyvumas išliko, tačiau buvo silpnesnis negu pirmojo matavimo metu. Tai rodo, kad dalinių išlydžių požymiai nėra intensyvėjantys pagal AE amplitudę.
RFI aktyvumas	110 kV C fazė: 40–120 MHz; neutralė: 40–120, 180–230 ir 350–450 MHz; OLTC: 40–150, 180–250 ir 380–470 MHz.	Duomenys nepateikti.	RFI aktyvumo dinamika nevertinama.	Pirminio RFI matavimo metu nustatytas vidutinio stiprumo aktyvumas. Ryškiausia stebėtina zona – apkrovos atšakų perjungiklio, arba OLTC, sritis. Nesant pakartotinio RFI matavimo, aktyvumo kitimo patikimai vertinti negalima.
Tikėtina PD požymių lokalizacija	110 kV C fazė, apkrovos atšakų perjungiklio zona ir papildomai neutralės sritis.	Pagal pakartotinius AE matavimus stebėtinos 330 kV B fazės ir apkrovos atšakų perjungiklio zonos.	Lokalizacija iš dalies pakito, tačiau OLTC zona išliko stebėtina.	Reikšmingiausia bendra stebėtina zona yra apkrovos atšakų perjungiklio sritis, nes ji išskiriama skirtingais diagnostikos etapais.
PD požymių išvada	Nustatytas lokalizuotas AE ir RFI aktyvumas, labiausiai siejamas su OLTC,	Pakartotinio AE matavimo metu aktyvumas išliko, tačiau jo amplitudė buvo mažesnė.	Vertinamas silpnas arba vidutinio stiprumo lokalizuotas aktyvumas.	PD diagnostikos duomenys rodo silpną arba vidutinio stiprumo lokalizuotą aktyvumą. Reikšmingiausia bendra stebėtina

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
	110 kV C fazės ir neutralės zonomis.			zona yra apkrovos atšakų perjungiklio sritis.
DGA duomenys				
Vandenilis, H <sub>2</sub> , ppm	6,9	12,3	Padidėjo 5,4 ppm, arba apie 78,3 %.	H <sub>2</sub> koncentracijos padidėjimas gali būti siejamas su daliniais išlydziais arba kitu elektrinio pobūdžio aktyvumu.
Metanas, CH <sub>4</sub> , ppm	1,3	2,6	Padidėjo 1,3 ppm, arba apie 100 %.	CH <sub>4</sub> koncentracijos padidėjimas gali būti susijęs su žemos energijos elektriniu procesu arba silpnu terminiu poveikiu.
Etanas, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , ppm	2,9	3,6	Padidėjo 0,7 ppm, arba apie 24,1 %.	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> koncentracijos didėjimas gali būti būdingas žemos temperatūros terminiams procesams, tačiau vien šis rodiklis defekto tipo patikimai nenustato.
Etilenas, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , ppm	0,9	0,9	Reikšmingo pokyčio nenustatyta.	Aukštesnės temperatūros terminio proceso intensyvėjimo pagal C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> koncentraciją nenustatyta.
Acetilenas, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , ppm	0,2	0,1	Sumažėjo 0,1 ppm, arba apie 50 %.	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracijos sumažėjimas nepatvirtina aukštos energijos elektrinio defekto, kibirkščiavimo ar lankavimo požymių.
Anglies monoksidas, CO, ppm	50,5	92,4	Padidėjo 41,9 ppm, arba apie 83,0 %.	CO koncentracijos didėjimas gali būti siejamas su celiuliozinės, arba popierinės, izoliacijos senėjimu arba silpnu terminiu poveikiu.
Anglies dioksidas, CO <sub>2</sub> , ppm	525,0	725,0	Padidėjo 200,0 ppm, arba apie 38,1 %.	CO <sub>2</sub> koncentracijos didėjimas taip pat gali rodyti celiuliozinės izoliacijos senėjimo arba terminio poveikio požymius.
DGA išvada	Pradiniame matavime dujų koncentracijos buvo mažos, todėl aiškūs elektrinio ar terminio defekto požymiai nenustatyti.	Pakartotiniame matavime padidėjo H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CO ir CO <sub>2</sub> koncentracijos.	Ryškėja silpno elektrinio aktyvumo ir izoliacijos senėjimo tendencija.	DGA duomenys rodo silpno elektrinio aktyvumo požymius, ypač dėl H <sub>2</sub> ir CH <sub>4</sub> koncentracijų didėjimo. Kartu CO ir CO <sub>2</sub> koncentracijų augimas gali būti siejamas su celiuliozinės izoliacijos senėjimu arba silpnu terminiu poveikiu. C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracijos mažėjimas nerodo lankinio ar aukštos energijos elektrinio defekto vystymosi.
Bendras vertinimas				
Bendras vertinimas	Pirmojo matavimo metu PD metodais išskirtos kelios stebėtinos zonos: 110 kV C fazė, neutralė ir apkrovos atšakų perjungiklio zona.	Pakartotiniuose AE matavimuose aktyvumas išliko, tačiau amplitudės buvo mažesnės, o lokalizacija iš dalies pakito.	Dominuoja silpno elektrinio aktyvumo ir izoliacijos senėjimo požymių derinys.	AE ir RFI rezultatai leidžia išskirti stebėtinas zonas, tačiau jų lokalizacija tarp matavimo etapų nėra visiškai stabili. DGA duomenyse padidėjo H <sub>2</sub> ir CH <sub>4</sub> koncentracijos, todėl galima silpno elektrinio aktyvumo kryptis. Vis dėlto C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracija sumažėjo, todėl aukštos energijos išlydzio, kibirkščiavimo ar lankavimo

Rodiklis	Pirmasis matavimas	Pakartotinis matavimas	Pokytis / tendencija	Diagnostinė interpretacija
				požymiai nepatvirtinami. CO ir CO <sub>2</sub> koncentracijų didėjimas rodo galimą celiuliozinės izoliacijos senėjimą arba silpną terminį poveikį.
Galutinė bendra išvada	Pirmųjų matavimų metu nustatytas silpnas arba vidutinio stiprumo lokalizuotas AE ir RFI aktyvumas, labiausiai siejamas su 110 kV C faze, neutrale ir OLTC zona.	Pakartotiniuose AE matavimuose aktyvumas išliko, tačiau buvo silpnesnis ir iš dalies persiskirstė į kitas zonas.	Aktyvaus aukštos energijos elektrinio defekto požymiai nepatvirtinti.	PD diagnostikos metodai rodo silpną arba vidutinio stiprumo lokalų aktyvumą, tačiau šis aktyvumas nėra stabiliai didėjantis. DGA duomenys iš dalies rodo silpno elektrinio aktyvumo kryptį dėl H <sub>2</sub> ir CH <sub>4</sub> koncentracijų augimo, tačiau C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracijos sumažėjimas nepatvirtina kibirkščiavimo ar lankavimo proceso. Bendras vertinimas leidžia teigti, kad įrenginyje labiau tikėtinas silpnas elektrinis aktyvumas kartu su celiuliozinės izoliacijos senėjimo arba silpno terminio poveikio požymiais.
Diagnostinis suderinamumas	PD metodai rodo lokalizuotą aktyvumą, tačiau jis nėra toks ryškus kaip kitų labiau išreikštų defektų atvejais.	DGA duomenys rodo silpno elektrinio aktyvumo ir izoliacijos senėjimo požymių derinį.	Diagnostinis suderinamumas vertintinas kaip ribotas arba vidutinis.	Diagnostinis suderinamumas tarp PD matavimų ir DGA duomenų vertintinas kaip ribotas arba vidutinis. PD požymiai leidžia išskirti stebėtiną zoną, o H <sub>2</sub> ir CH <sub>4</sub> koncentracijų augimas gali rodyti silpną elektrinį aktyvumą. Tačiau lokalizacijos pokyčiai, pakartotinio RFI matavimo nebuvimas ir C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracijos sumažėjimas neleidžia patvirtinti aukštos energijos elektrinio defekto.
Rekomendacija	Tęsti AE, RFI ir DGA stebėseną, ypatingą dėmesį skiriant OLTC, 110 kV C fazės ir neutralės zonoms.	Pakartoti AE ir RFI matavimus, siekiant patikslinti aktyvumo lokalizaciją.	Stebėti H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub> ir C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracijų dinamiką.	Rekomenduojama tęsti periodinę PD ir DGA stebėseną. Prioritetas turėtų būti skiriamas OLTC zonai, nes ji išlieka bendra stebėtina sritis skirtinguose diagnostikos etapuose. Jeigu ateityje didėtų C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> koncentracija arba stiprėtų AE/RFI aktyvumas, reikėtų atlikti detalesnę OLTC ir susijusių kontaktinių mazgų techninę patikrą.

16 lentelėje pateiktas 330 kV autotransformatoriaus AT-2 PD ir DGA rezultatų bendras vertinimas parodė, kad tiriamame autotransformatoriuje nustatytas silpnas arba vidutinio stiprumo lokalizuotas aktyvumas. Pirmojo matavimo metu stebėtiną zoną buvo siejama su 110 kV C faze, neutralės sritimi ir apkrovos atšakų perjungikliu. Pakartotinių AE matavimų metu aktyvumas išliko, tačiau jo amplitudė buvo mažesnė, o lokalizacija iš dalies pakito. Tai leidžia teigti, kad PD požymiai nėra stabiliai intensyvėjantys.

DGA duomenys rodo H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO ir CO<sub>2</sub> koncentracijų didėjimą. H<sub>2</sub> ir CH<sub>4</sub> augimas gali būti siejamas su silpnu elektrinio pobūdžio aktyvumu, o CO ir CO<sub>2</sub> koncentracijų didėjimas – su celiuliozinės izoliacijos senėjimu arba silpnu terminiu poveikiu. Vis dėlto C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> koncentracija sumažėjo nuo 0,2 iki 0,1 ppm, todėl aukštos energijos elektrinio defekto, kibirkščiavimo ar lankavimo požymiai nepatvirtinami.

Bendras diagnostinis suderinamumas vertintinas kaip ribotas arba vidutinis. PD metodai leidžia išskirti stebėtinas zonas, tačiau jų lokalizacija nėra visiškai stabili, o pakartotinio RFI matavimo duomenų nėra. DGA rezultatai patvirtina silpno elektrinio aktyvumo ir galimo izoliacijos senėjimo kryptį, tačiau nepatvirtina aktyvaus aukštos energijos elektrinio defekto. Todėl rekomenduojama tęsti periodinę AE, RFI ir DGA stebėseną, prioritetą skiriant OLTC zonai ir dujų koncentracijų dinamikai.

Apibendrinant 14–16 lentelėse pateiktus rezultatus, galima teigti, kad dalinių išlydžių diagnostikos ir alyvos chromatografinės analizės duomenų kompleksinis vertinimas leido diferencijuoti tirtų įrenginių techninę būklę pagal defekto pobūdį ir diagnostinio patikimumo lygį. 400 kV šuntinio reaktoriaus atveju DGA rezultatuose dominuoja celiuliozinės izoliacijos senėjimo arba terminio irimo požymiai, o PD metodai pateikia tik ribotą šios būklės patvirtinimą. Dėl šios priežasties šio įrenginio diagnostinis suderinamumas vertintinas kaip žemas arba ribotas. Vis dėlto pirmųjų matavimų metu neutralės pusėje užfiksuotas aktyvumas ir nustatytas pažeistas neutralės viršįtampių ribotumas parodė, kad PD matavimai gali operatyviai atskleisti lokalų defektą dar tada, kai DGA pokyčiai nėra aiškūs arba pasireiškia tik vėliau.

330 kV AT-2 atveju nustatytas vidutinis diagnostinis suderinamumas. Dalinių išlydžių požymiai buvo užfiksuoti, tačiau jie nebuvo stabiliai intensyvėjantys, o cheminiai defekto požymiai alyvoje išliko silpni. DGA rezultatai labiau atitinka žemos energijos elektrinio aktyvumo ir izoliacijos senėjimo požymių derinį, tačiau aukštos energijos išlydžių, kibirkščiavimo ar lankavimo proceso nepatvirtina.

Ryškus diagnostinis suderinamumas nustatytas 330 kV AT-1 atveju. Šiame įrenginyje AE ir RFI matavimai išskyrė pasikartojantį lokalizuotą aktyvumą 330 kV A fazės ir OLTC srityje, o DGA rezultatai parodė aiškesnę elektrinio pobūdžio defekto kryptį. Reikšmingas  $C_2H_2$  koncentracijos padidėjimas ir DGA išvada, atitinkanti D2 tipo defektą, leidžia AT-1 atvejį vertinti kaip didžiausio diagnostinio prioriteto objektą.

Gauti rezultatai patvirtina, kad patikimiausias alyva izoliuotų aukštosios įtampos įrenginių techninės būklės vertinimas pasiekiamas tada, kai dalinių išlydžių matavimų ir DGA duomenys interpretuojami kompleksiskai, o ne vertinami atskirai. Toks požiūris leidžia tiksliau atskirti elektrinio ir terminio pobūdžio procesus, nustatyti prioritetines stebėsenos zonas ir pagrįsti tolesnius diagnostinius bei eksploatacinius sprendimus.

## Išvados

1. Atlikus autotransformatorių techninės būklės stebėsenos, pagrindinių defektų ir jų diagnostinių požymių literatūros analizę nustatyta, kad autotransformatorių patikimumą daugiausia lemia izoliacinės sistemos, apvijų, įvadų, apkrovos atšakų perjungiklio ir aušinimo sistemos techninė būklė. Pagrindiniai autotransformatorių defektai yra susiję su izoliacijos senėjimu, terminiais ir elektriniais pažeidimais, apvijų deformacijomis, įvadų bei perjungiklio gedimais. Kadangi ankstyvosiose stadijose šie defektai dažnai neturi aiškių išorinių požymių, jų nustatymui būtina taikyti kompleksinę diagnostiką, apimančią alyvoje ištirpusių dujų analizę, dalinių išlydžių, akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių duomenų vertinimą.
2. Išanalizavus alyvoje ištirpusių dujų analizės diagnostinę reikšmę nustatyta, kad DGA metodas yra viena svarbiausių priemonių autotransformatorių vidiniams terminiams ir elektriniams defektams identifikuoti. Vandenilio, metano, etano, etileno, acetileno, anglies monoksido ir anglies dioksido koncentracijų pokyčiai leidžia įvertinti defekto pobūdį, o Duvalio trikampio, Rogerso santykių ir raktinių dujų metodai padeda tiksliau nustatyti galimą gedimo tipą. Atlikto tyrimo metu reikšmingiausias DGA požymis nustatytas AT-1 autotransformatoriuje, kuriame acetileno koncentracija padidėjo nuo 0,2 ppm iki 2,3 ppm, o dujų santykių analizė parodė D2 tipo defekto, siejamo su aukštos energijos išlydžiais arba lankavimu, požymius.
3. Išnagrinėjus dalinių išlydžių diagnostikos principus nustatyta, kad akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių matavimo metodai yra tinkami eksploatuojamų autotransformatorių izoliacijos būklei vertinti. Tačiau šių metodų rezultatai turi būti interpretuojami įvertinant aplinkos foną, signalų pasikartojimą, jų fazinį pobūdį ir ryšį su konkrečiomis įrenginio konstrukcinėmis zonomis. Tyrimo metu nustatyta, kad vien didelė akustinio signalo amplitudė nėra pakankamas dalinių išlydžių požymis. Patikimesniu diagnostiniu kriterijumi laikytinas impulsų pasikartojimas dviejose 20 ms periodo dalyse, maždaug kas 10 ms, nes toks požymis leidžia atskirti galimą faziškai priklausomą dalinių išlydžių aktyvumą nuo foninio triukšmo ar atsitiktinių mechaninių virpesių.
4. Atlikus autotransformatorių AT-1, AT-2 ir 400 kV šuntinio reaktoriaus dalinių išlydžių matavimų analizę, naudojant mobiliąją diagnostinę įrangą DOBLE DFA300, nustatyta, kad tirtuose įrenginiuose dalinių išlydžių požymiai pasireiškia nevienodu intensyvumu ir skirtingose konstrukcinėse zonose. 400 kV šuntiniame reaktoriuje reikšmingiausi akustinės emisijos požymiai pirmųjų matavimų metu nustatyti taškuose Nr. 8 ir Nr. 10, AT-1 autotransformatoriuje – taškuose Nr. 1 ir Nr. 18, o AT-2 autotransformatoriuje – taške Nr. 17 pirmųjų matavimų metu bei taškuose Nr. 3 ir Nr. 18 pakartotinių matavimų metu. Šie rezultatai parodė, kad praktiniai dalinių išlydžių matavimai leidžia išskirti konkrečias stebėtinąs zonas, tačiau galutinis įrenginio būklės vertinimas turi būti atliekamas tik palyginus pakartotinių matavimų ir kitų diagnostikos metodų duomenis.
5. Įvertinus akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių matavimų rezultatus nustatyta, kad ryškiausi diagnostiniai požymiai pasireiškė AT-1 autotransformatoriuje ir 400 kV šuntiniame reaktoriuje. Šuntiniame reaktoriuje pirmųjų matavimų metu taške Nr. 7 akustinio signalo amplitudė siekė iki 200 mV, taške Nr. 8 – iki 170 mV, o taške Nr. 10 – iki 140 mV. Po neutralės viršįtampių ribotuvo pakeitimo neutralės pusėje didelio aktyvumo nebefiksuota. AT-1 autotransformatoriuje reikšmingiausios stebėtinąs zonos nustatytos 330 kV A fazės ir apkrovos atšakų perjungiklio srityse, kuriose dalinių išlydžių požymiai buvo pasikartojantys ir lokalizuoti. AT-2 autotransformatoriuje nustatytas silpnėsnis arba vidutinio intensyvumo lokalizuotas

aktyvumas, todėl šio įrenginio būklė vertintina kaip stebėtina, tačiau be aiškiai patvirtinto aukštos energijos elektrinio defekto.

6. Palyginus dalinių išlydžių matavimų rezultatus su alyvos dujų chromatografijos duomenimis nustatyta, kad didžiausias diagnostinis suderinamumas pasiektas AT-1 autotransformatoriuje. Akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių metodais šiame įrenginyje išskirtos 330 kV A fazės ir apkrovos atšakų perjungiklio zonos, o DGA duomenys patvirtino elektrinio pobūdžio defekto kryptį: acetileno koncentracija padidėjo nuo 0,2 ppm iki 2,3 ppm, o bendra DGA interpretacija atitiko D2 tipo defekto požymius. AT-2 autotransformatoriuje PD ir DGA rezultatų suderinamumas vertintinas kaip ribotas arba vidutinis, nes nustatyti silpno elektrinio aktyvumo ir izoliacijos senėjimo požymiai, tačiau acetileno koncentracijos didėjimas nebuvo patvirtintas. 400 kV šuntiniame reaktoriuje DGA duomenys nepatvirtino aktyvaus aukštos energijos elektrinio defekto, todėl šio įrenginio PD ir DGA rezultatų suderinamumas vertintinas kaip ribotas. Apibendrinant galima teigti, kad patikimiausias techninės būklės vertinimas gaunamas kompleksiskai derinant DGA, akustinės emisijos ir radijo dažnių trikdžių diagnostinius duomenis.

## Literatūros sąrašas

1. LITGRID. Perdavimo tinklo schema ir duomenys. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/energetikos-sistema/elektros-energetikos-sistemas-informacija/perdavimo-tinklo-schema-ir-duomenys/501>
2. LITGRID. Sinchronizacija. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/sinchronizacija/31072>
3. LITGRID. Lietuvos elektros perdavimo tinklų 10 metų plėtros planas. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://www.litgrid.eu/index.php/tinklo-pletra/lietuvos-elektros-perdavimo-tinklo-10-metu-pletros-planas/113>
4. BEHESHTI ASL, M., I. FOFANA ir F. MEGHNEFI. Review of Various Sensor Technologies in Monitoring the Condition of Power Transformers. *Energies*, 2024, 17(14), 3533. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17143533>
5. CIGRE WORKING GROUP A2.37. Transformer Reliability Survey. Technical Brochure 642. Paris: CIGRE, 2015. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/642-transformer-reliability-survey.html>
6. PICHER, P., M. GAUVIN, L. VOULIGNY, A. ZINFLOU, É. FRENETTE, S. PROULX ir C. RAJOTTE. Development and Implementation of Transformer Condition Monitoring Models for the Interpretation of Sensor and SCADA Data CIGRE Science & Engineering, 2023/2024, no. 27. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://cse.cigre.org/cse-n027/d1-development-and-implementation-of-transformer-condition-monitoring-models-for-the-interpretation-of-sensor-and-scada-data.html>
7. ACIKGOZ, N., M. H. SAZLI ir I. KOSALAY. A Comprehensive Review of Transformer Fault Diagnosis Studies Based on Dissolved Gas Analysis: Classical Methods, Historical Development of the Devices Used, Artificial Intelligence Based Methods, Accuracy of Classifications of Predictions. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2025, 31(3), p. 4–21. DOI: <https://doi.org/10.5755/j02.eie.39824>
8. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60599:2022 Mineral Oil-Filled Electrical Equipment in Service – Guidance on the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis Geneva: IEC, 2022. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/66491>
9. THANGO, B. A. Winding Fault Detection in Power Transformers Based on Support Vector Machine and Discrete Wavelet Transform Approach. *Technologies*, 2025, 13(5), 200. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies13050200>
10. BEHESHTI ASL, M., I. FOFANA ir F. MEGHNEFI. A Comprehensive Review of Transformer Winding Diagnostics: Integrating Frequency Response Analysis with Machine Learning Approaches. *Energies*, 2025, 18(5), 1209. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18051209>
11. WANG, S., Z. HONG, Q. MIN, D. ZOU, Y. ZHAO, R. QI ir T. ZHAO. Diagnosis of Power Transformer On-Load Tap Changer Mechanical Faults Based on SABO-Optimized TVFEMD and TCN-GRU Hybrid Network. *Energies*, 2025, 18(11), 2934. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18112934>
12. ZEMOURI, R. Power Transformer Prognostics and Health Management Using Machine Learning: A Review and Future Directions. *Machines*, 2025, 13(2), 125. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020125>

13. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60567:2023 Oil-Filled Electrical Equipment – Sampling of Gases and Analysis of Free and Dissolved Gases – Guidance Geneva: IEC, 2023. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/70013>
14. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements. Geneva: IEC, 2015. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/23841>
15. SIKORSKI, W. ir J. GIELNIAK. Online Monitoring of Partial Discharges in Large Power Transformers Using Ultra-High Frequency and Acoustic Emission Methods: Case Studies. *Energies*, 2025, 18(7), 1718. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071718>
16. CHEN, L., Y. WEN, H. SU, K. XIONG ir D. CHEN. Research on Partial Discharge Signal Recognition and Classification of Power Transformer Based on Acoustic-VMD and CNN-LSTM. *PLOS One*, 2025, 20(11), e0335447. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0335447>
17. CIGRE. Guide for Electrical Partial Discharge Measurements in Compliance with IEC 60270 Technical Brochure 366. Paris: CIGRE, 2008. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/366-guide-for-electrical-partial-discharge-measurements-in-compliance-to-iec-60270.html>
18. KUMAR, C., B. GANGULY, D. DEY ir S. CHATTERJEE. Recent Trends and Open Challenges in Acoustic Partial Discharge Signal Denoising Techniques: A Review. *Electric Power Systems Research*, 2025, 248, 111931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111931>
19. CIGRE. Guidelines for Partial Discharge Detection Using Conventional (IEC 60270) and Unconventional Methods [interaktyvus]. Technical Brochure 662. Paris: CIGRE, 2016. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://e-cigre.org/publication/662-guidelines-for-partial-discharge-detection-using-conventional-iec-60270-and-unconventional-methods>
20. SIEGEL, M., et al. Comparison between Electrical and UHF PD Measurement in Power Transformers. University of Stuttgart / CMD Korea, 2014. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.4769.0245>
21. SANCHEZ, J. EDF Hydro's approach to monitoring [interaktyvus]. *Transformers Magazine*, 2024, 11(1), p. 64–70. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://transformers-magazine.com/magazine/edf-hydros-approach-to-monitoring/>
22. MOHAMMADIRAD, A., A. A. SHAYEGANI AKMAL ir M. H. SAMIMI. A Novel Method to Enhance Partial Discharge Localization Accuracy Using Sectional Winding Analysis and a Neural Network-Based Learning Vector Quantization Model. *Electric Power Systems Research*, 2025, 241, 111292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111292>
23. MASCHINENFABRIK REINHAUSEN (MR). OLTC Monitoring VAM / DGA: Vibroacoustic Monitoring of On-Load Tap Changers 2026. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: [https://www.reinhausen.com/fileadmin/downloadcenter/services/oltc\\_services/remote\\_services/flyer/remotesolutions\\_en.pdf](https://www.reinhausen.com/fileadmin/downloadcenter/services/oltc_services/remote_services/flyer/remotesolutions_en.pdf)
24. IEEE. IEEE Std C57.104-2019 Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers New York: IEEE, 2019. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.104/7476/>
25. DLADLA, V. M. N., B. A. THANGO-MABIZELA. Fault Classification in Power Transformers via Dissolved Gas Analysis and Machine Learning Algorithms: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 2025, 15(5), 2395. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15052395>

26. WEN, H., M. S. ABU TALIP, M. OTHMAN, S. M. K. AZAM, M. MOHAMAD, M. F. IBRAHIM, H. AROF ir A. ABABNEH. Advanced Signal Processing Methods for Partial Discharge Analysis: A Review. *Sensors*, 2025, 25(23), 7318. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25237318>
27. TANJIM, R., T. AHMED, M. MOSTAFA ir B. B. PATHIK. A CatBoost-Based Framework for Data-Driven Fault Diagnosis in Power Transformers Using Dissolved Gas Analysis. *Results in Engineering*, 2026, 30, 109972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109972>
28. KHODAVEISI, F., H. KARAMI, M. ZAREI KARIMPOUR, M. RUBINSTEIN ir F. RACHIDI. Partial Discharge Localization in Power Transformer Tanks Using Machine Learning Methods. *Scientific Reports*, 2024, 14, 11785. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62527-9>
29. ARAYA, S. T., J. ARDILA-REY, M. CERDA LUNA, J. PORTILLA, S. GOVINDARAJAN, C. ALVEAR JORQUERA ir R. SCHURCH. Performance Assessment of Machine Learning Techniques in Electronic Nose Systems for Power Transformer Fault Detection. *Energy and AI*, 2025, 20, 100497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100497>
30. LAI, J., et al. A Hybrid Optimization Model for Transformer Fault Diagnosis Based on Gas Classification. *Digital*, 2026, 6(1), 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/digital6010024>
31. SUTIKNO, H., R. A. PRASOJO ir A. ABU-SIADA. Machine Learning Based Multi-Method Interpretation to Enhance Dissolved Gas Analysis for Power Transformer Fault Diagnosis. *Heliyon*, 2024, 10(4), e25975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25975>
32. IEEE. IEEE Std C57.143-2024 Guide for Application of Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components [interaktyvus]. New York: IEEE, 2025. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://standards.ieee.org/ieee/C57.143/6961/>
33. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076-1:2011 Power Transformers – Part 1: General [interaktyvus]. Geneva: IEC, 2011. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/588>
34. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60076-7:2018 Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Mineral-Oil-Immersed Power Transformers [interaktyvus]. Geneva: IEC, 2018. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/34351>
35. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60422:2013 Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment – Supervision and Maintenance Guidance [interaktyvus]. Geneva: IEC, 2013. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/2110>
36. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC TS 62478:2016 High Voltage Test Techniques – Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods [interaktyvus]. Geneva: IEC, 2016. [žiūrėta 2026-05-07]. Prieiga per internetą: <https://webstore.iec.ch/en/publication/25740>
37. DUVAL, M. A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18(3), p. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2002.1014963>
38. MARKALOUS, S. M., S. TENBOHLEN ir K. FESER. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers Using Acoustic and Electromagnetic Signals. *IEEE*

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(6), p. 1576–1583. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4712660>
39. LUNDGAARD, L. E. Partial Discharge. XIII. Acoustic Partial Discharge Detection – Fundamental Considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4), p. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.1109/57.145095>
40. KULKARNI, S. V. ir S. A. KHAPARDE. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1201/b13011>
41. HU, D., Y. YANG, H. DAI, C. TANG ir J. XIE. An interpretable machine learning method for fault diagnosis of oil-immersed transformers based on edge inference. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 168, 110647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110647>

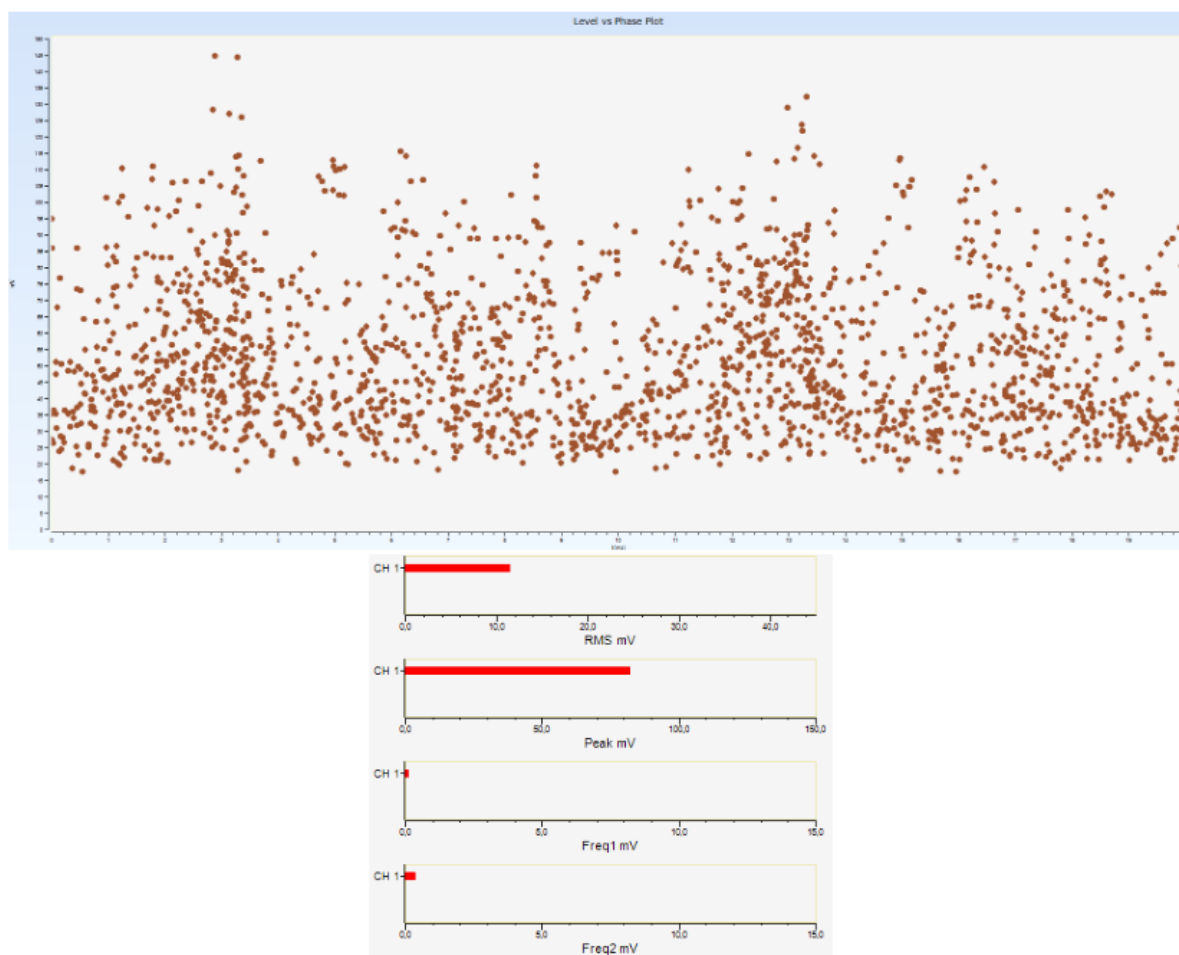
## Priedai

### 1 priedas. AT-1 matavimai

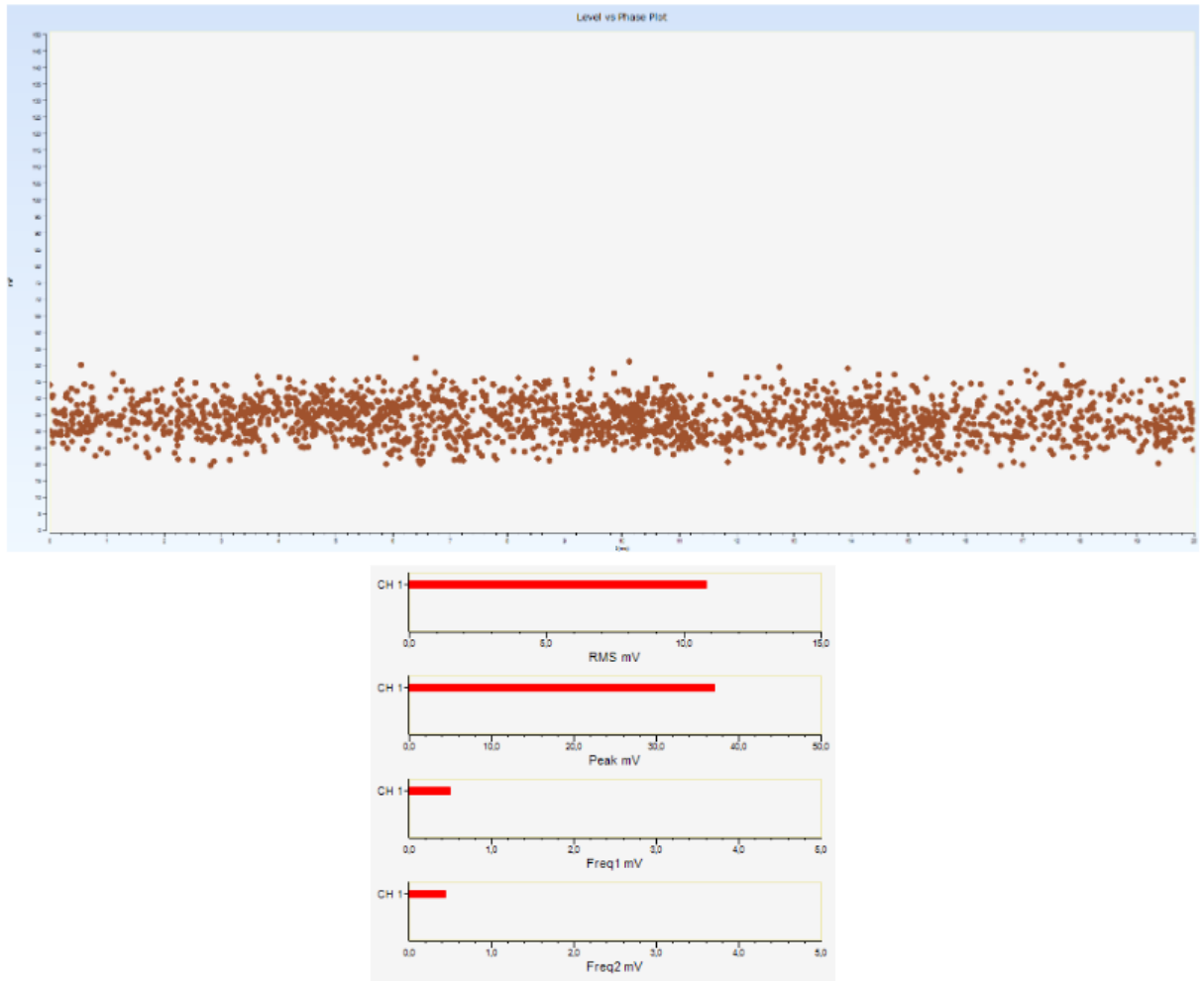
Alytaus TP transformatorių dalinių išlydžių registravimo rezultatai (akustinis).

DI registravimui buvo nustatyta 5000 taškų. Apačios aukštis - ~1,5 m, Viršaus - ~2,8 - 3 m.

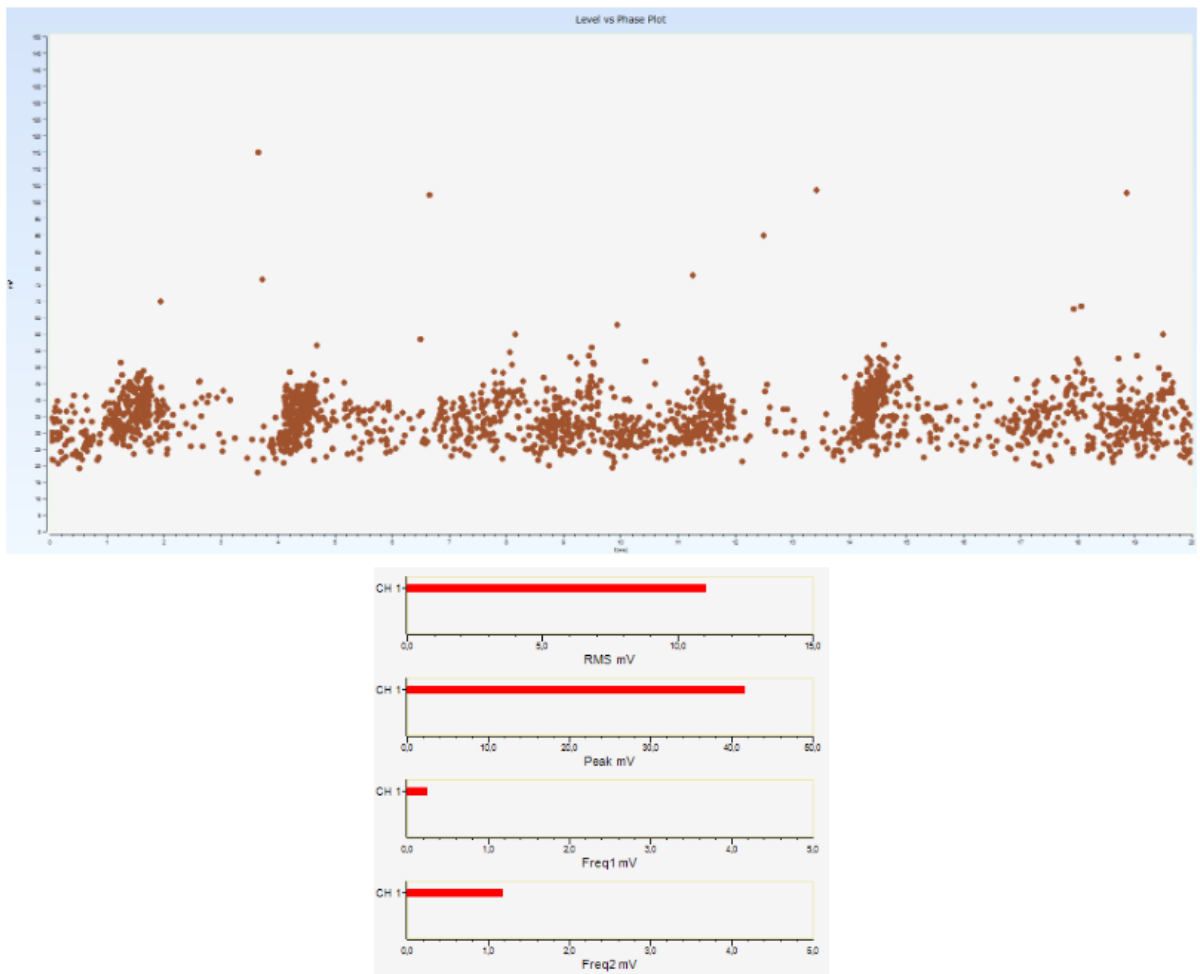
### AT-1



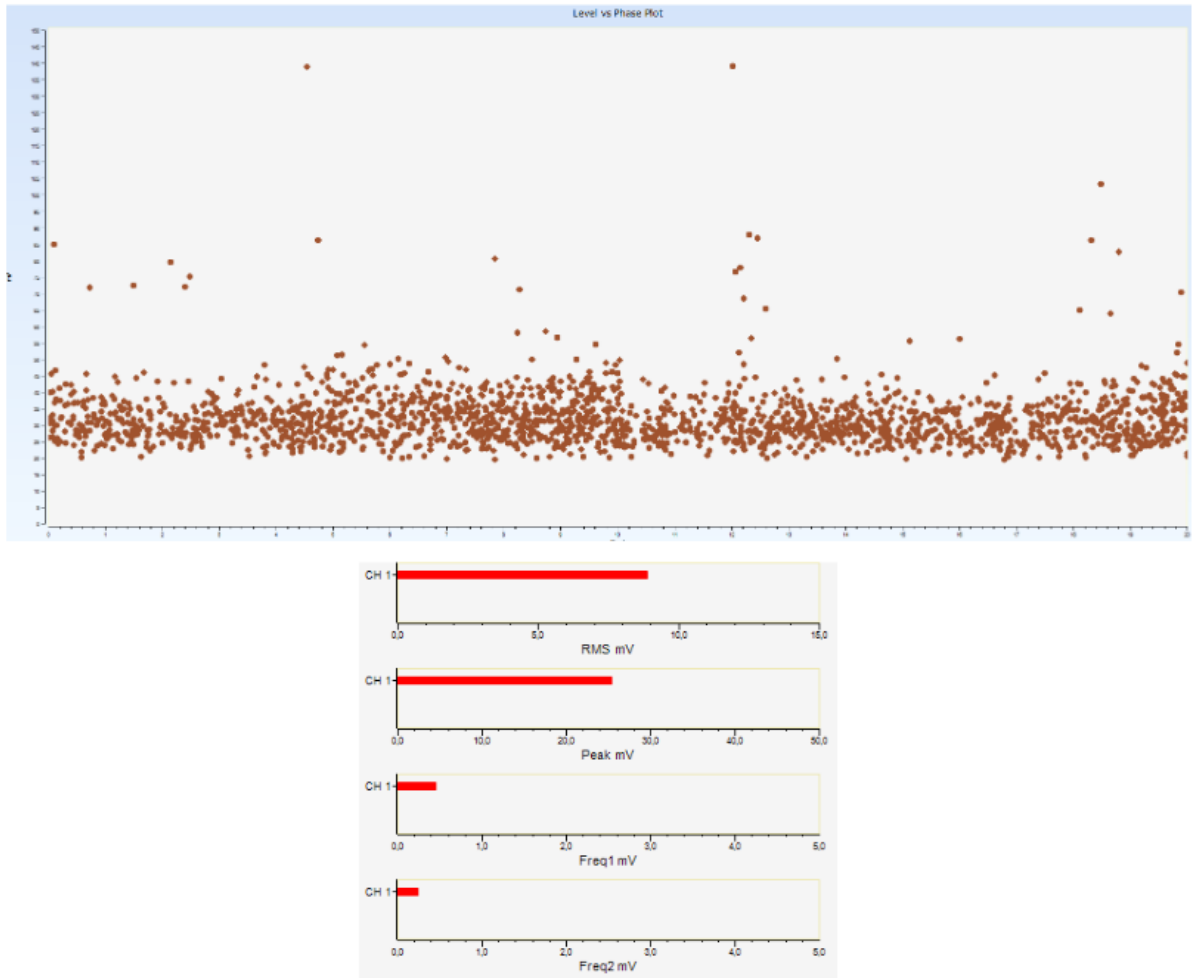
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV A fazės įvado pusėje ~1,5 m aukštyje.



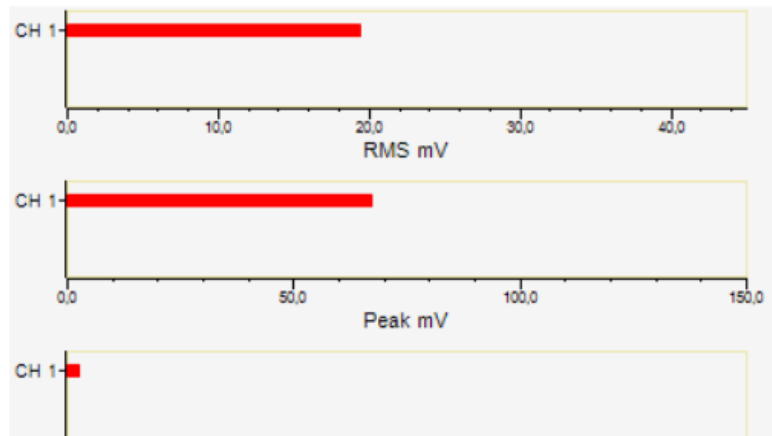
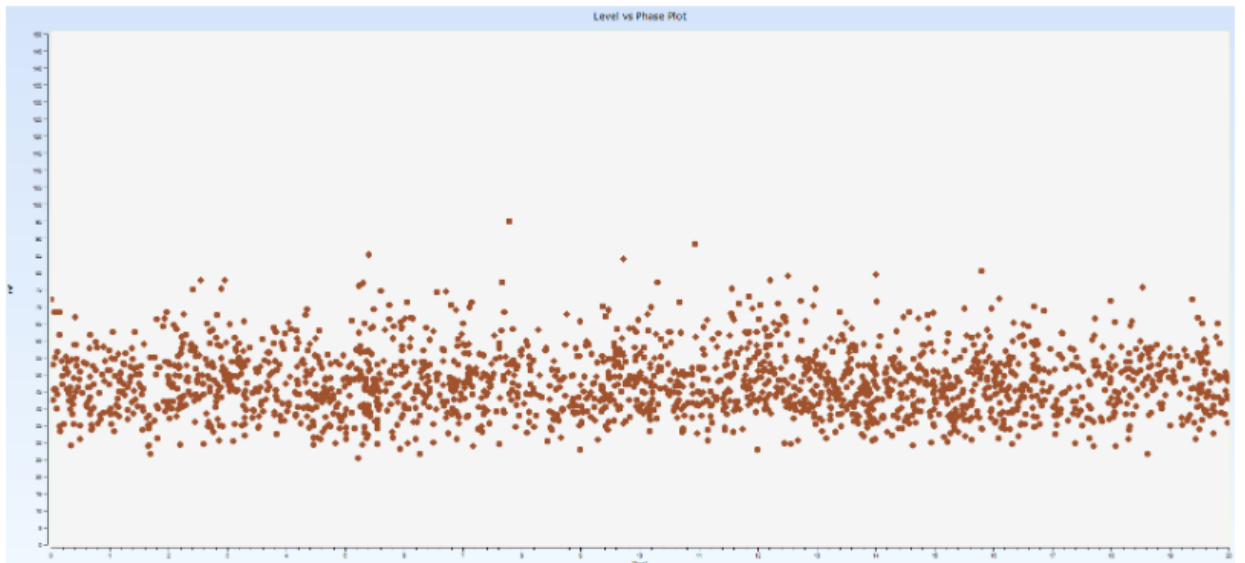
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330kV A fazės įvado pusėje 2,8 m aukštyje.



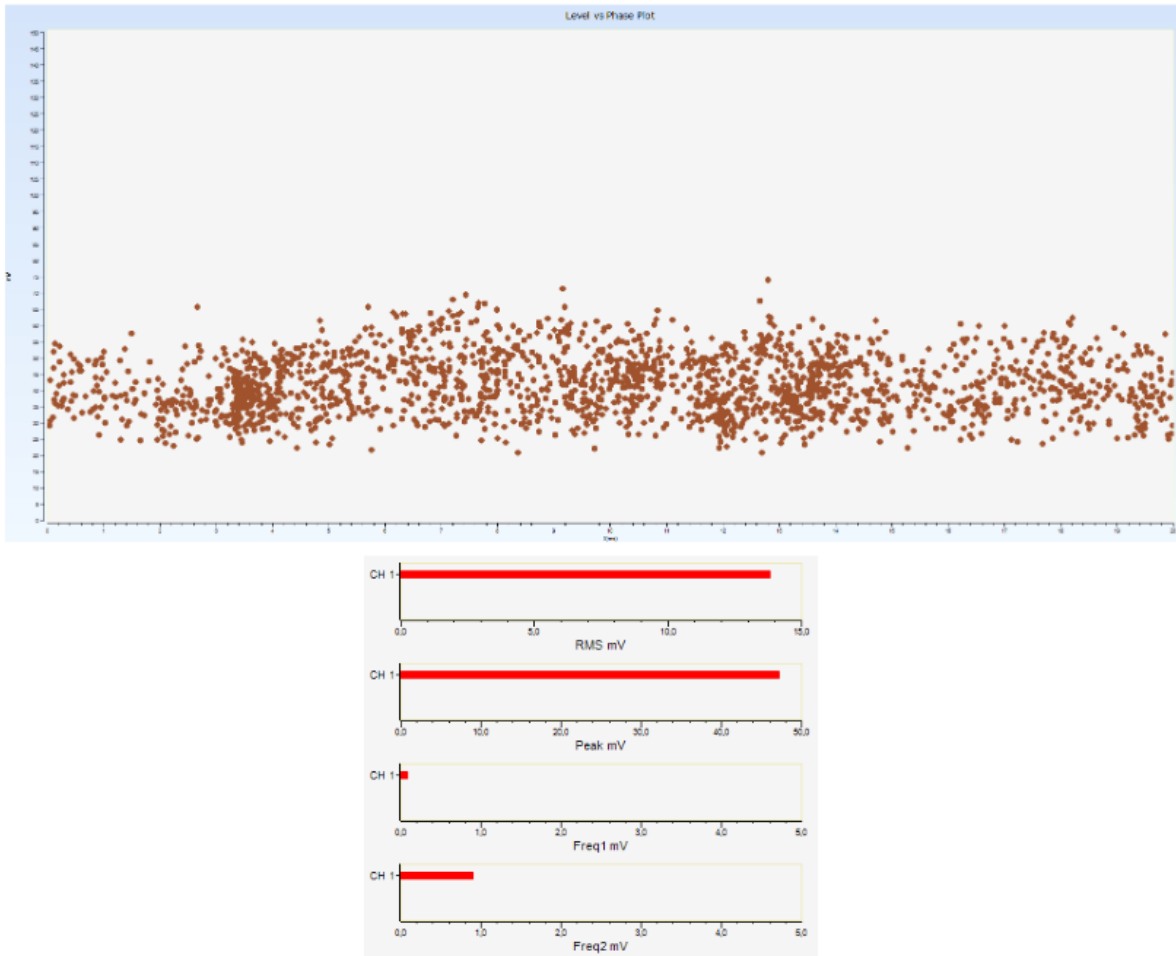
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV B fazės įvado pusėje 1,5 m aukštyje.



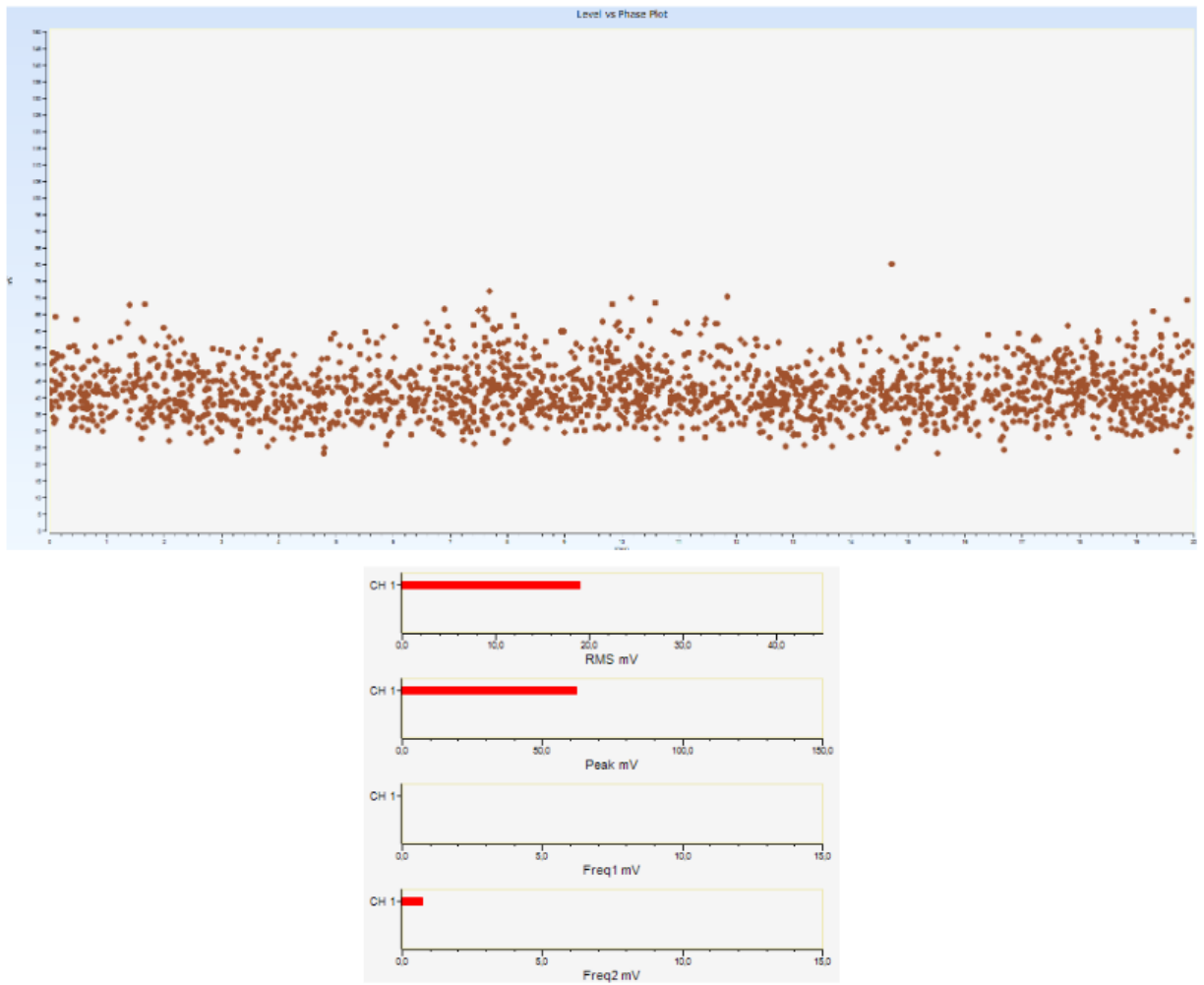
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV B fazės įvado pusėje 2,8 m aukštyje.



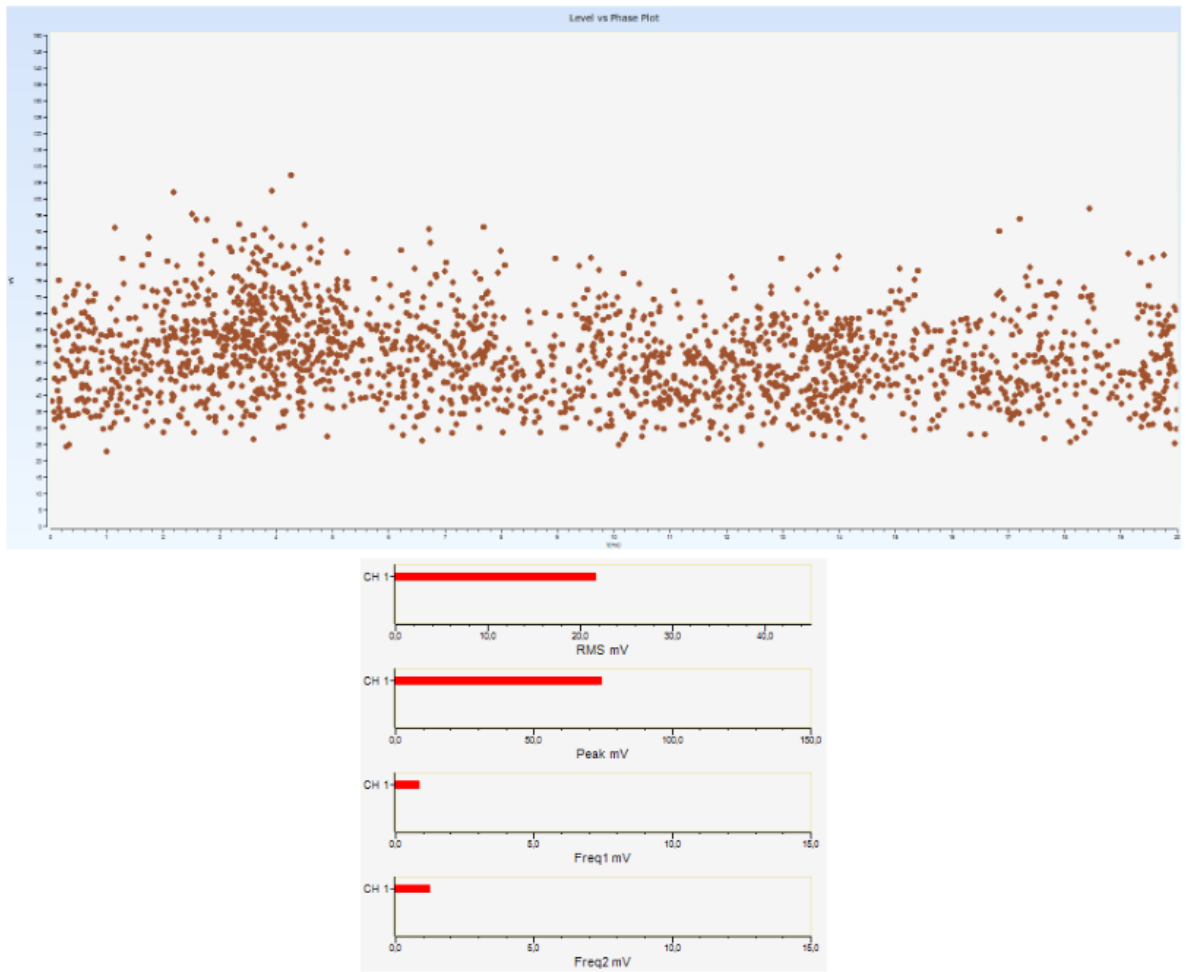
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV C fazės įvado pusėje 1,5 m aukštyje.



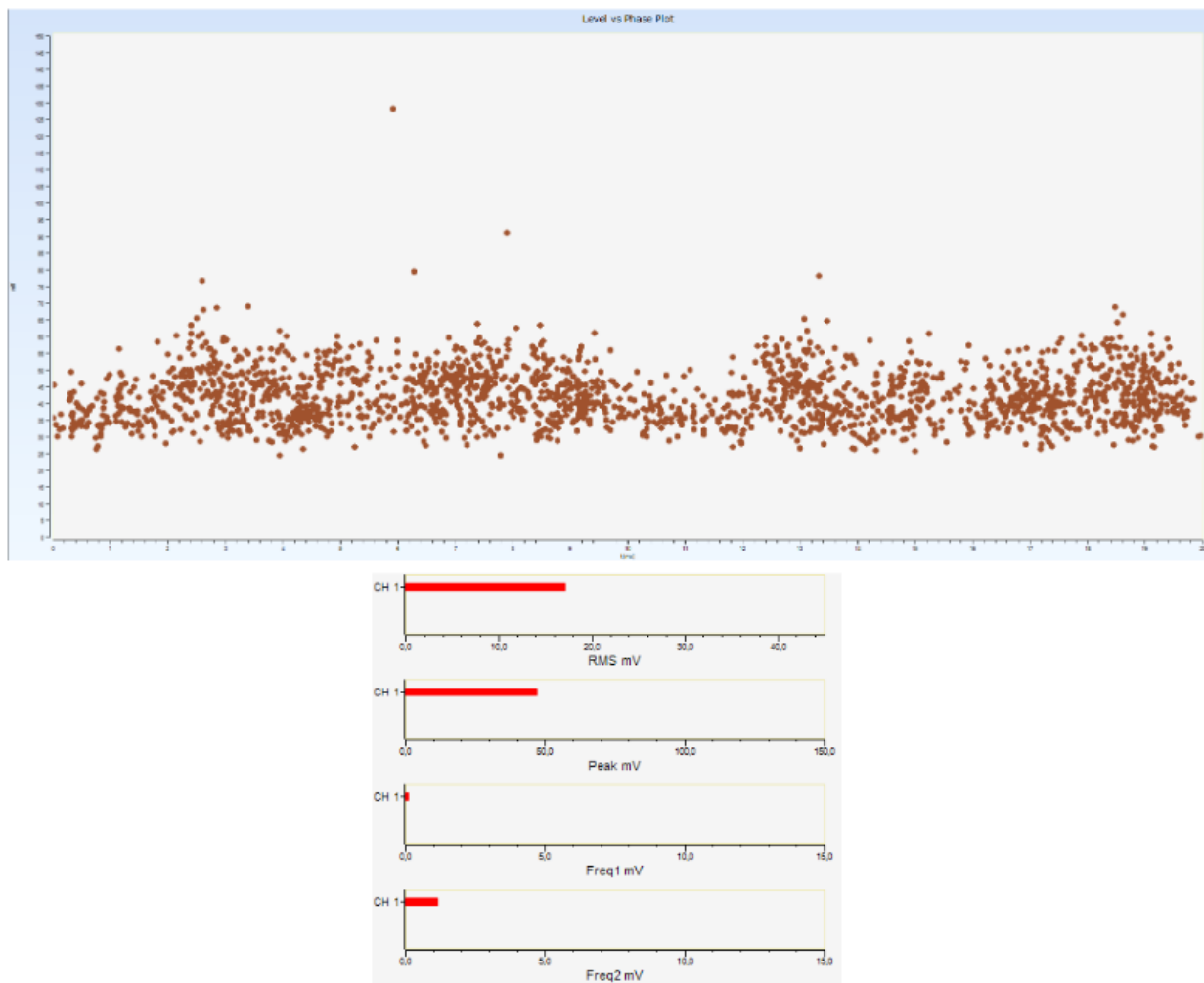
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV C fazės įvado pusėje 2,8 m aukštyje.



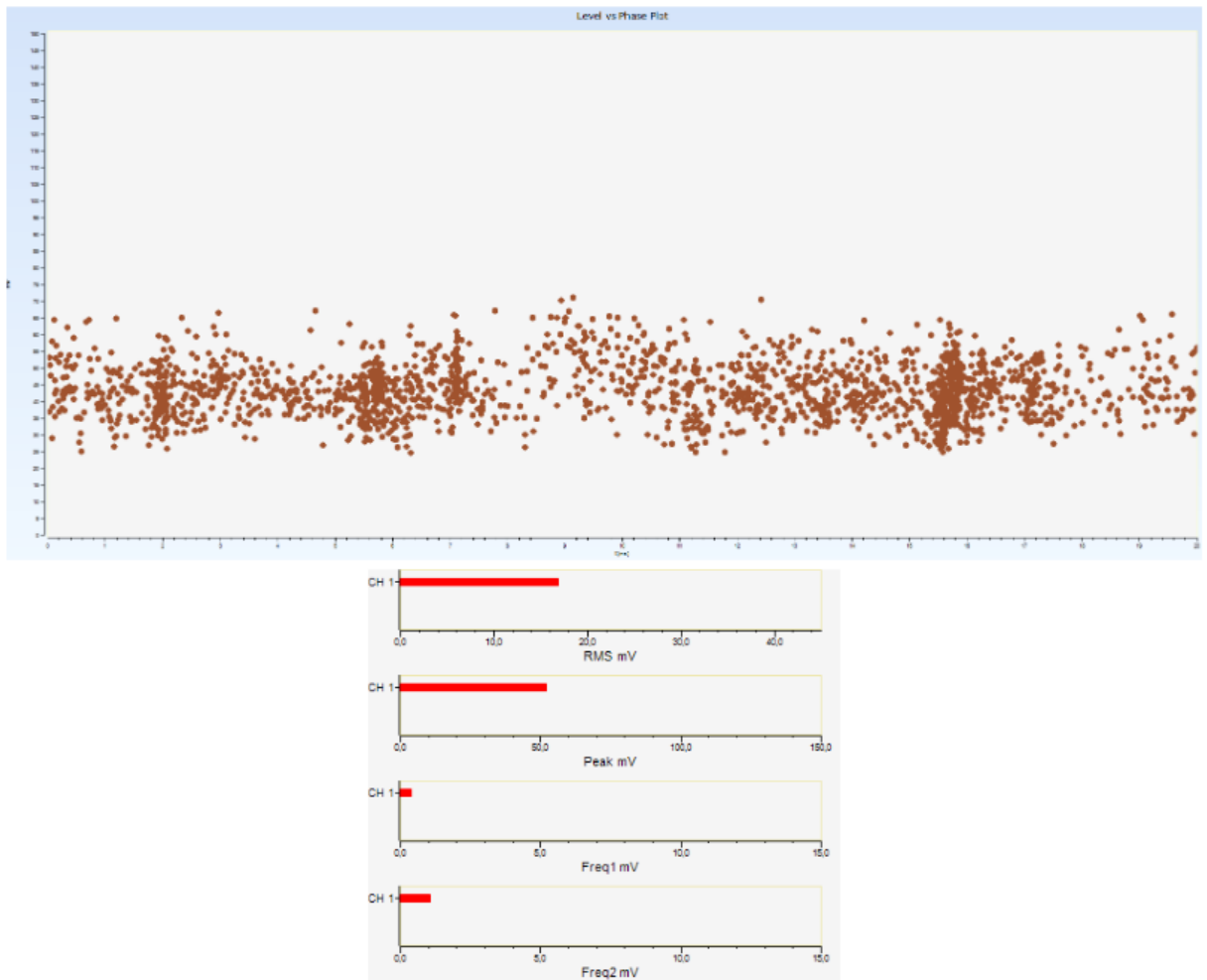
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 330kV kraštas 1.5 m aukštyje.



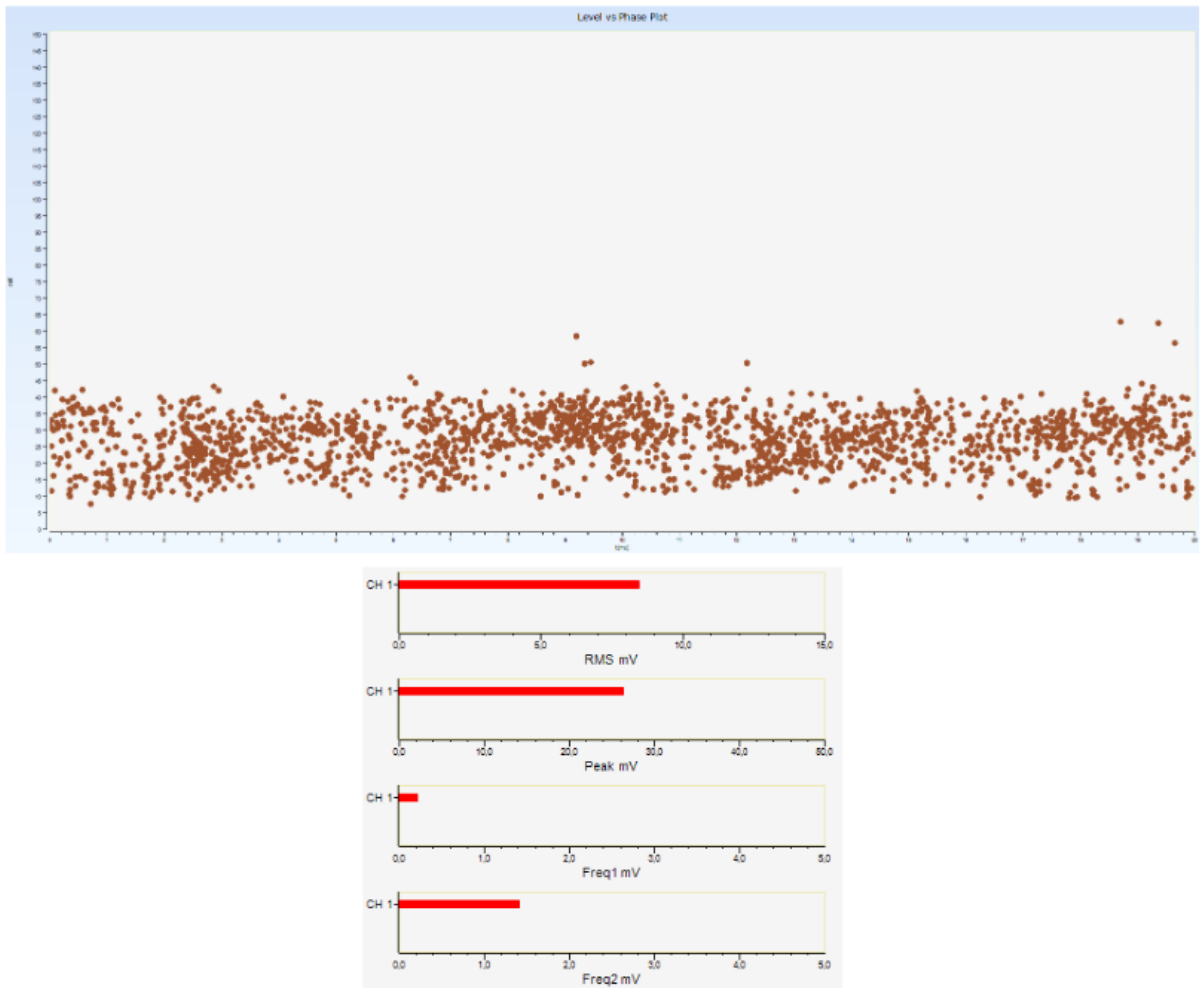
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 330kV kraštas 2.8 m aukštyje.



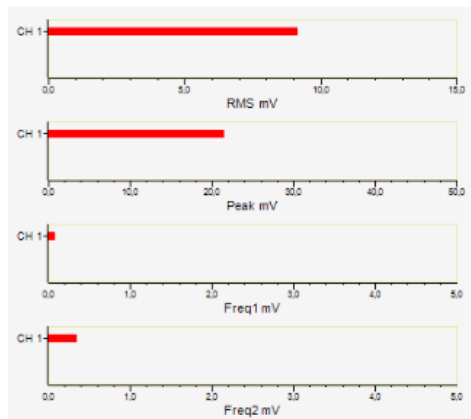
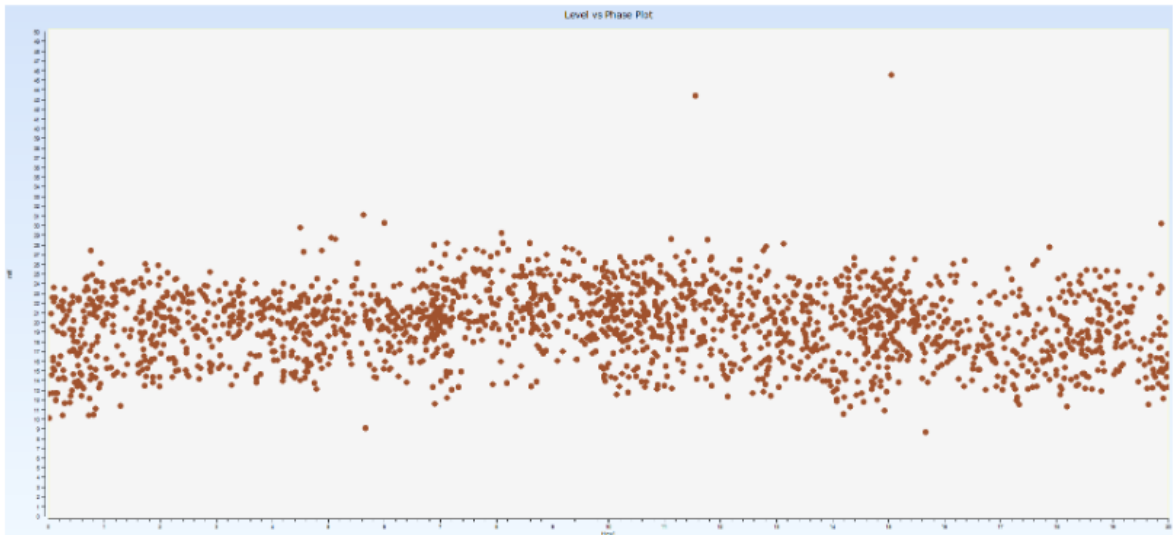
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 110 kV kraštas 1.5 m aukštyje.



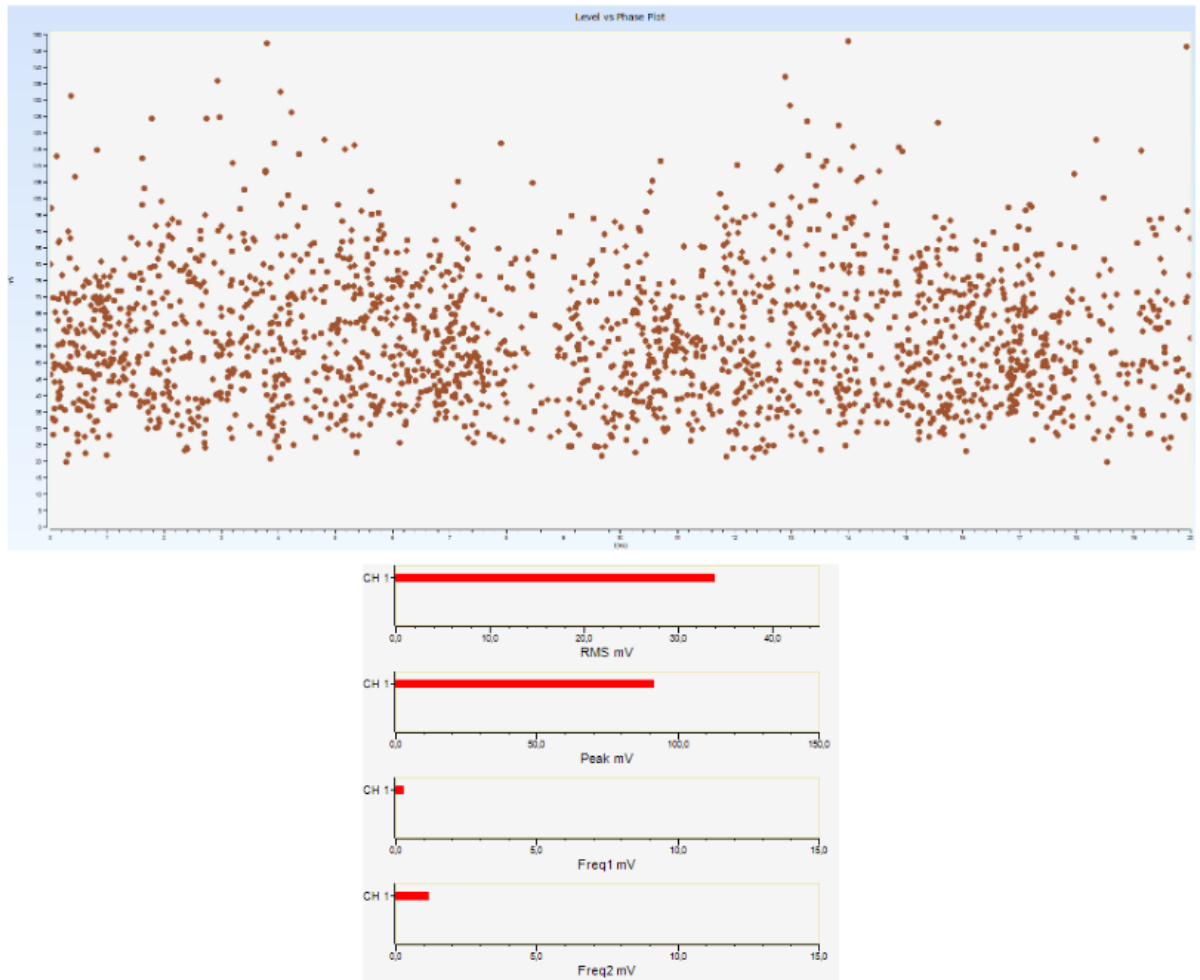
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 110kV kraštas 2.8 m aukštyje.



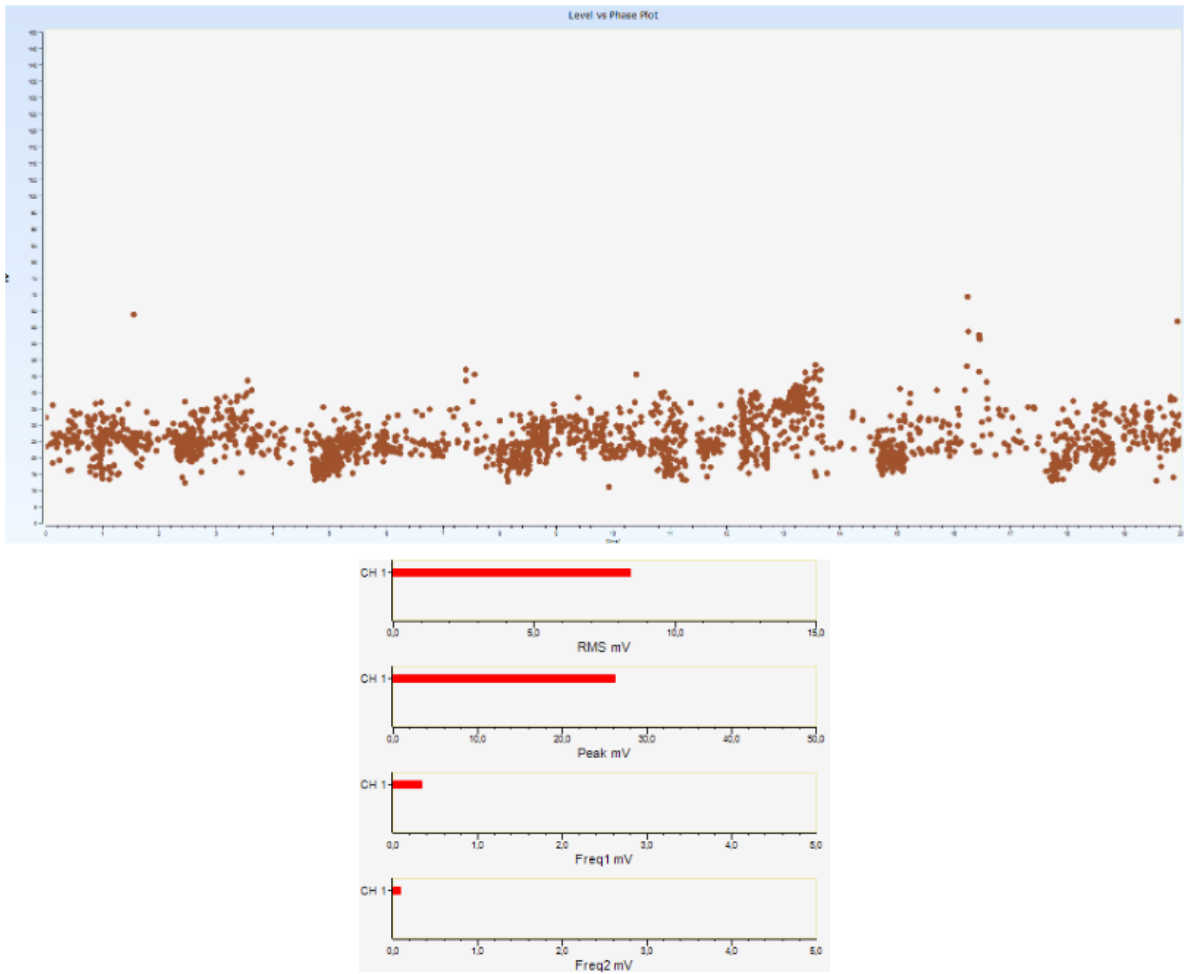
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, A fazė 1.5 m aukštyje.



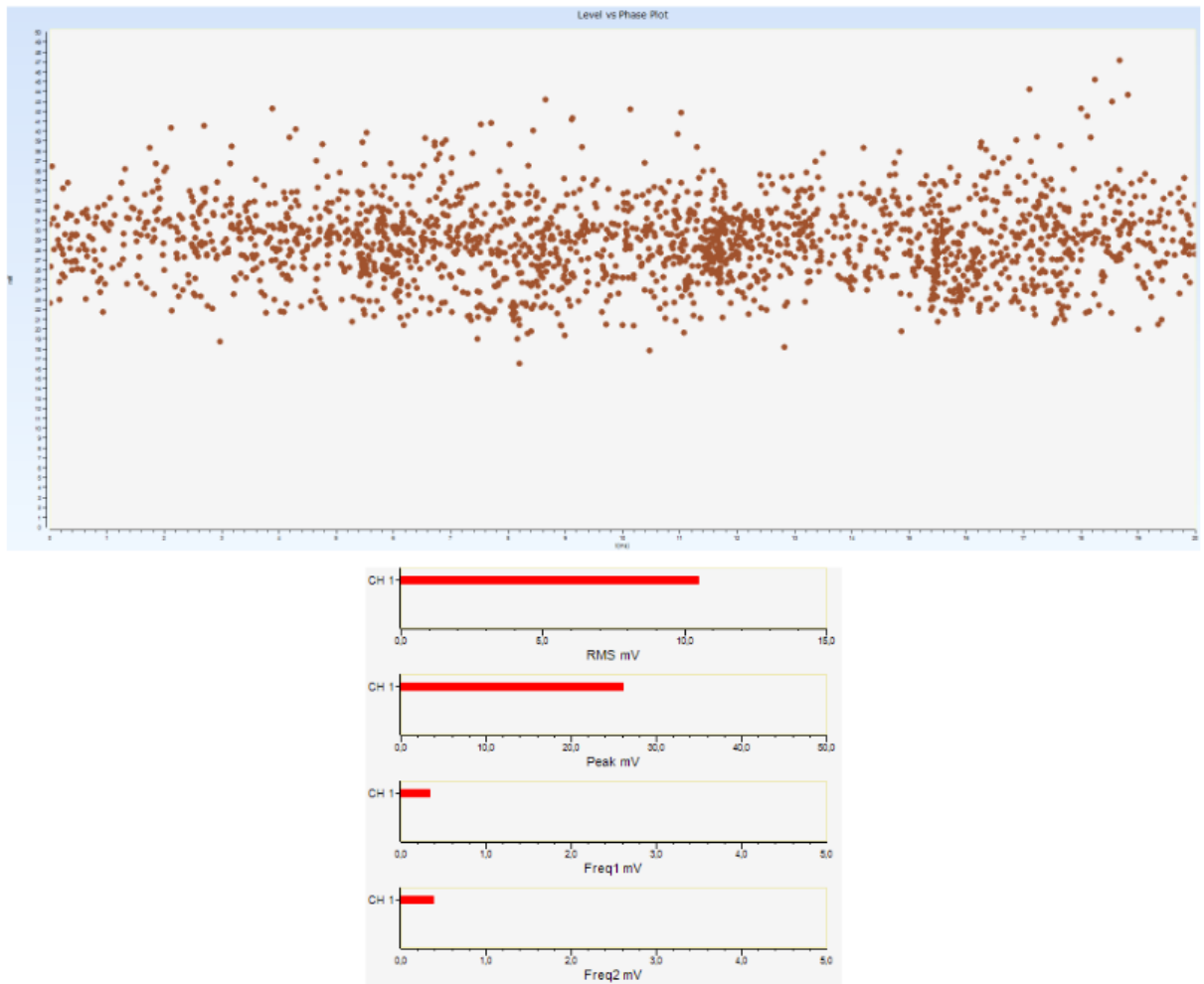
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, A fazė 2.8 m aukštyje.



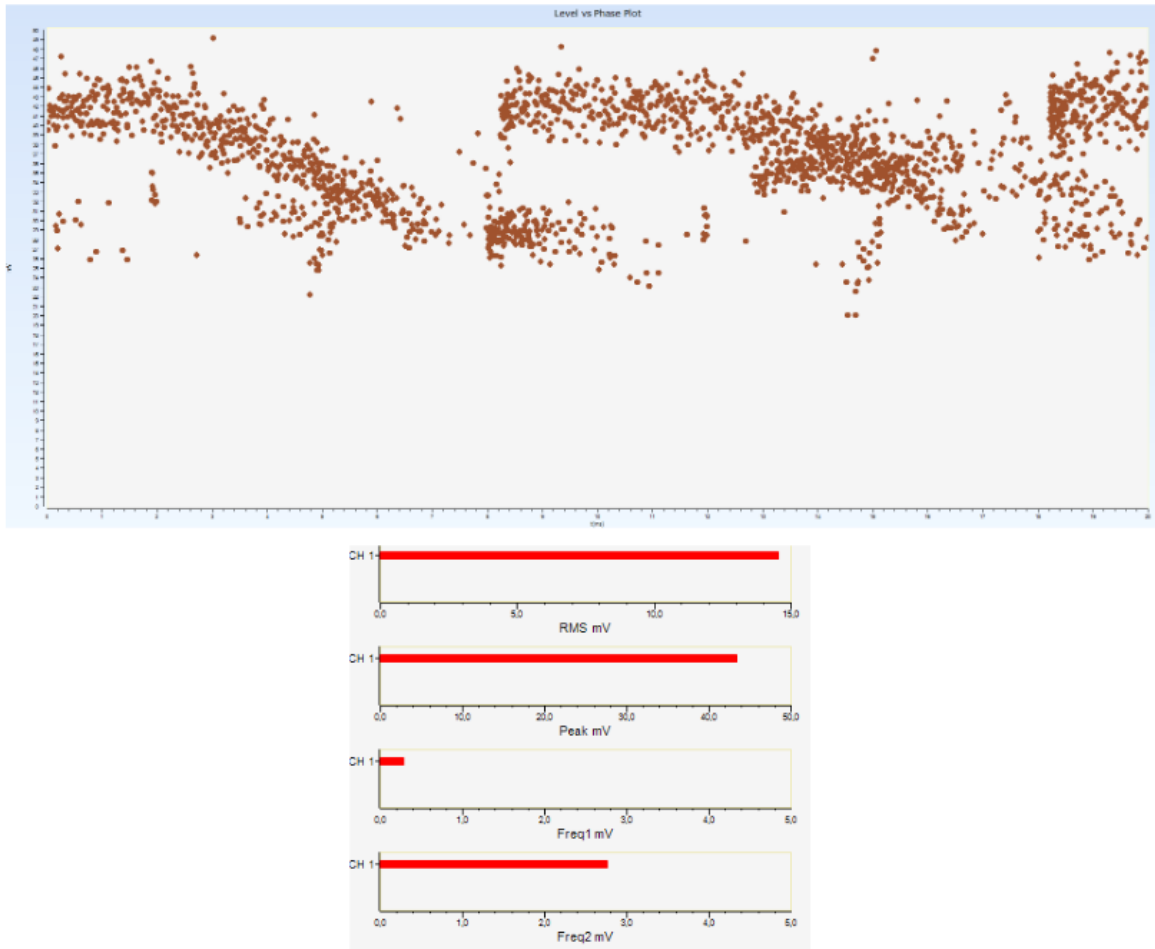
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, B fazė 1.5 m aukštyje.



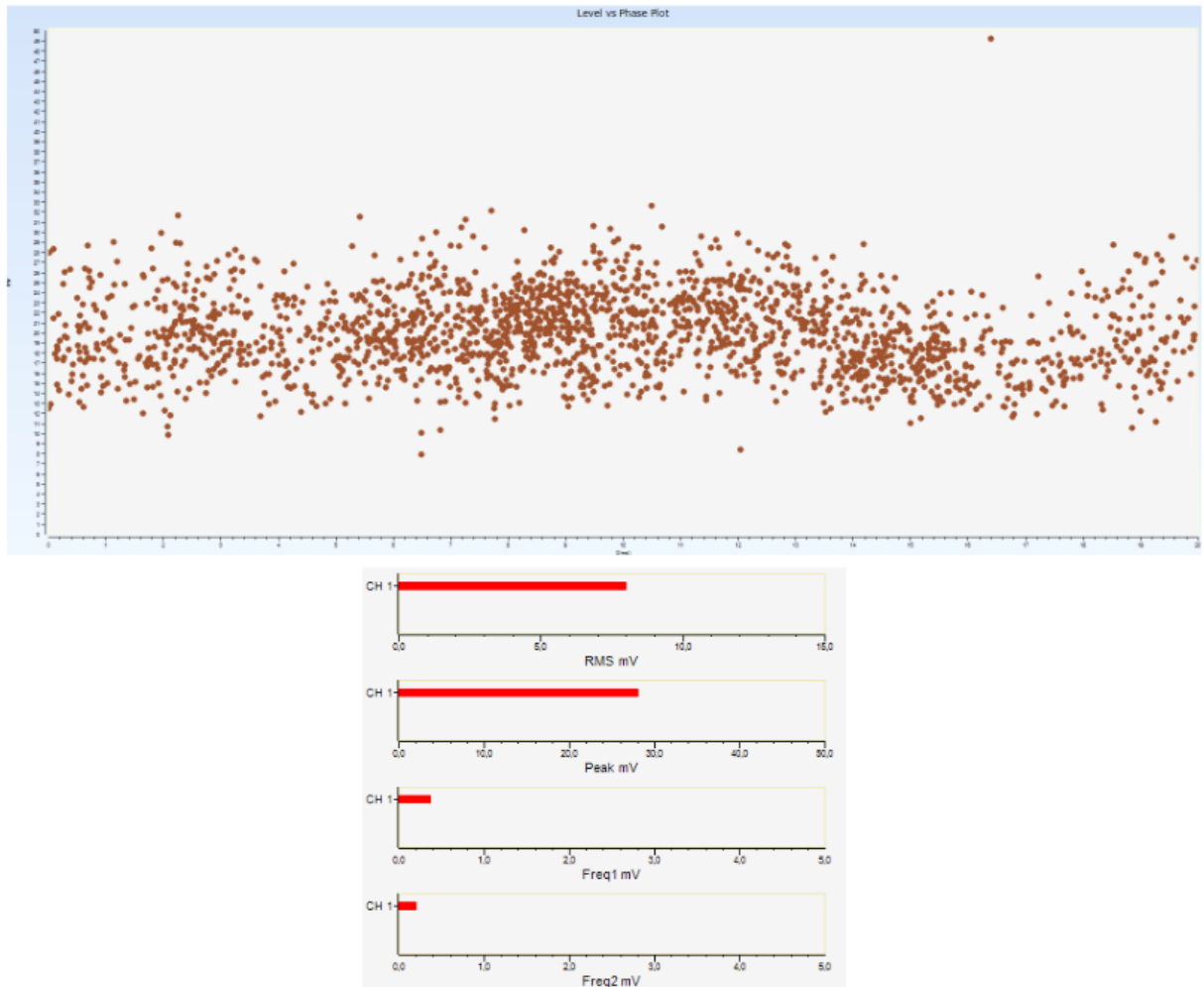
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, B fazė 2.8 m aukštyje.



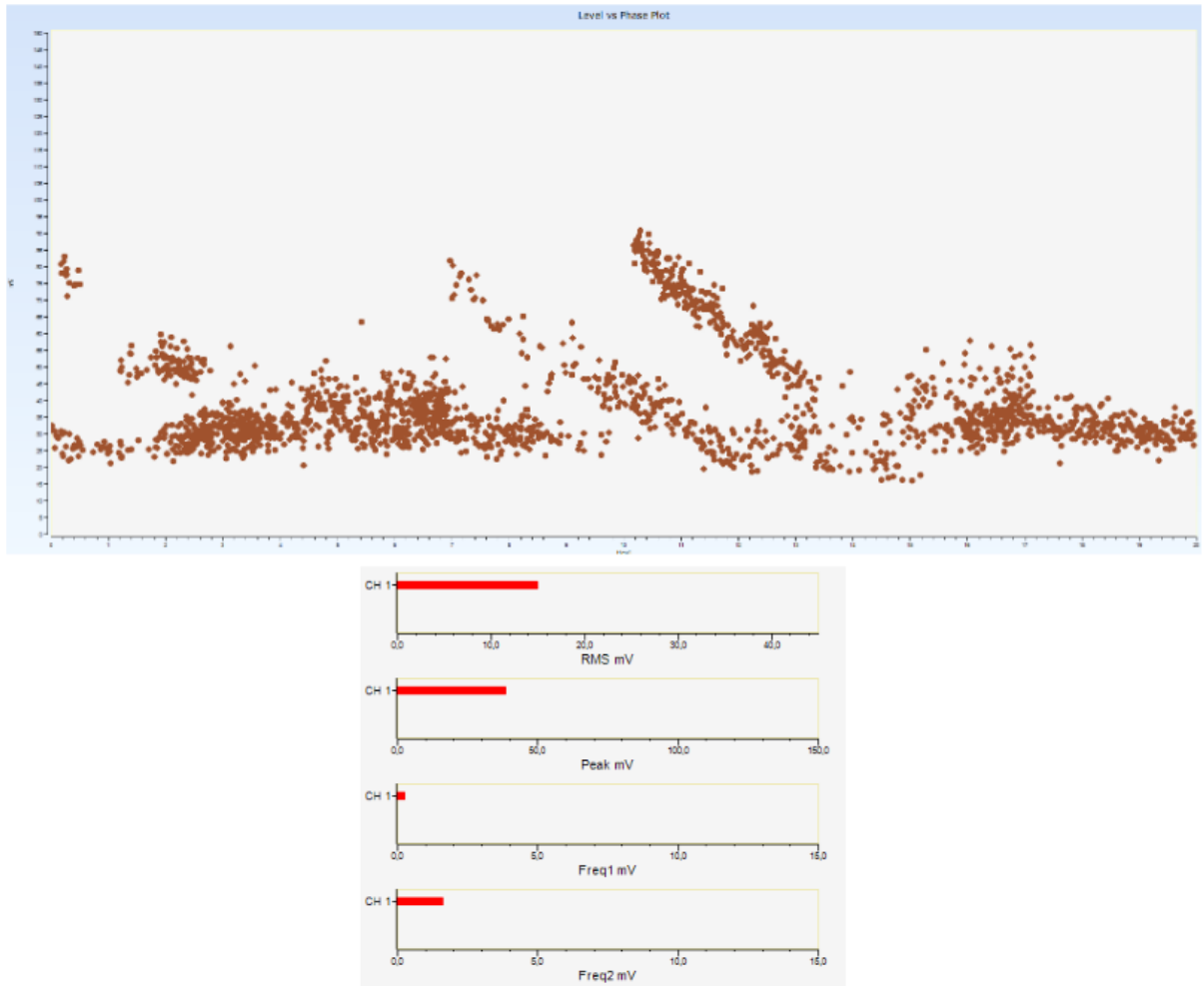
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, C fazė 1.5 m aukštyje.



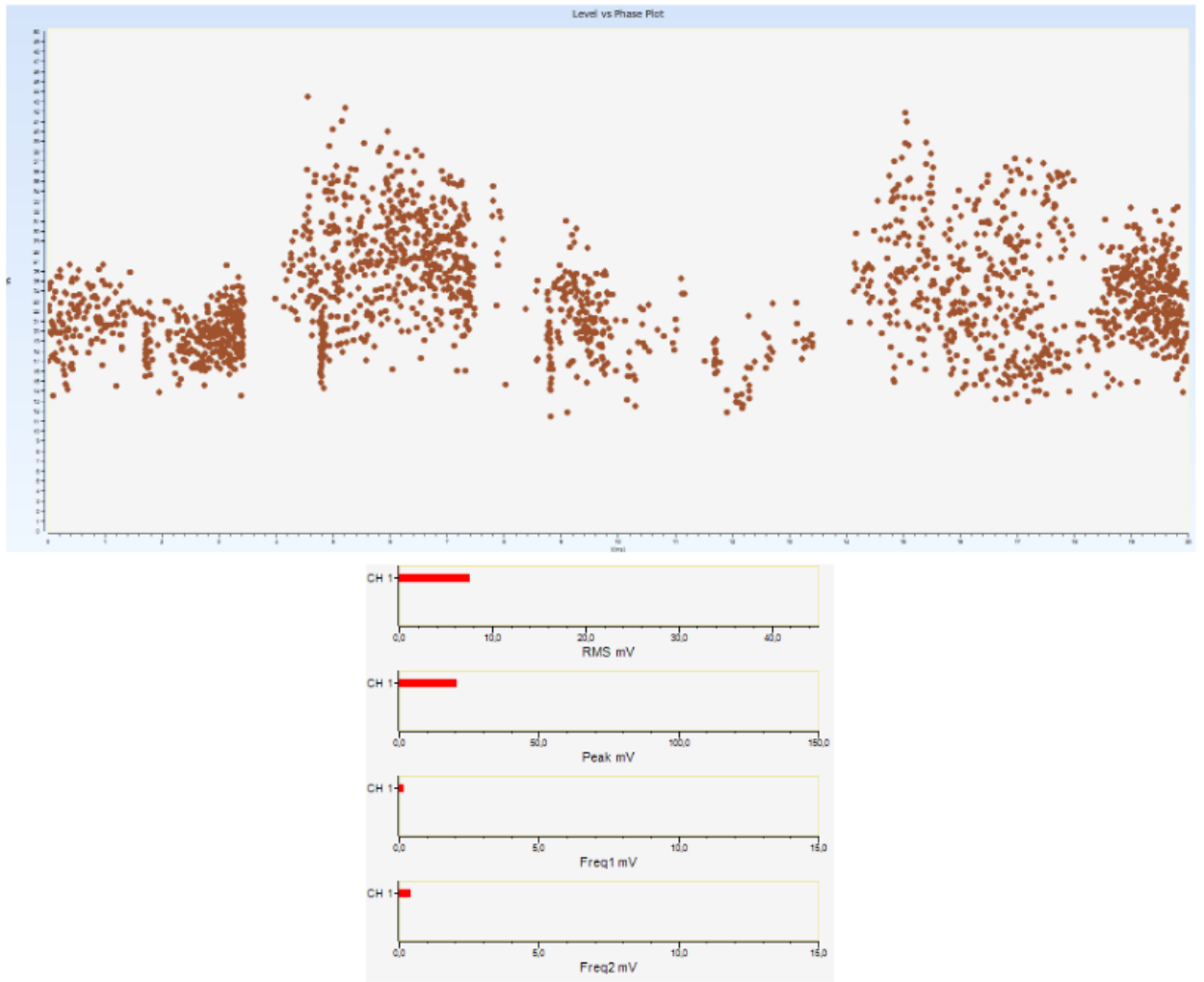
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, C fazė 2.8 m aukštyje.



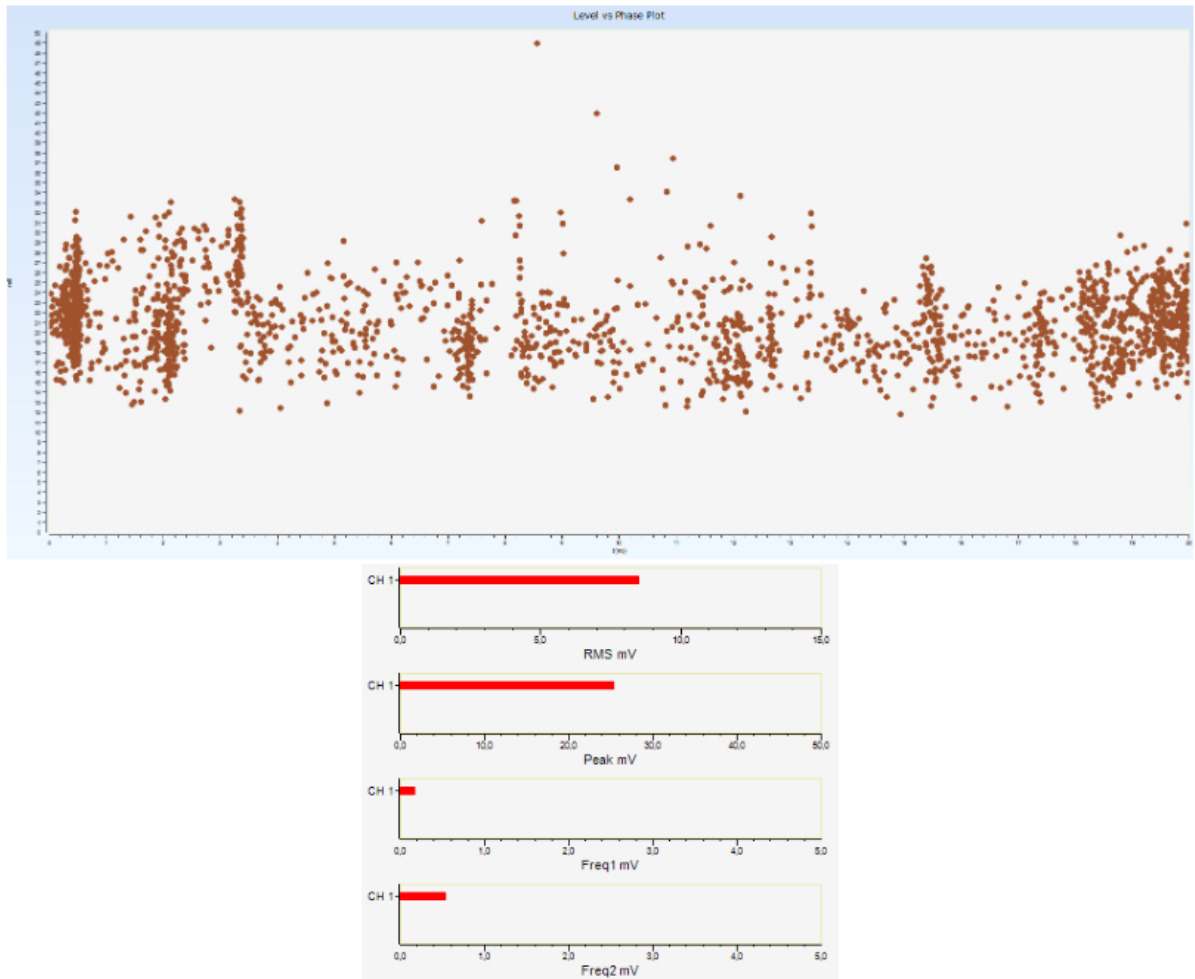
Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusė, 110kV kraštas, 1.5 m aukštyje.



Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusėje, 110kV kraštas, 2.8 m aukštyje.



Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusė, 330kVkraštas, 1.5 m aukštyje.

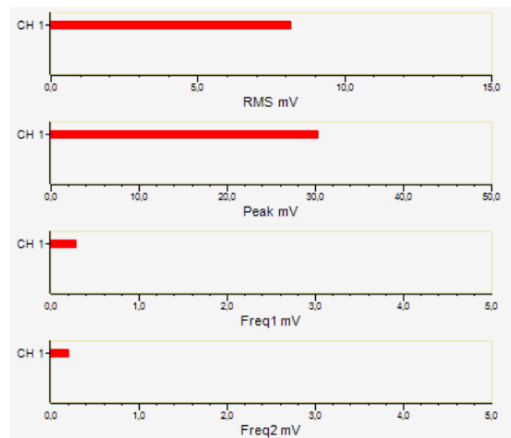
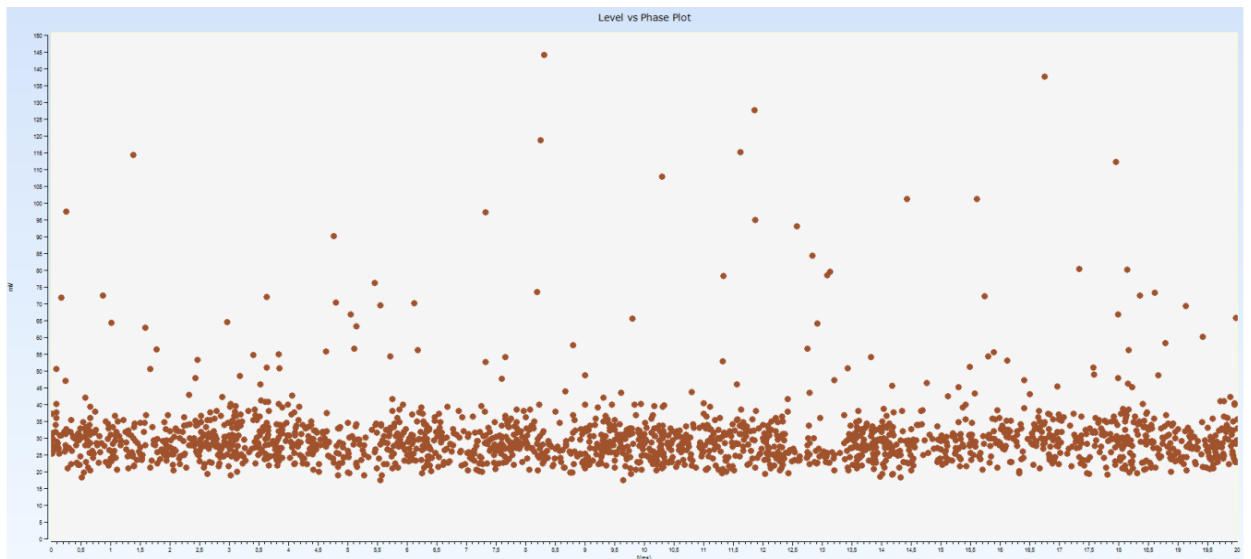


Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusė, 330kV kraštas, 2.8 m aukštyje.

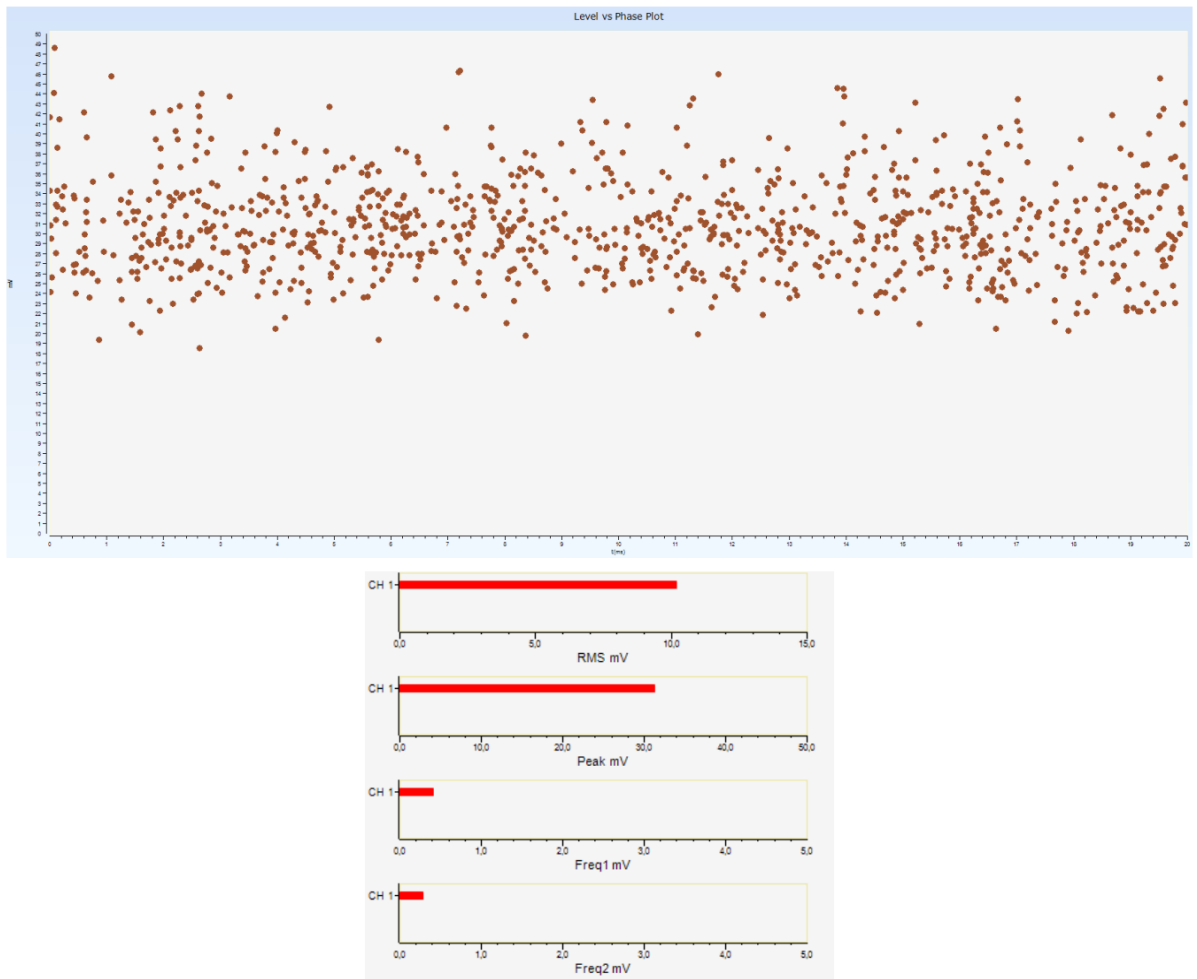
## 2 priedas. AT-2 matavimai

Alytaus TP transformatorių dalinių išlydžių registravimo rezultatai (akustinis).

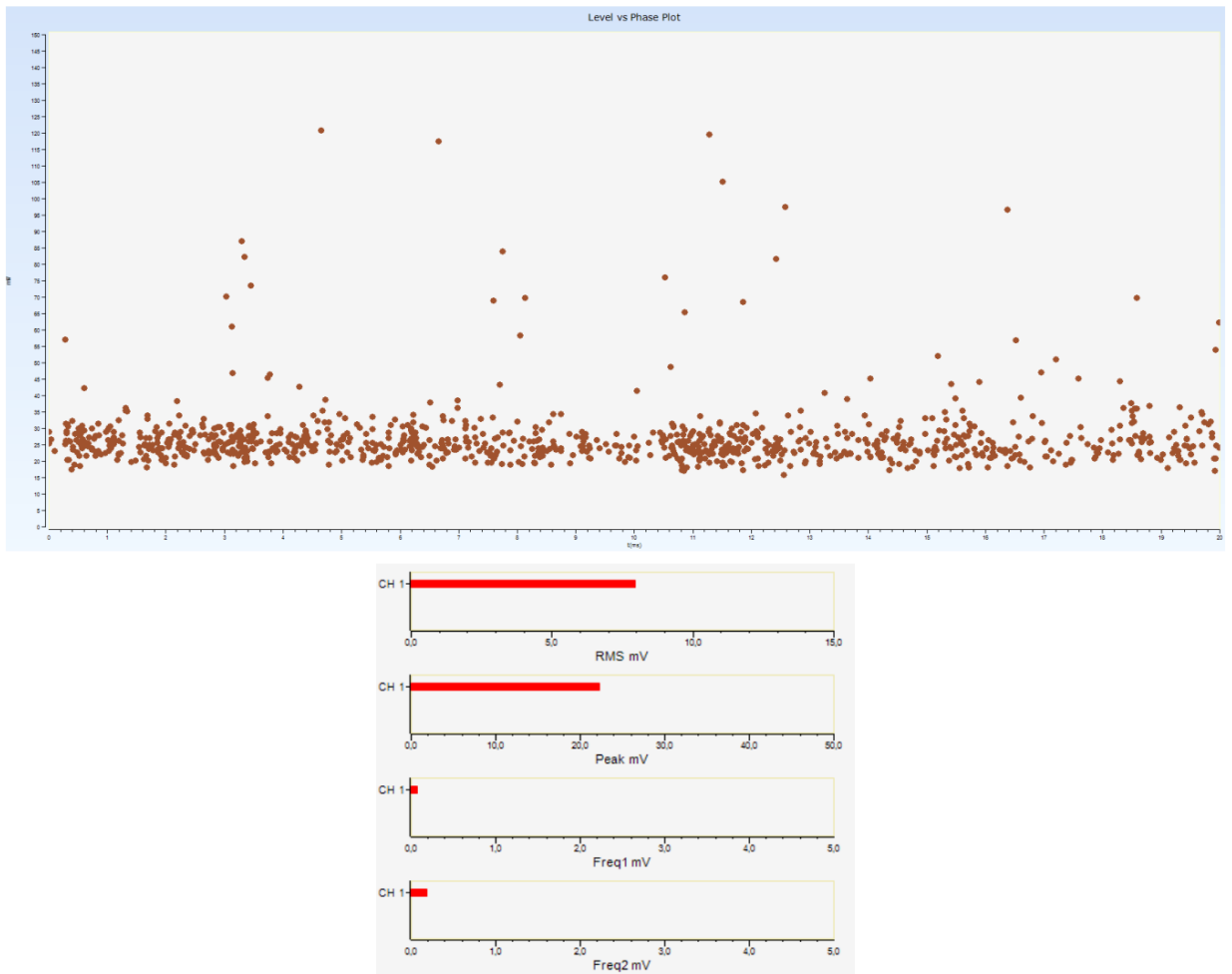
DI registravimui buvo nustatyta 5000 taškų. Apačios aukštis - ~1,5 m, Viršaus - ~2,8 - 3 m



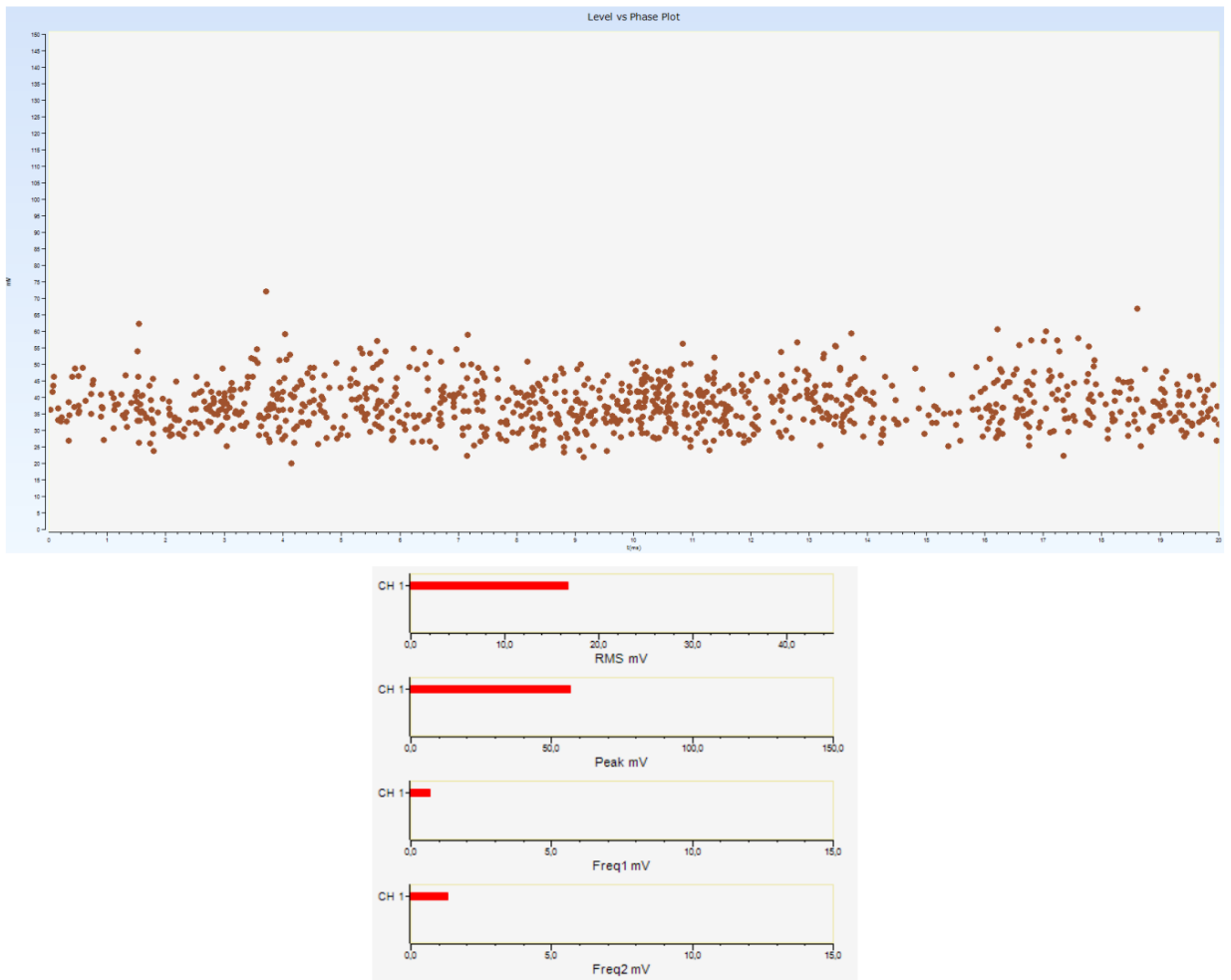
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV A fazės įvado pusėje 1,5 m aukštyje.



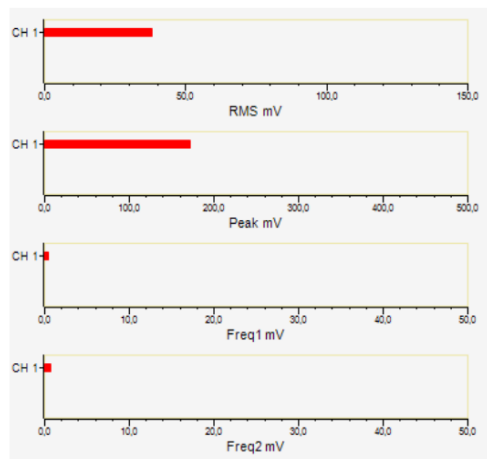
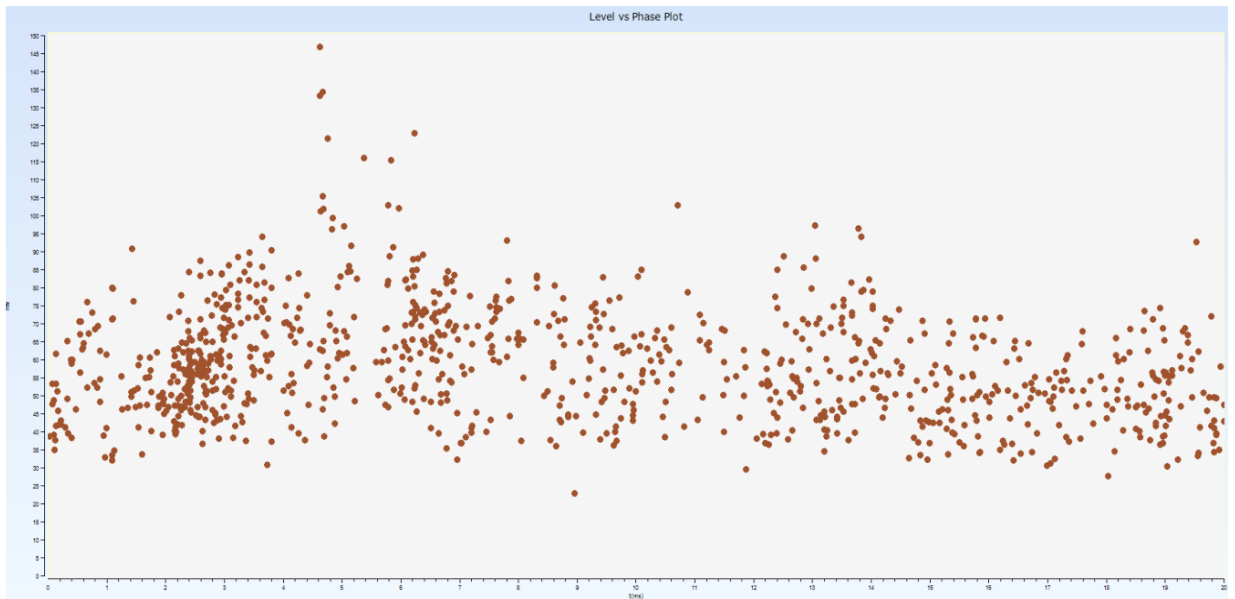
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV A fazės įvado pusėje 2,8 m aukštyje.



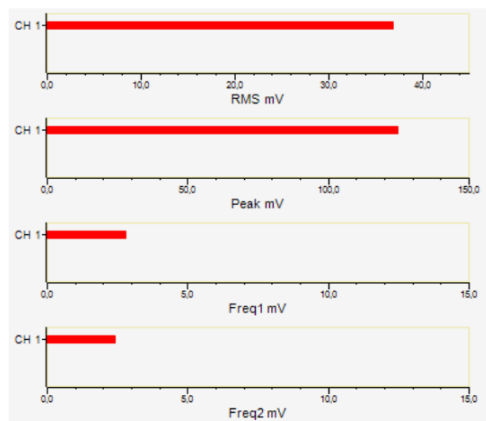
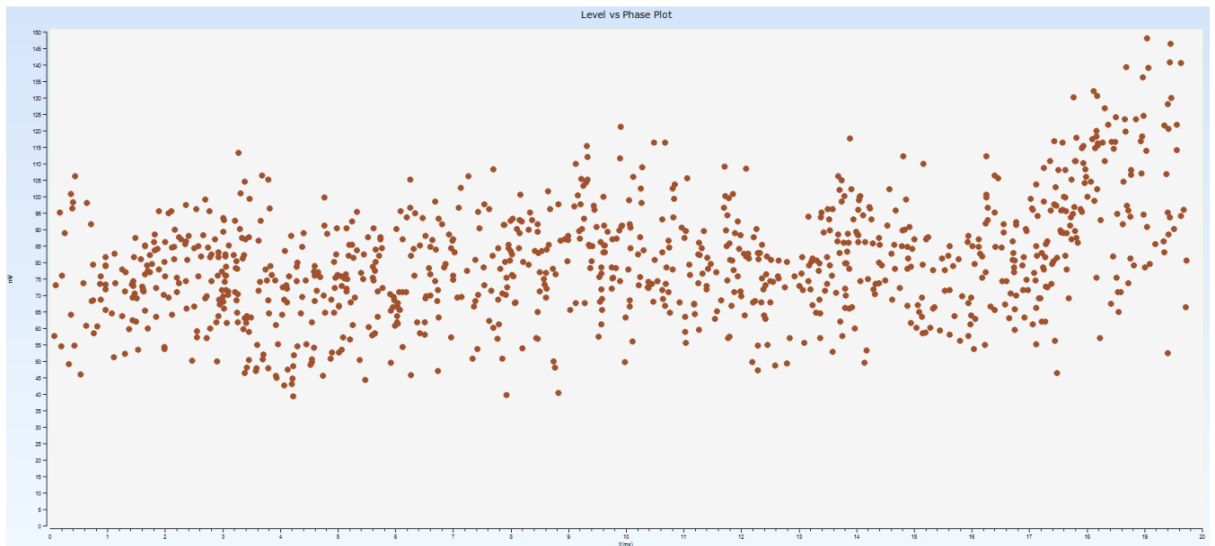
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV B fazės įvado pusėje 1,5 m aukštyje.



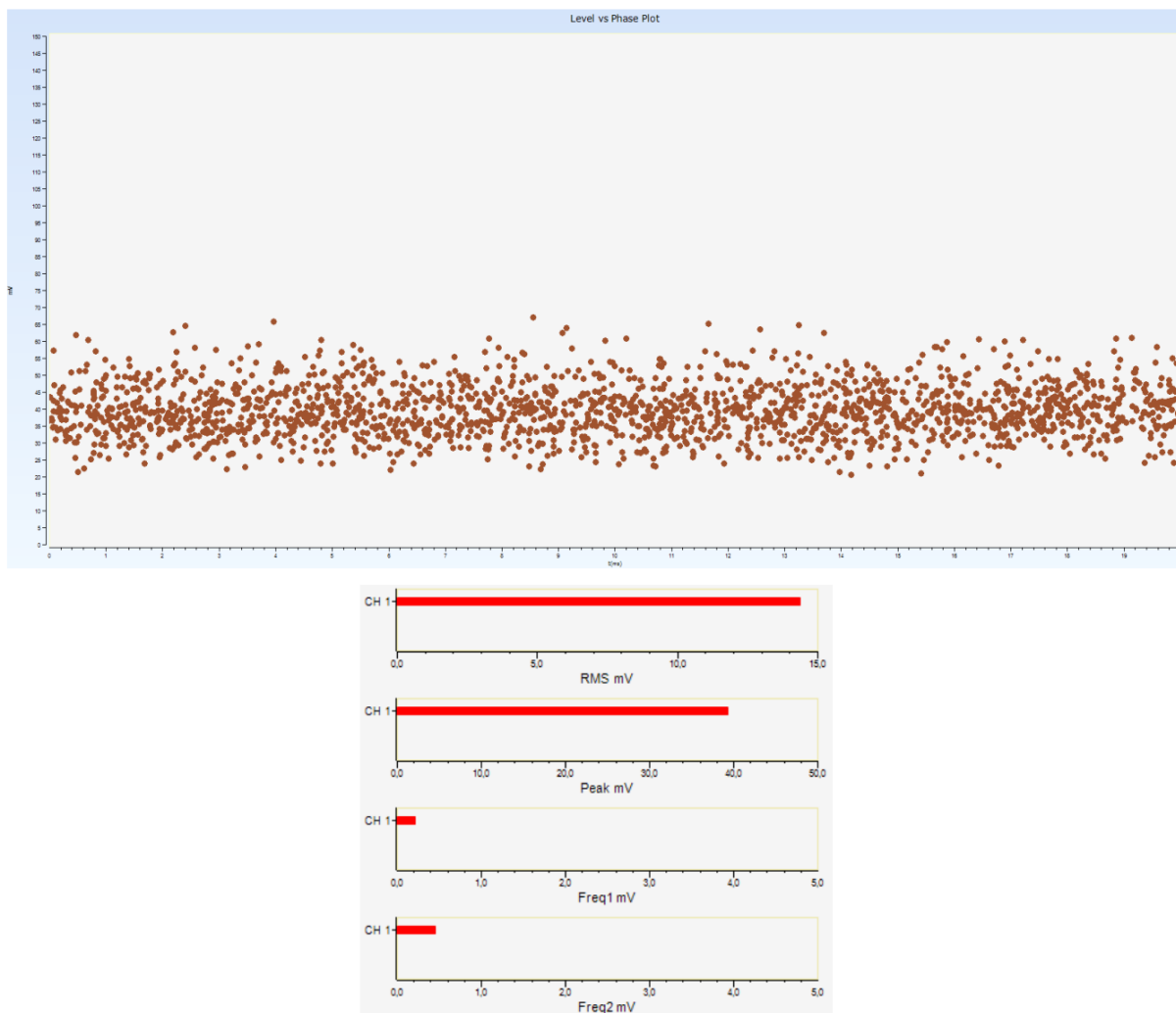
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV B fazės įvado pusėje 2,8 m aukštyje.



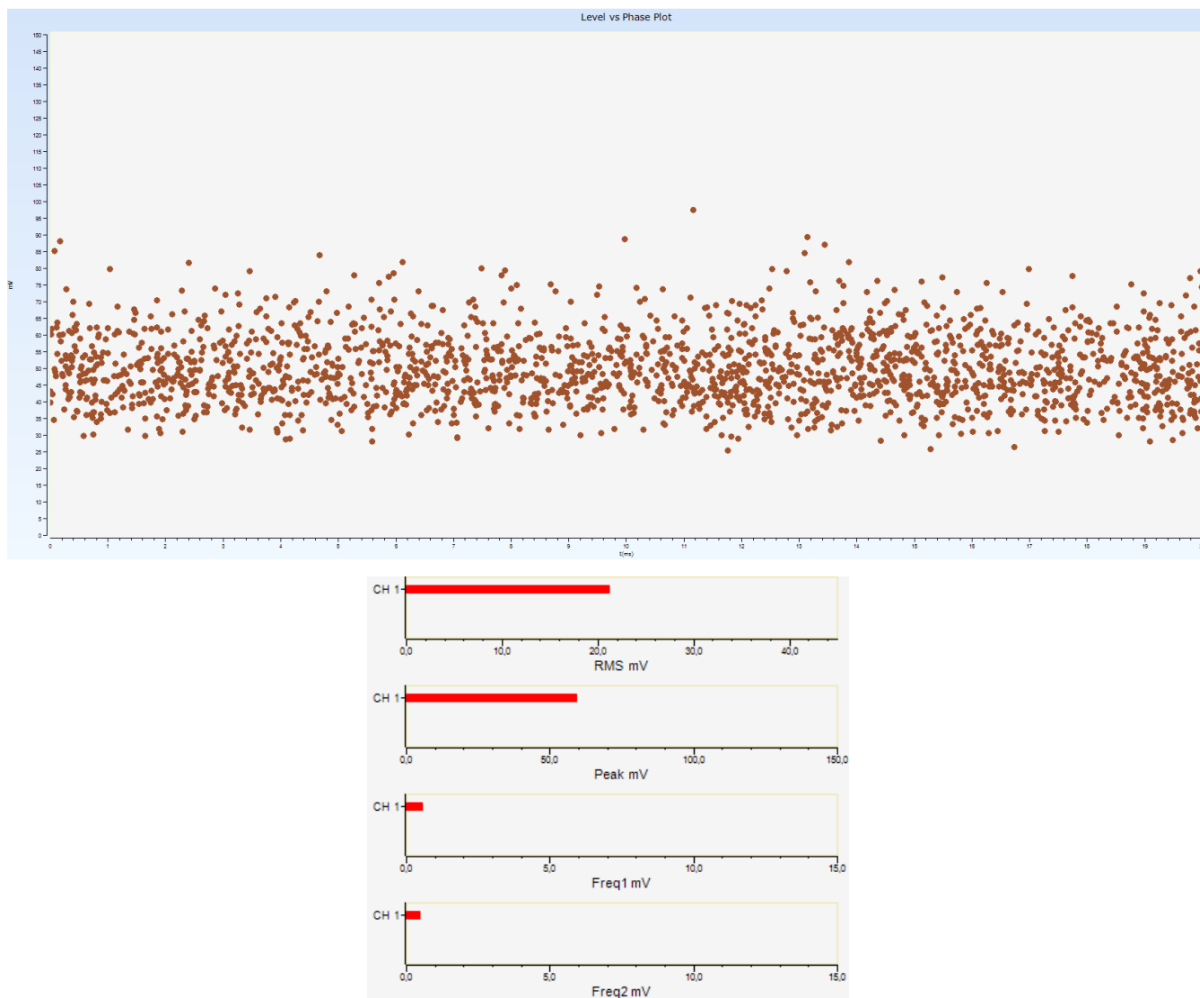
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV C fazės įvado pusėje 1,5 m aukštyje.



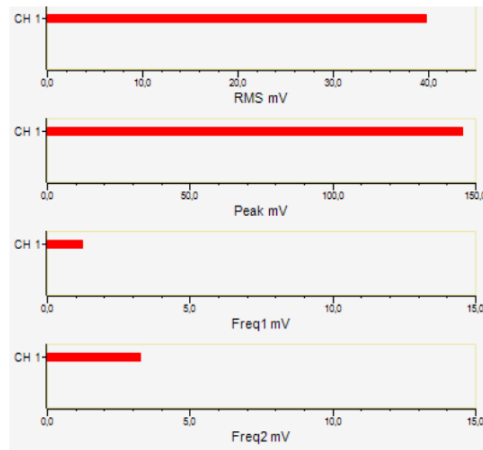
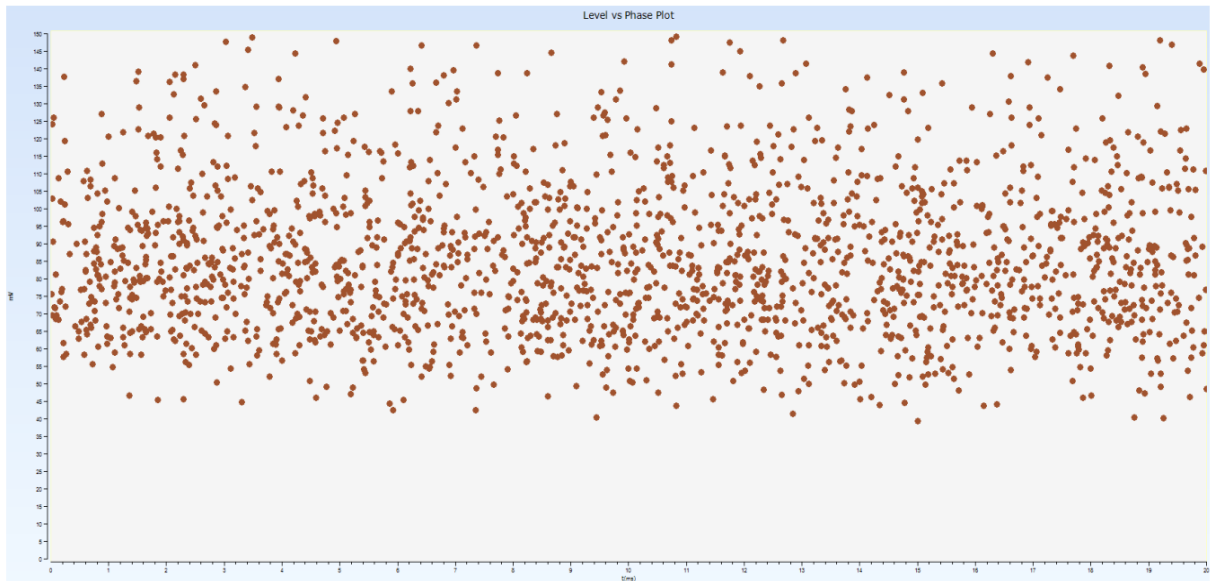
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 330 kV C fazės įvado pusėje 2,8 m aukštyje.



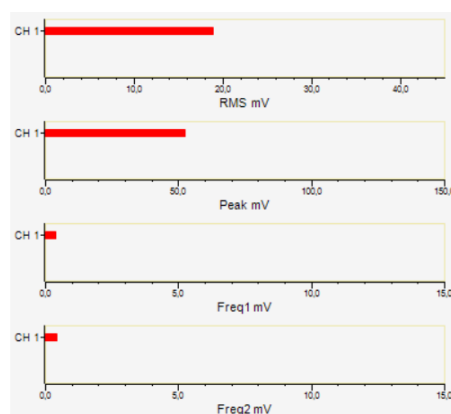
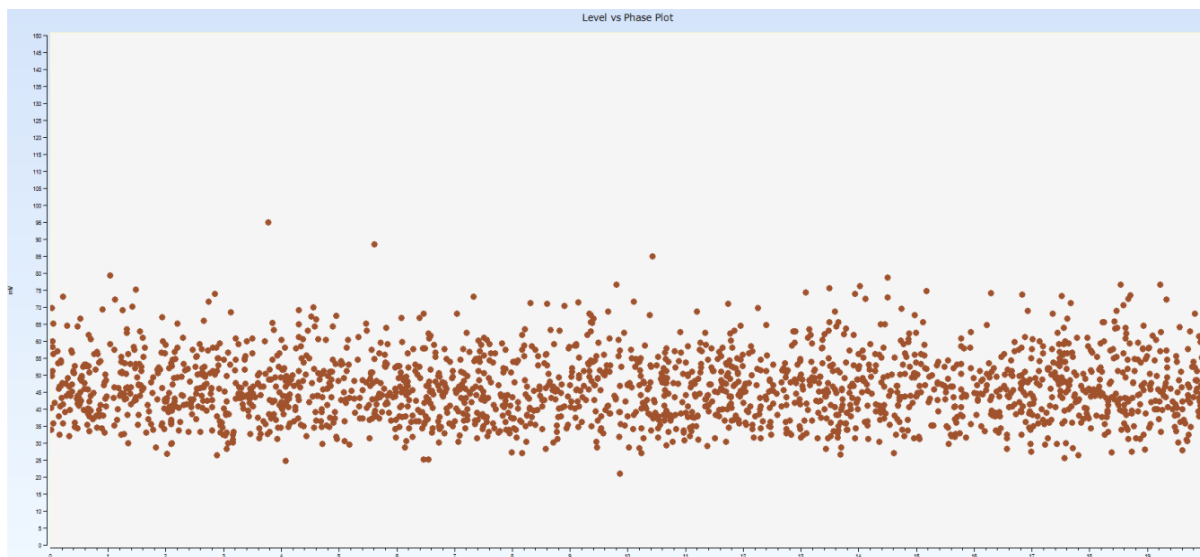
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 330kV kraštas 1.5 m aukštyje.



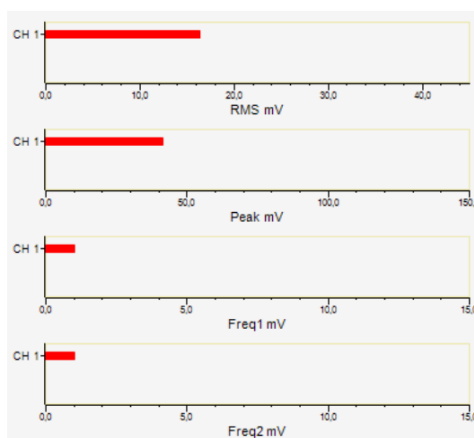
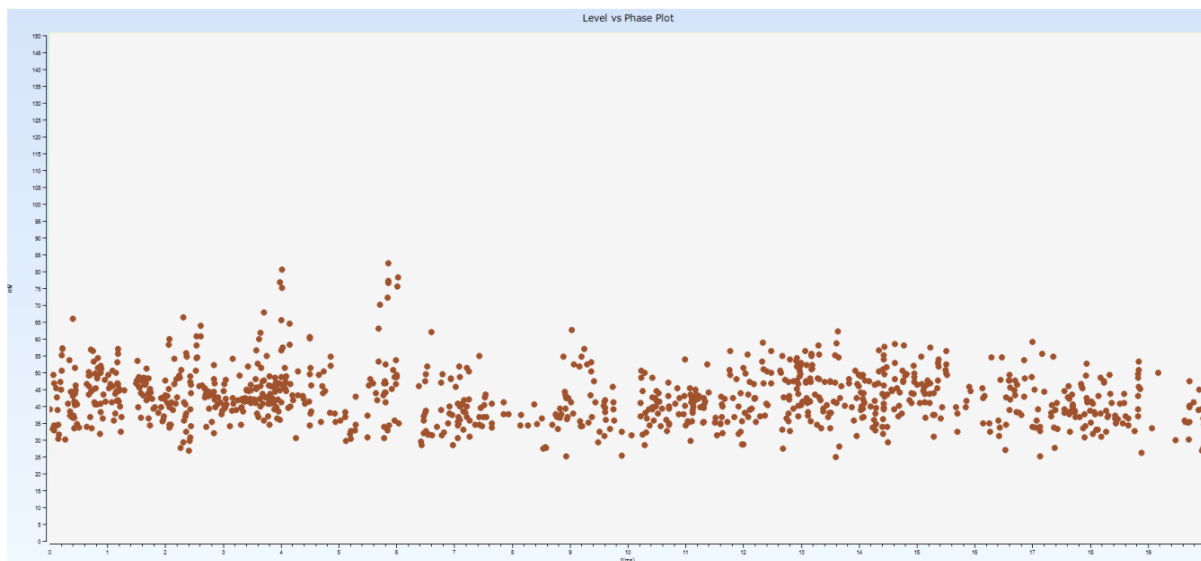
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 330kV kraštas 2.8 m aukštyje.



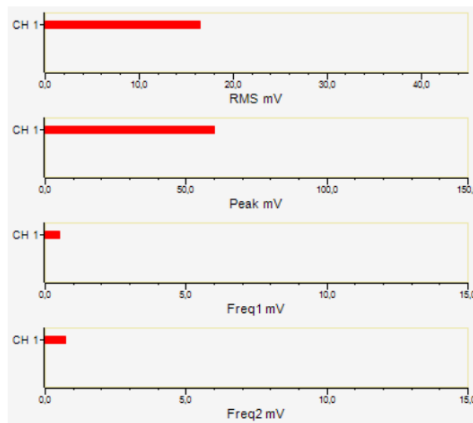
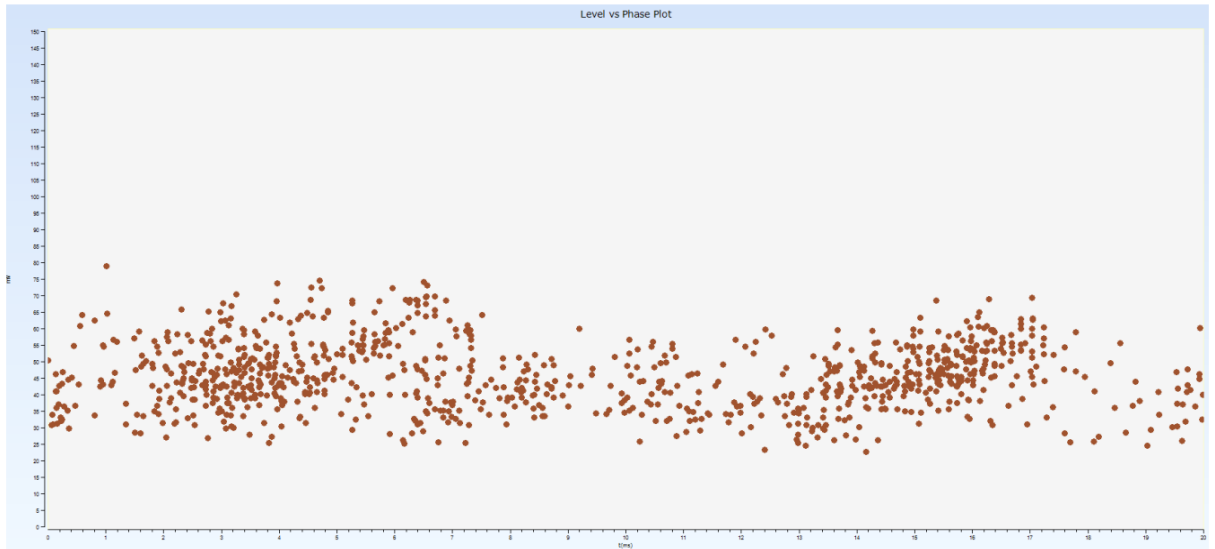
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 110 kV kraštas 1.5 m aukštyje.



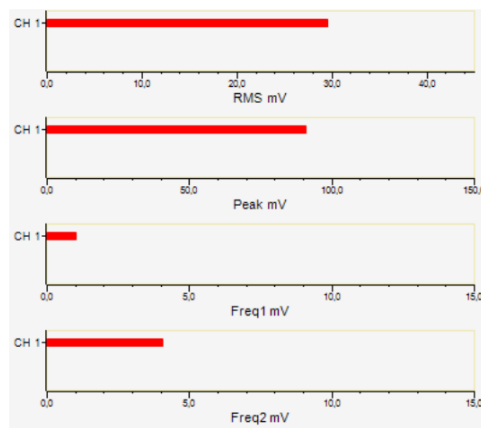
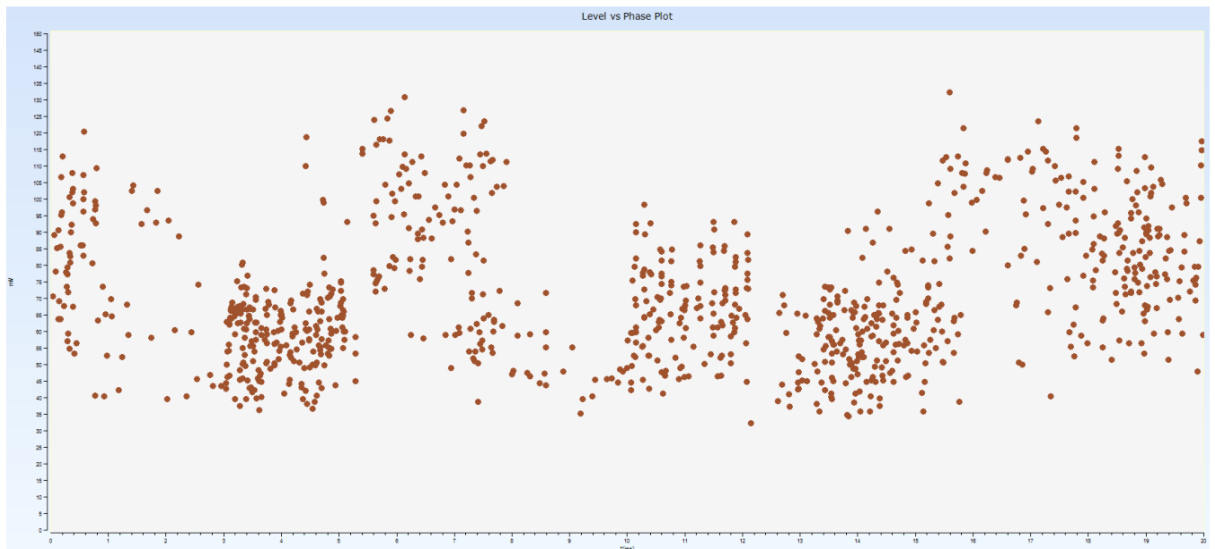
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 10kV pusė, 110kV kraštas 2.8 m aukštyje.



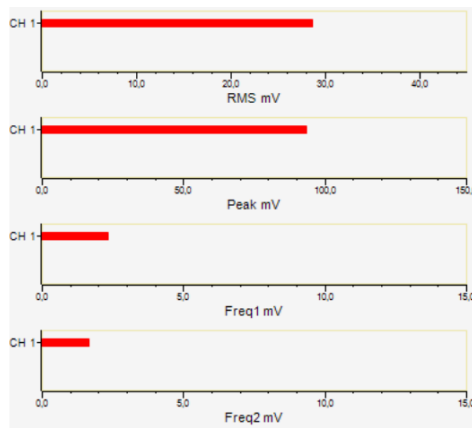
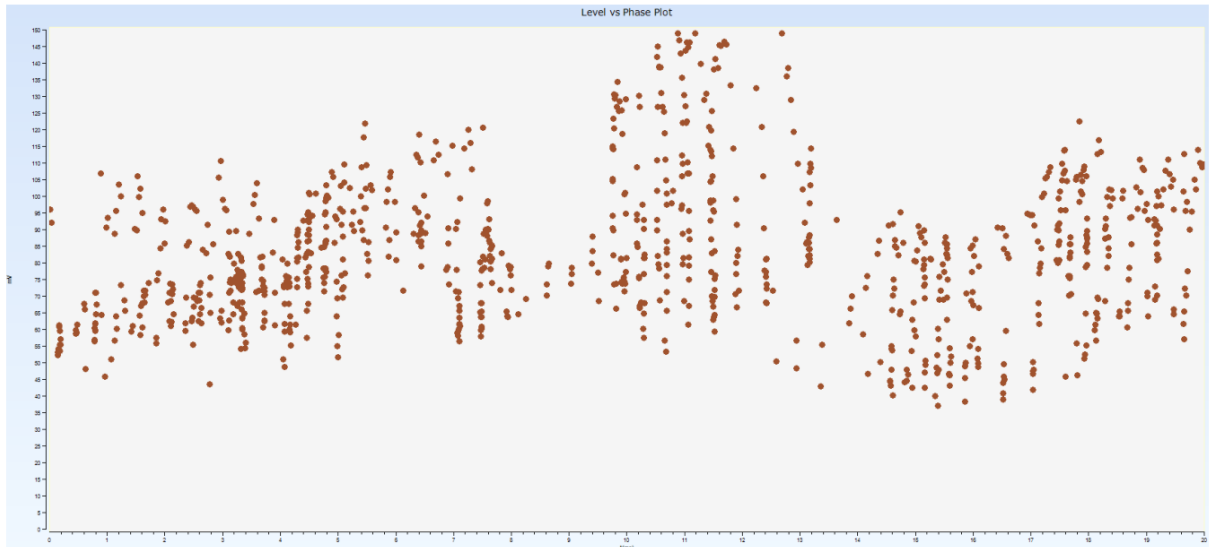
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, A fazė 1.5 m aukštyje.



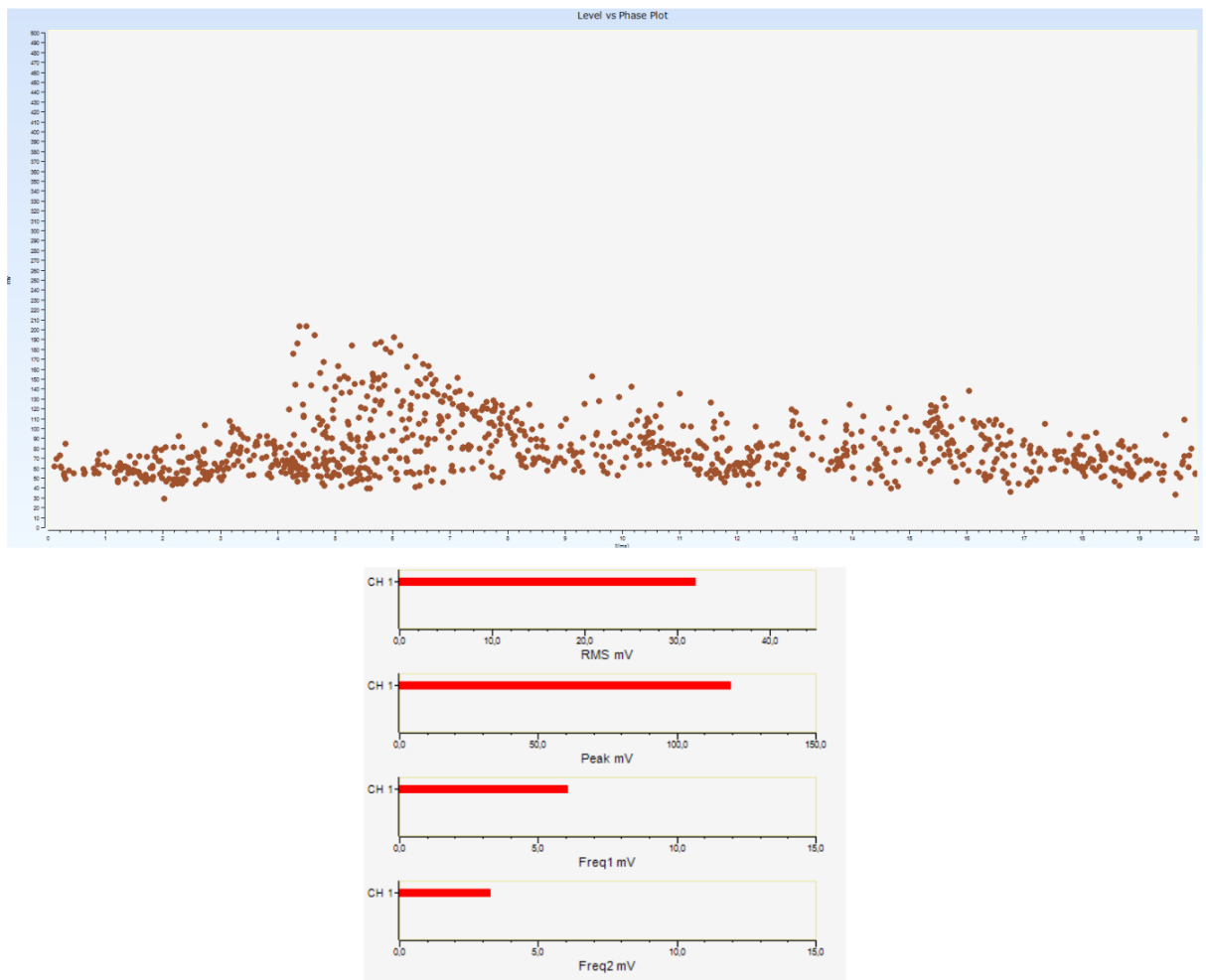
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, A fazė 2.8 m aukštyje.



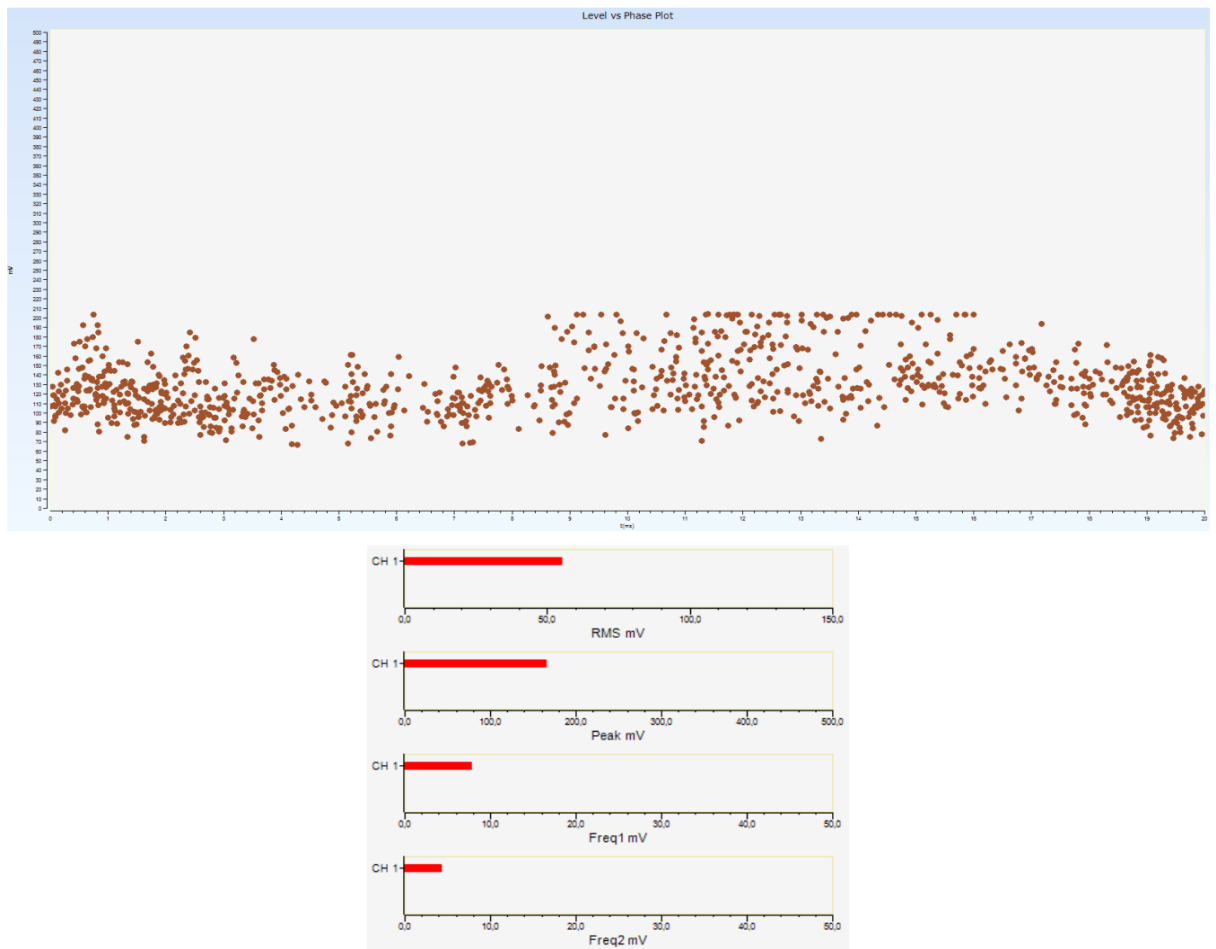
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, B fazė 1.5 m aukštyje.



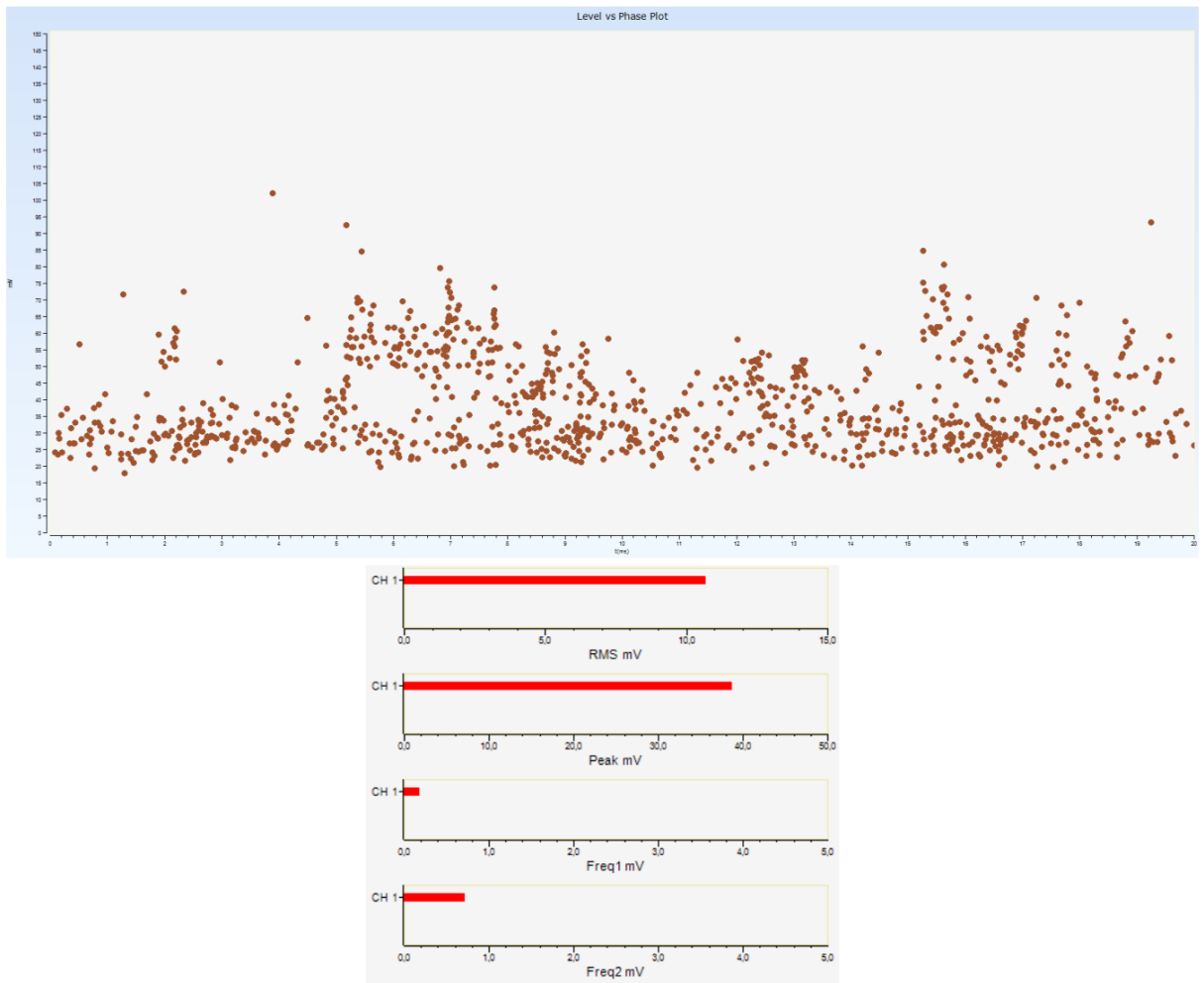
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, B fazė 2.8 m aukštyje.



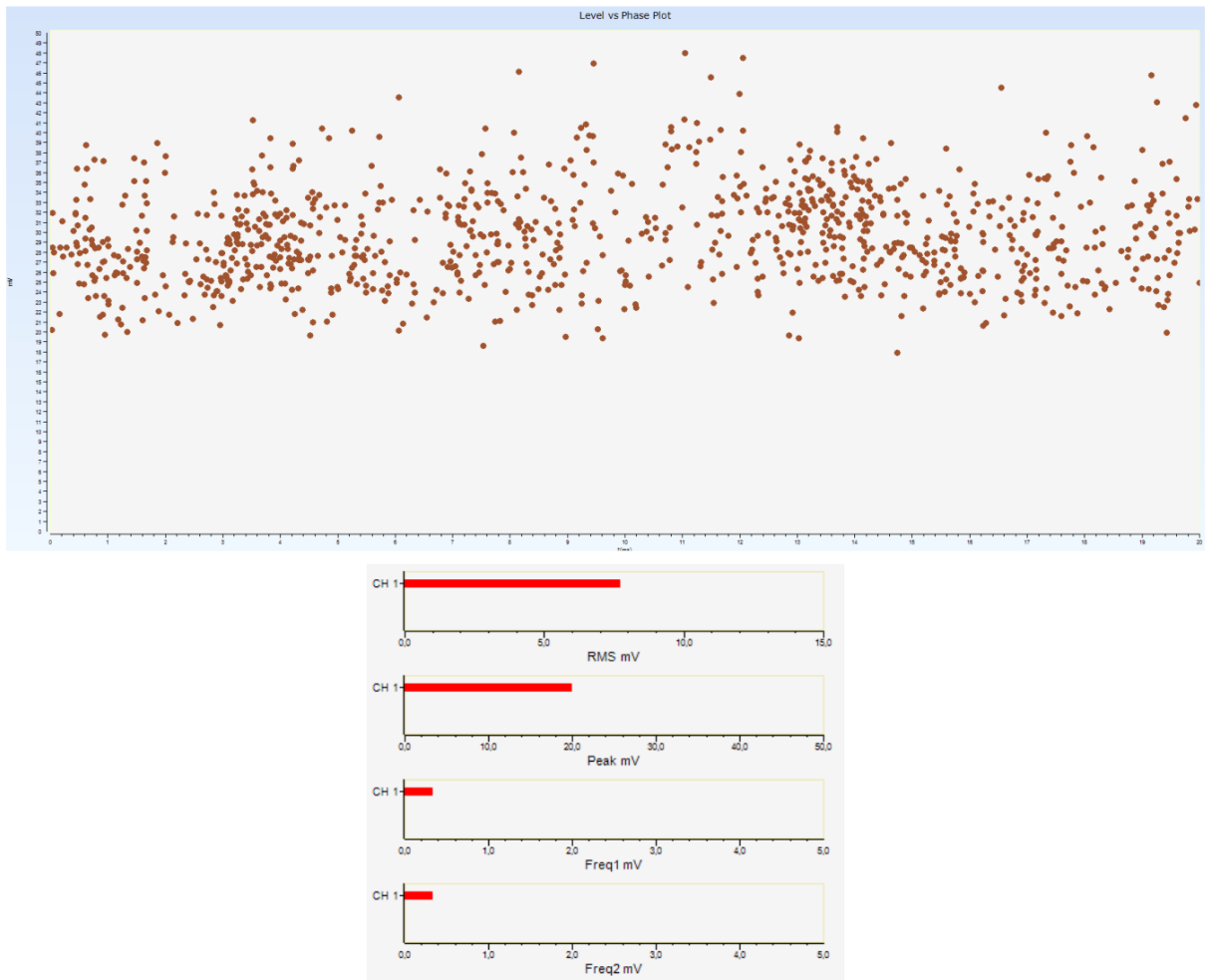
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, C fazė 1.5 m aukštyje.



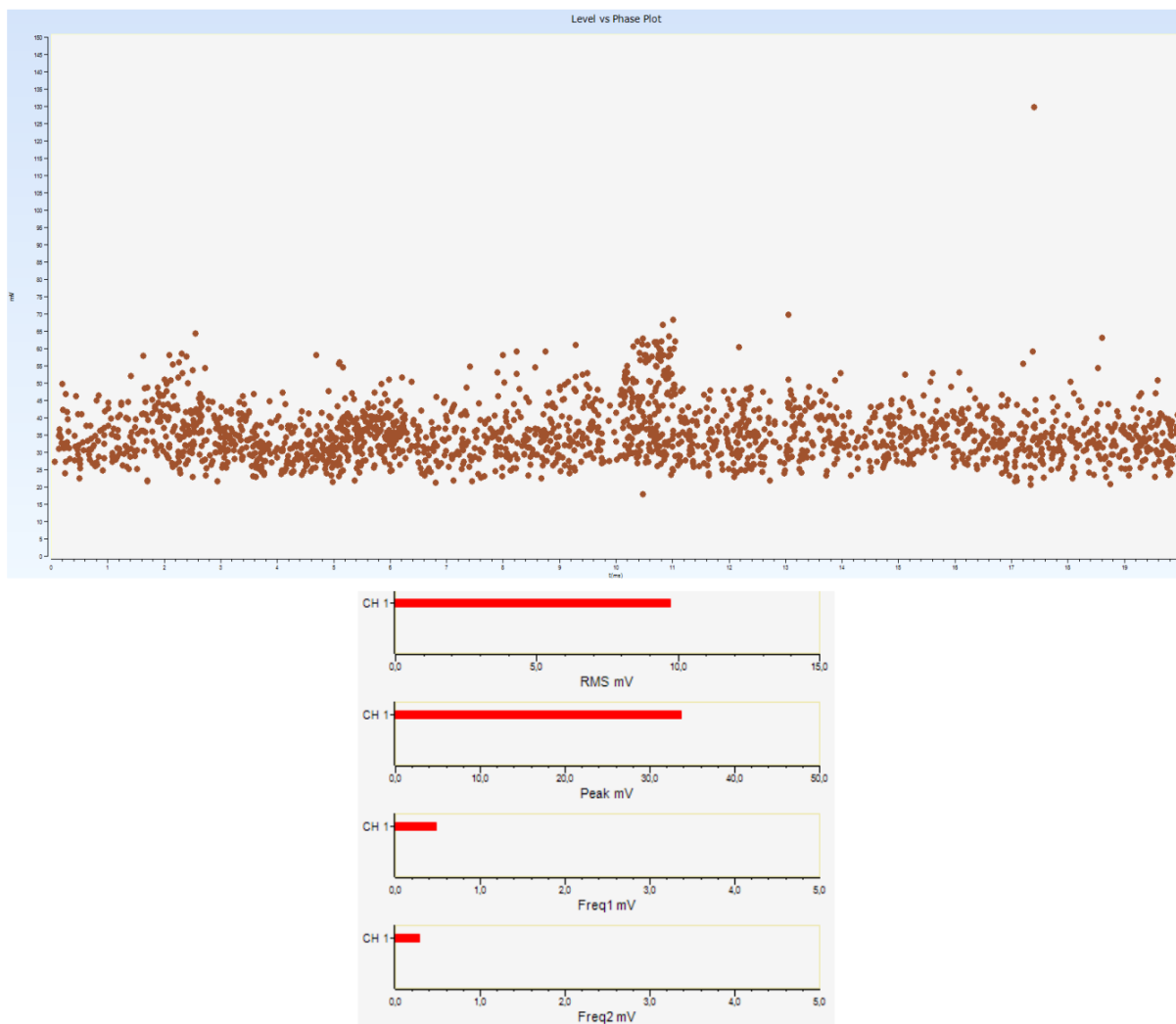
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 110kV pusė, C fazė 2.8 m aukštyje.



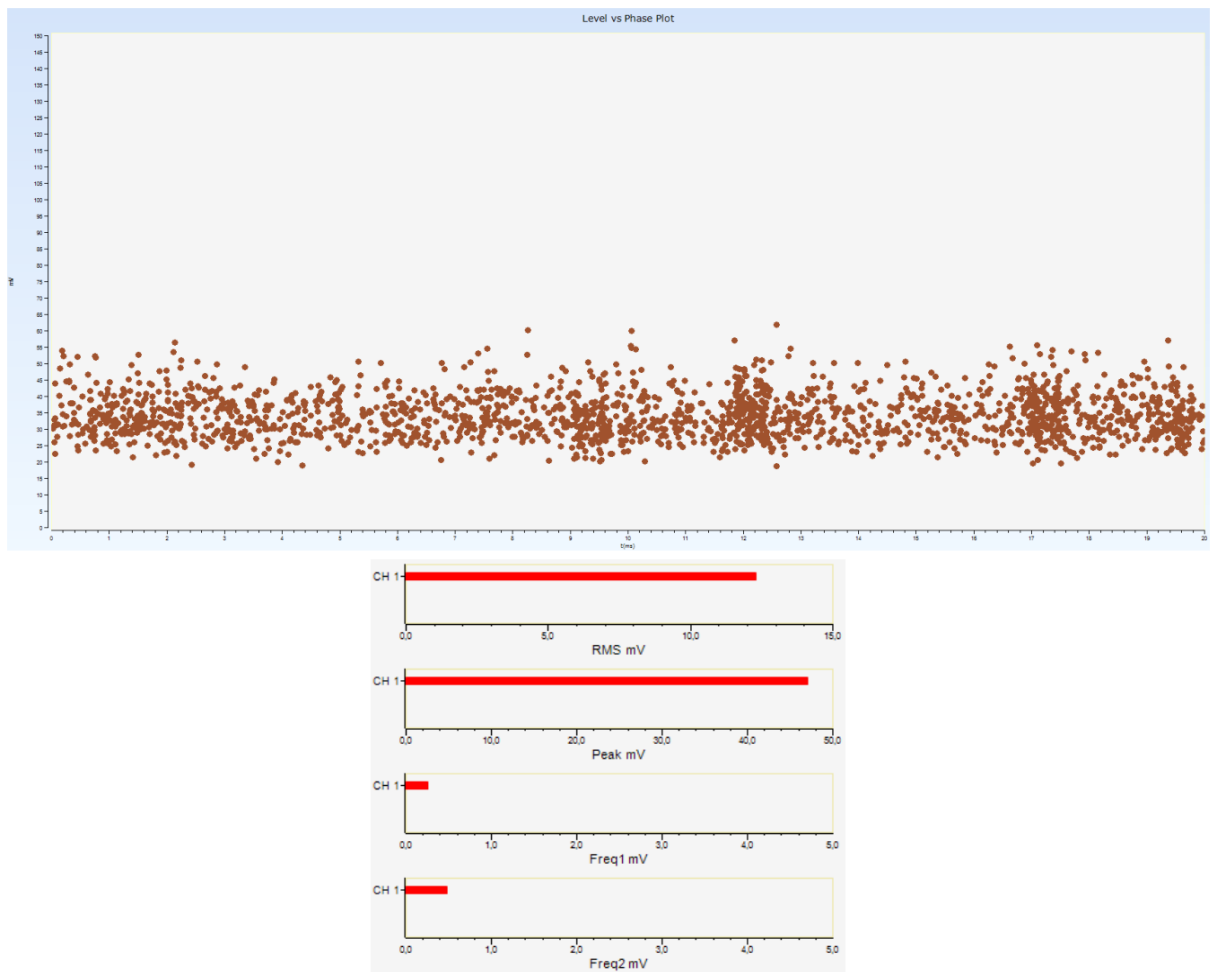
Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusė, 110kV kraštas, 1.5 m aukštyje.



Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusėje, 110kV kraštas, 2.8 m aukštyje.



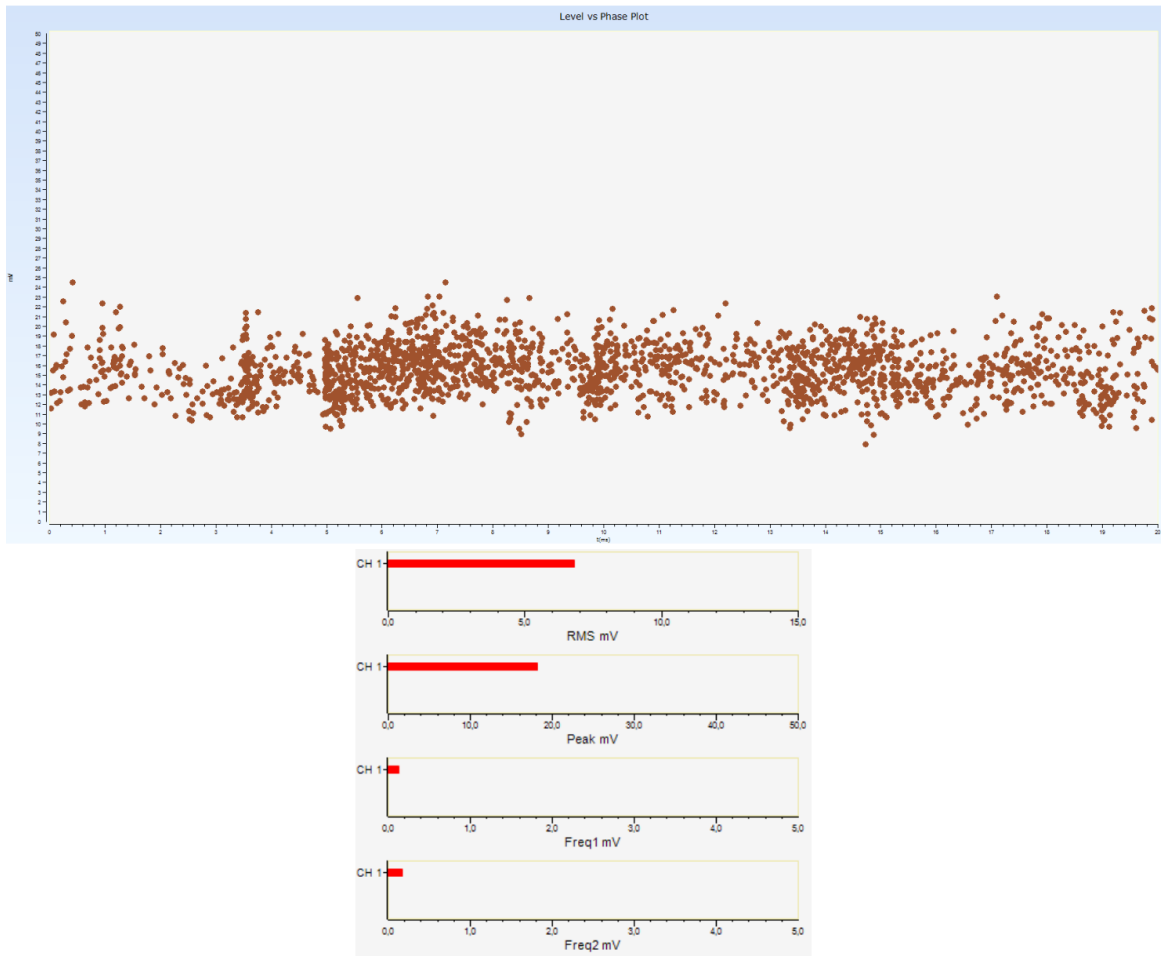
Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusė, 330kV kraštas, 1.5 m aukštyje.



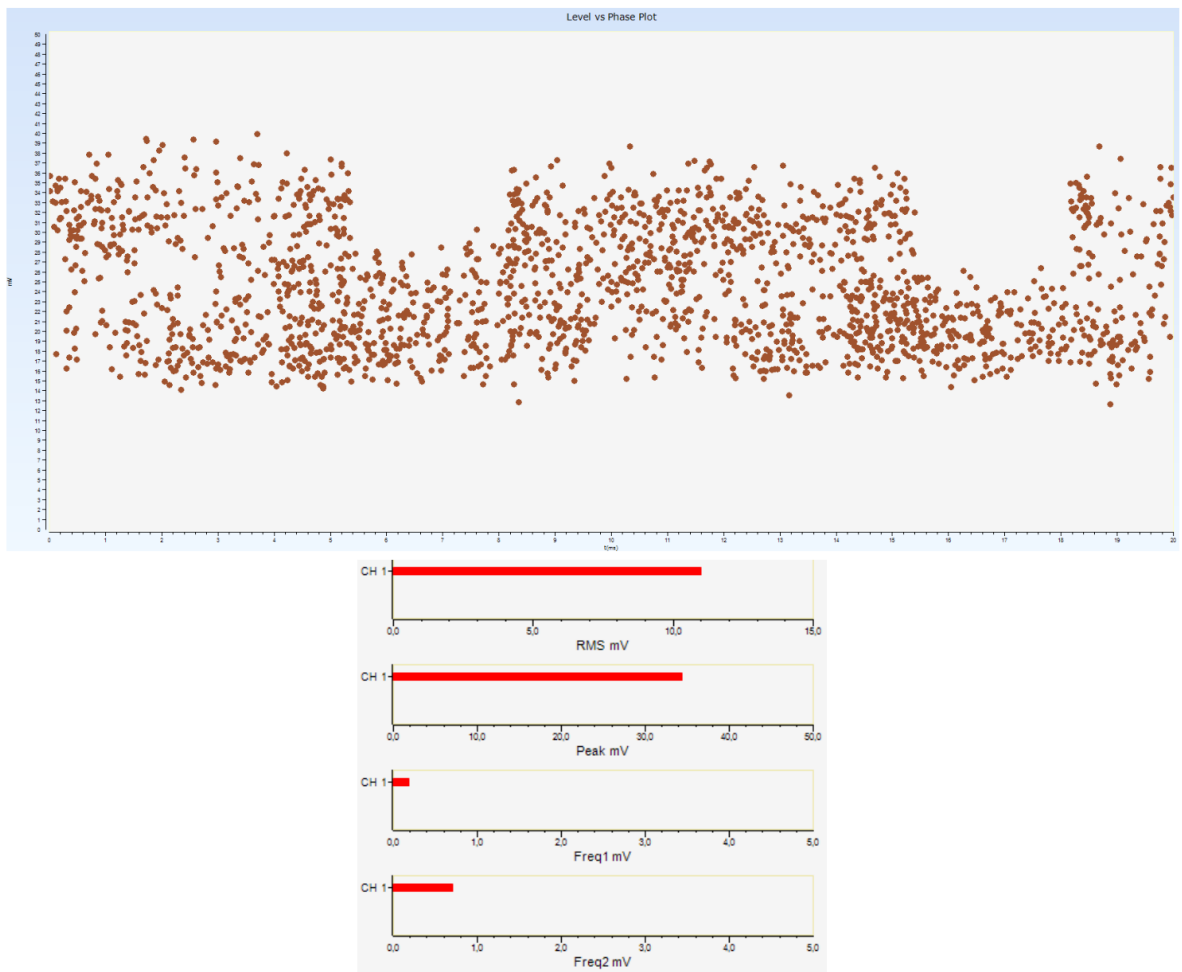
Dalinių išlydžių lygio registravimas, atšakų perjungiklio pusė, 330kV kraštas, 2.8 m aukštyje.

### 3 priedas. Šuntinio reaktoriaus matavimai

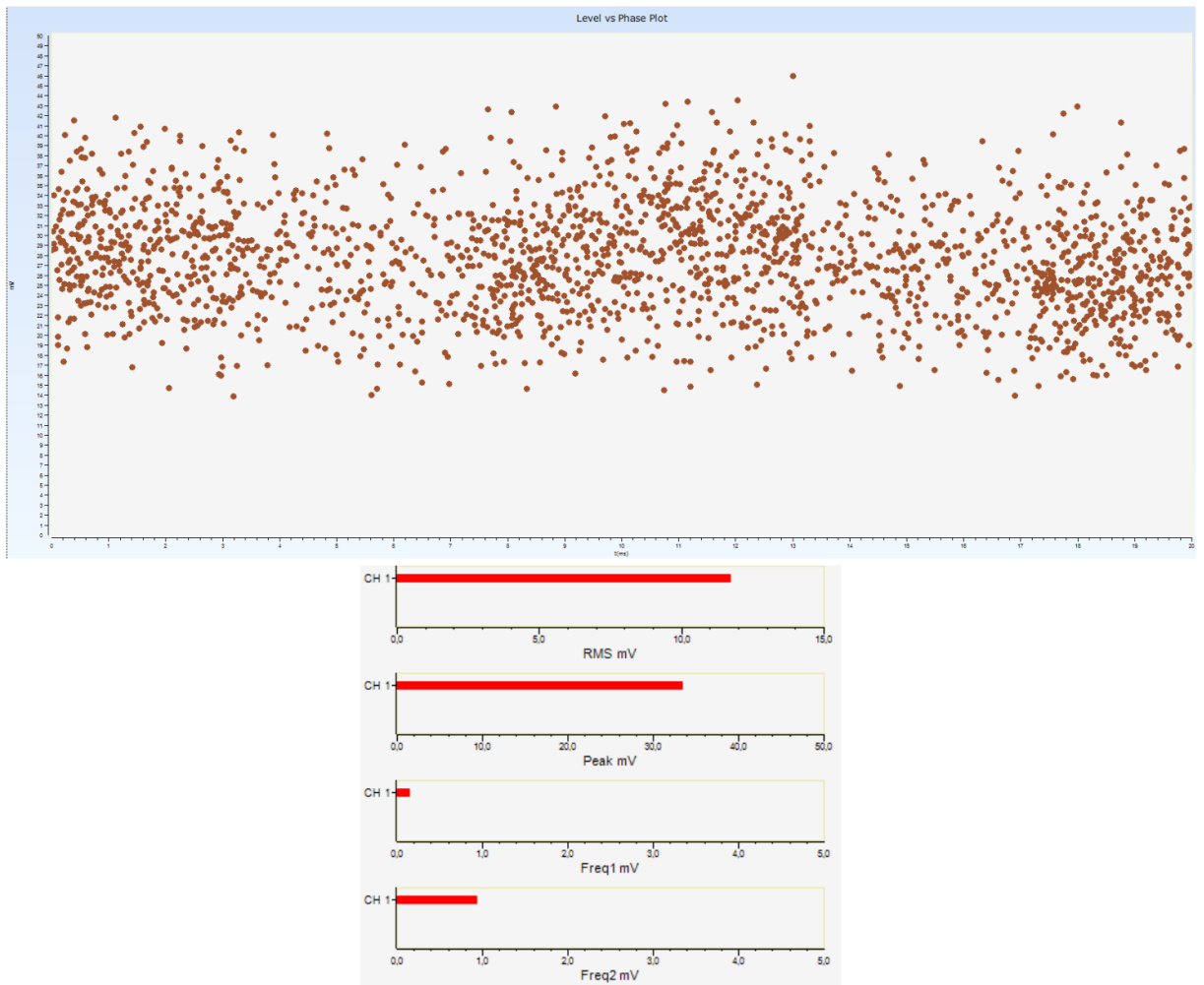
DI registravimui buvo nustatyta 5000 taškų. Apačios aukštis - ~0,5 m, Viršaus - ~1,8 m.



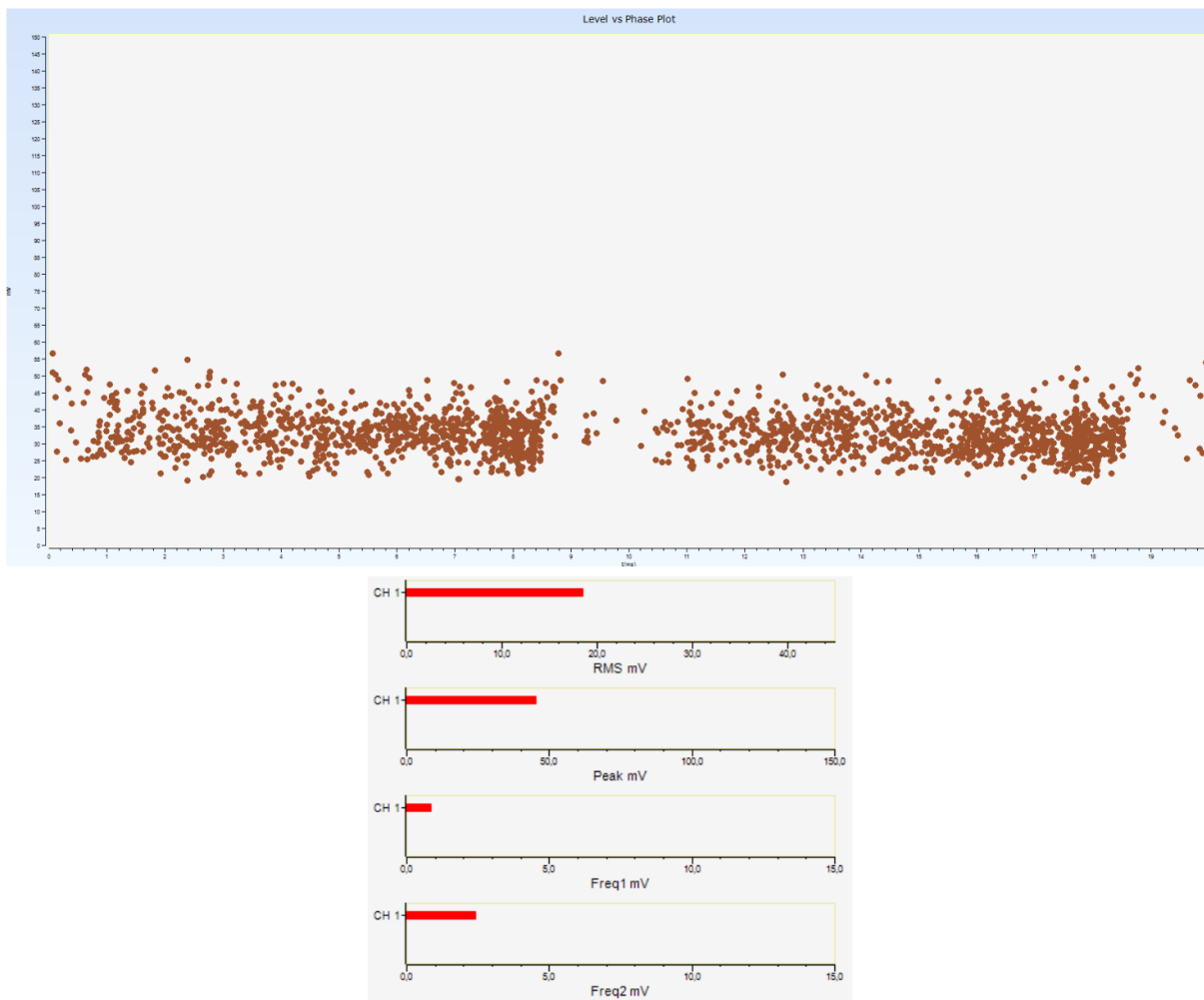
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 400 kV A fazės įvado pusėje 0,5 m aukštyje.



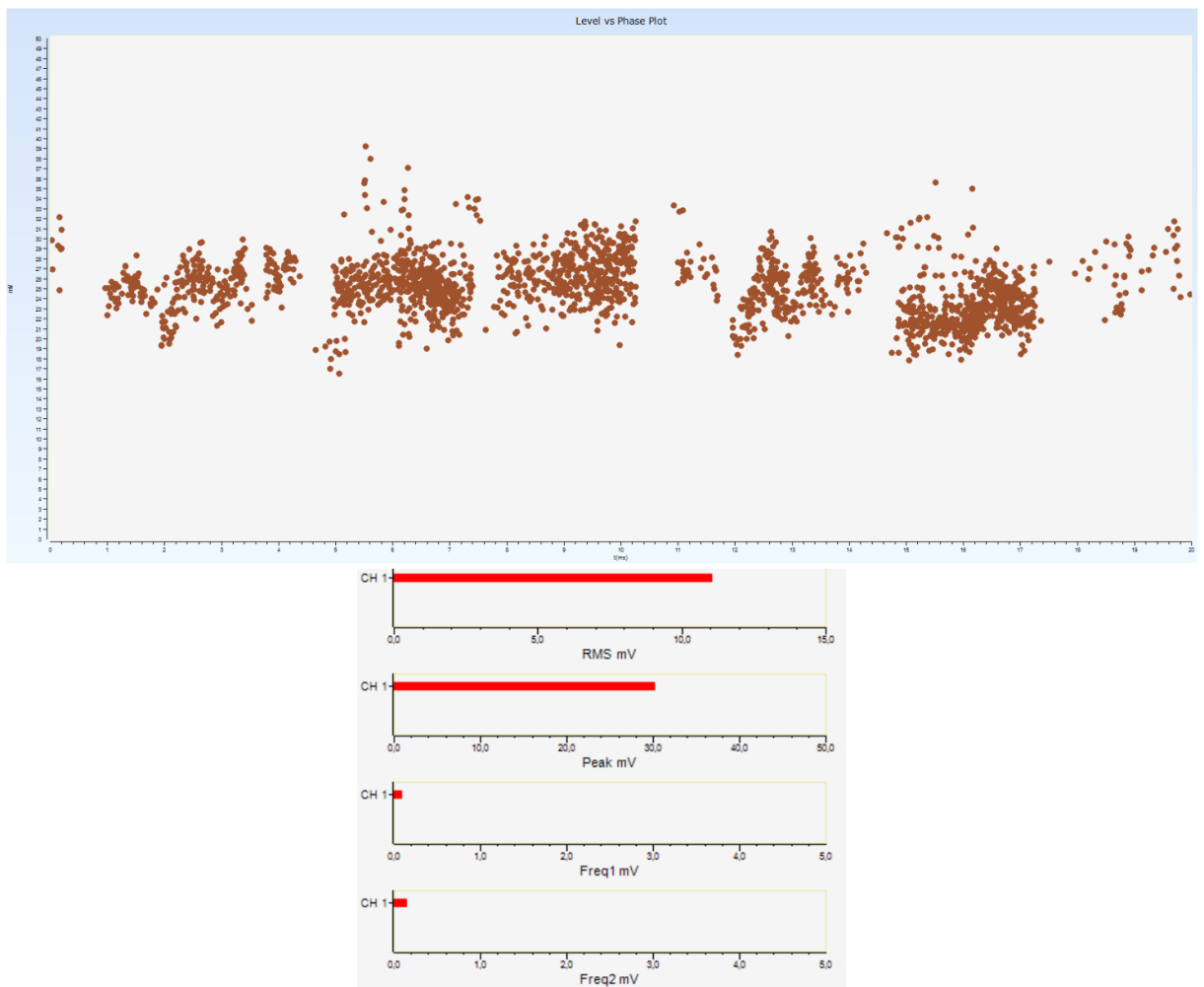
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 400 kV A fazės įvado pusėje 1,8 m aukštyje.



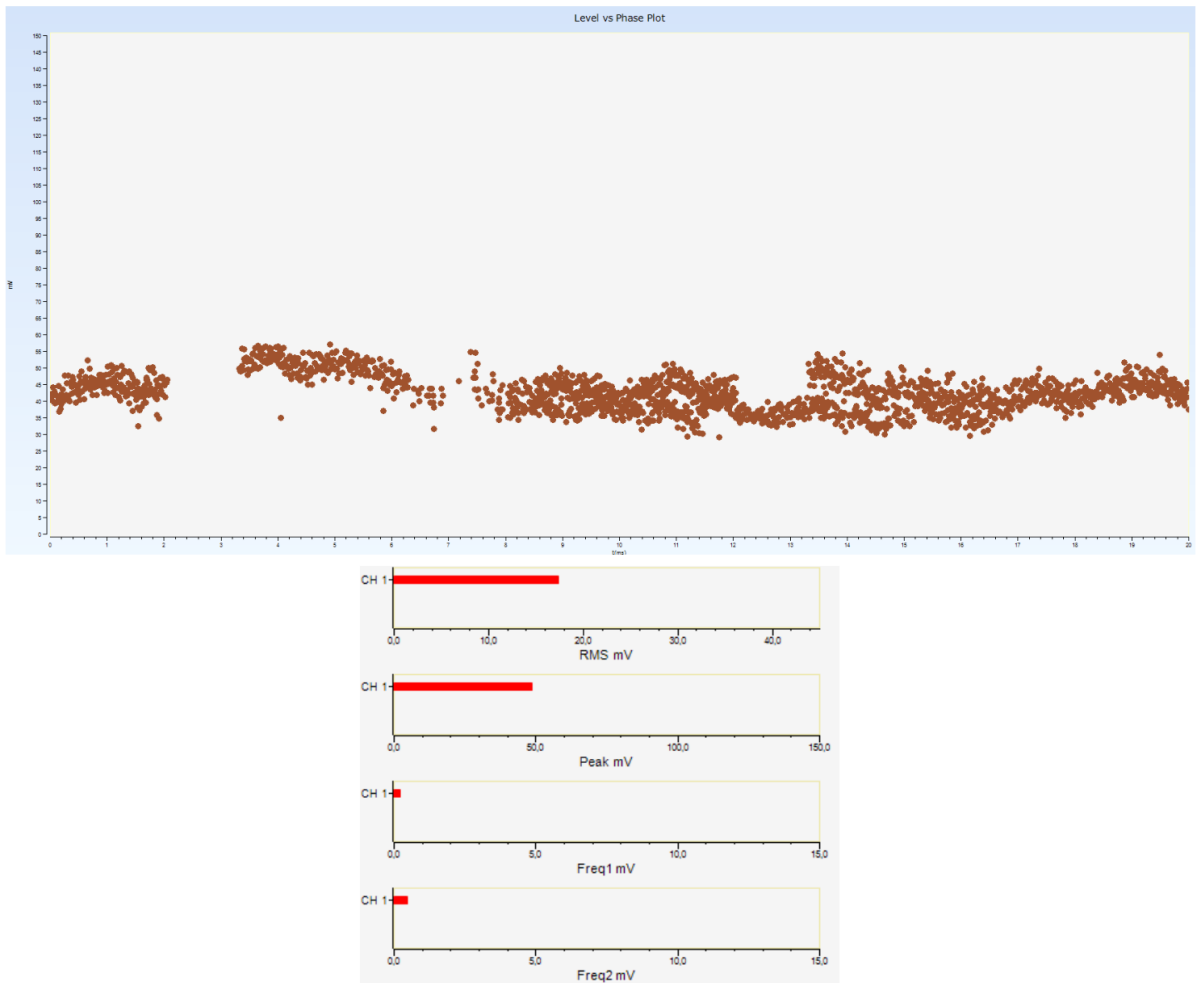
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 400 kV B fazės įvado pusėje 0,5 m aukštyje.



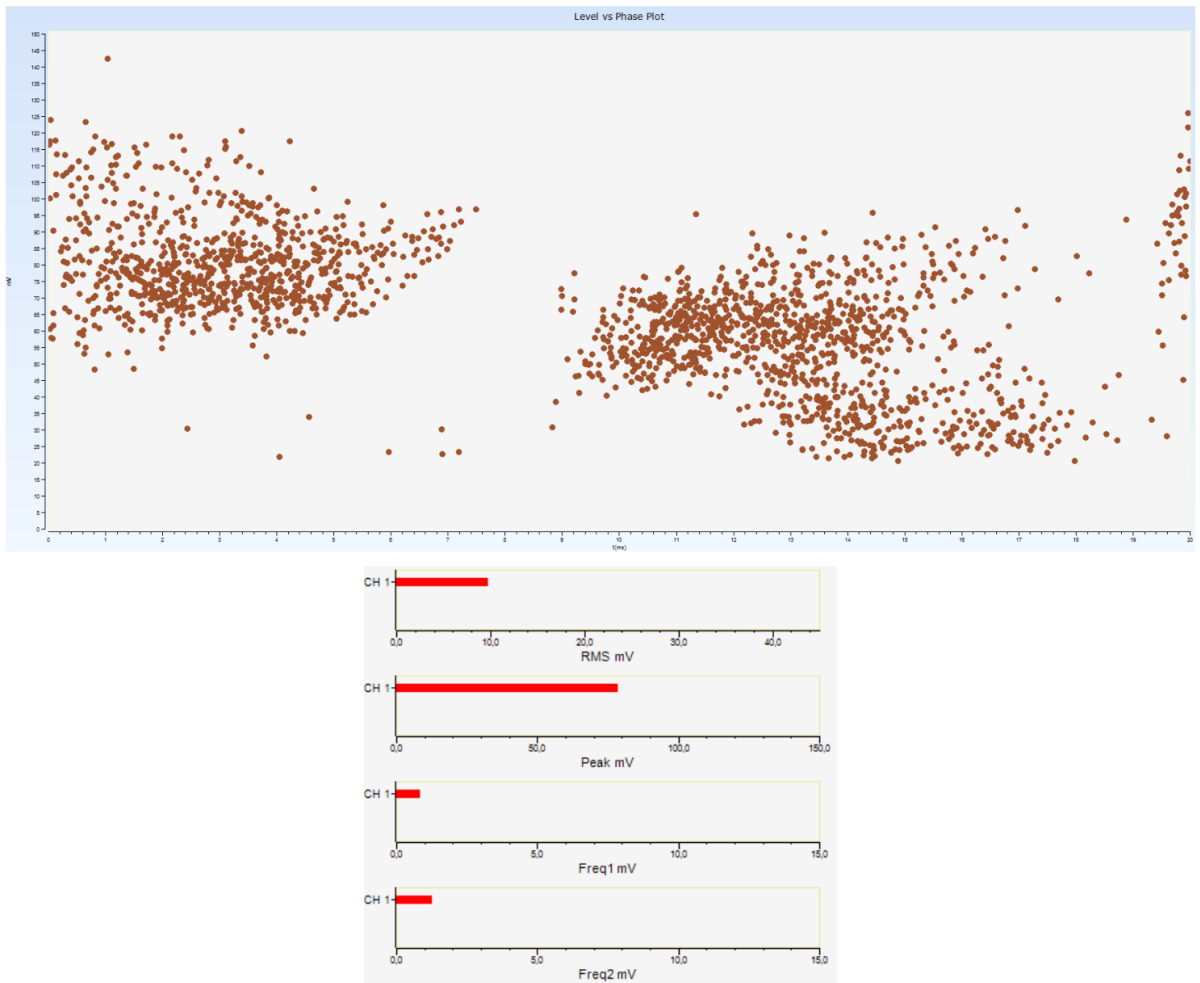
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 400 kV B fazės įvado pusėje 1,8 m aukštyje.



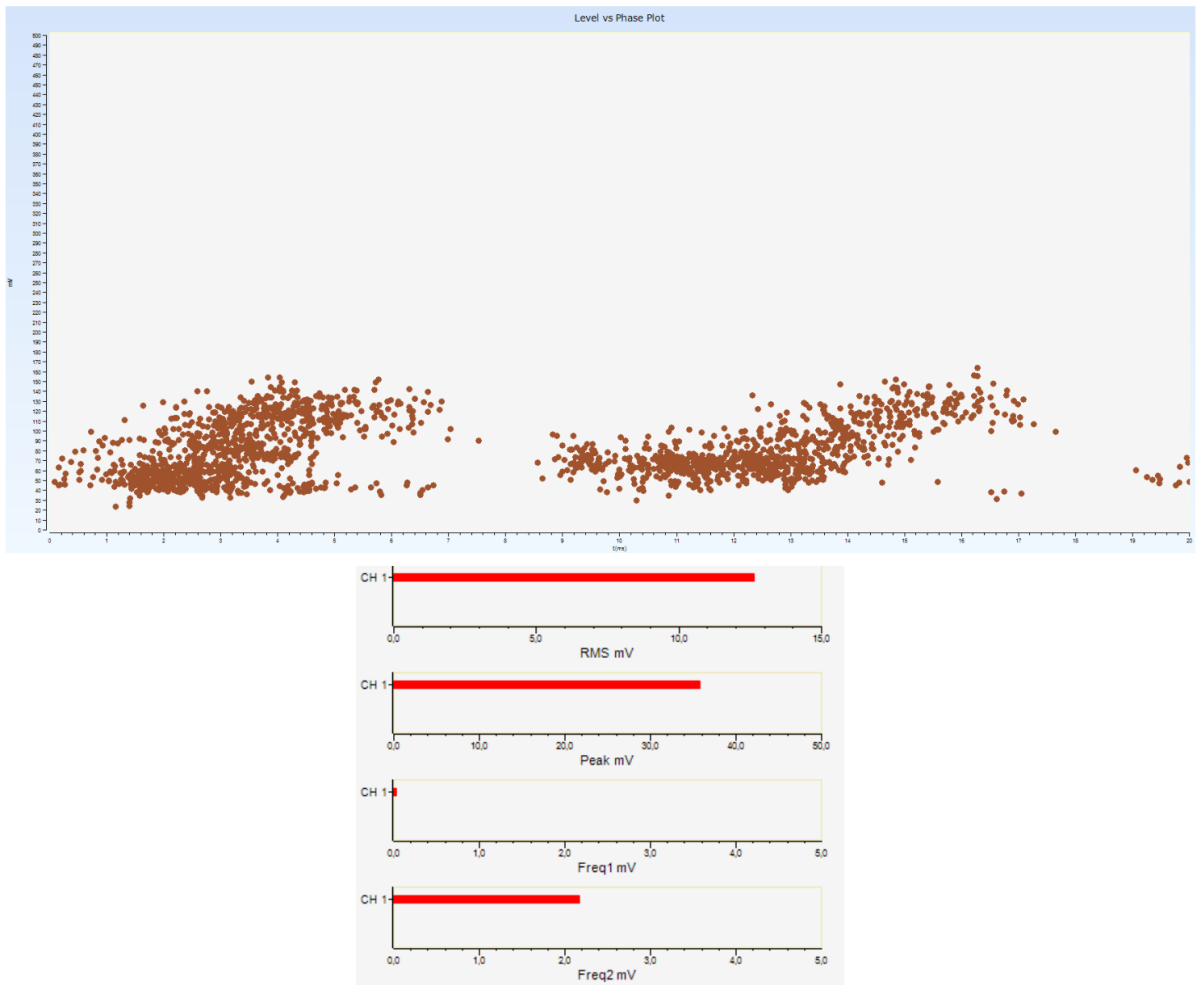
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 400 kV C fazės įvado pusėje 0,5 m aukštyje.



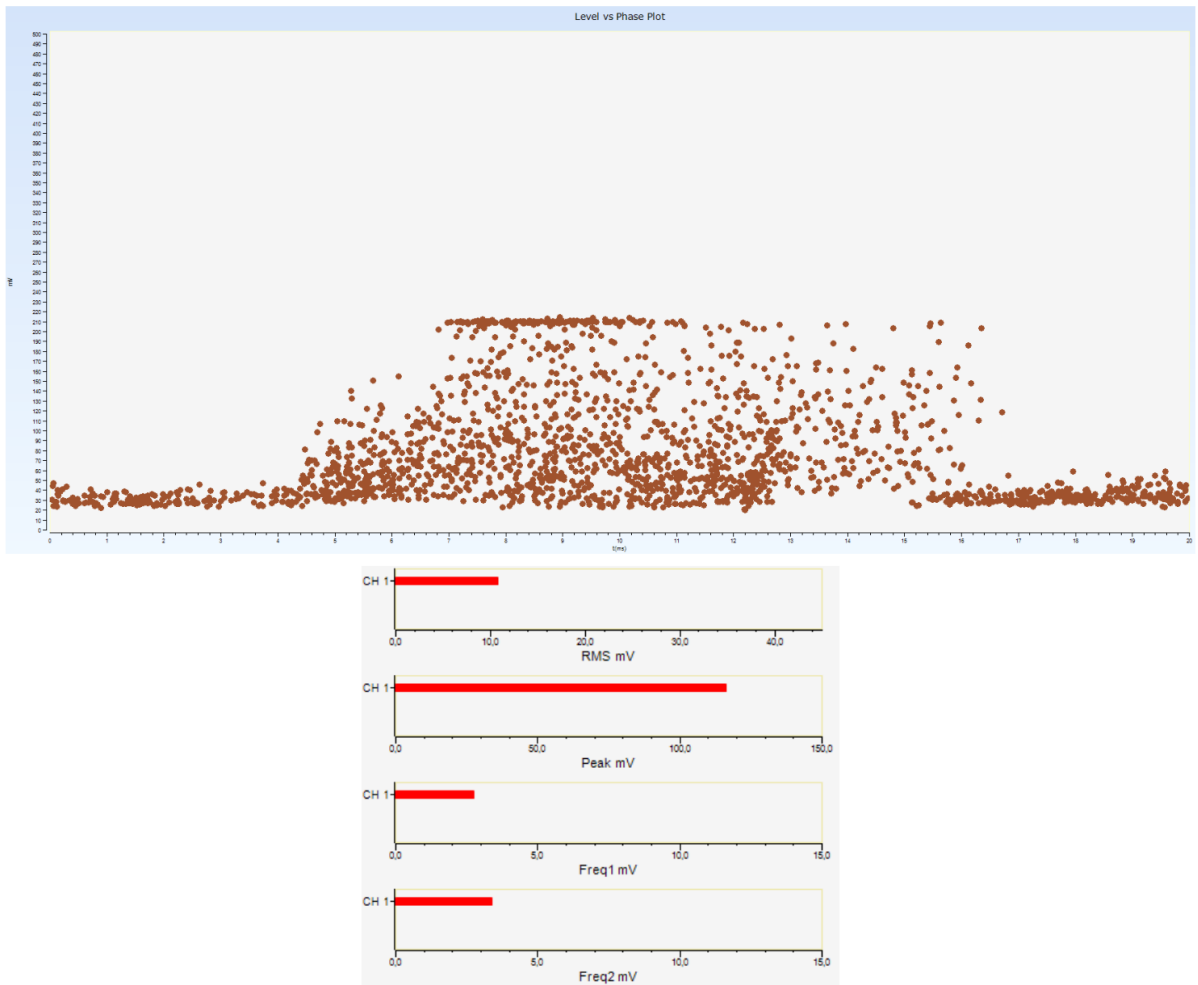
Dalinių išlydžių lygio registravimas, 400 kV C fazės įvado pusėje 1,8 m aukštyje.



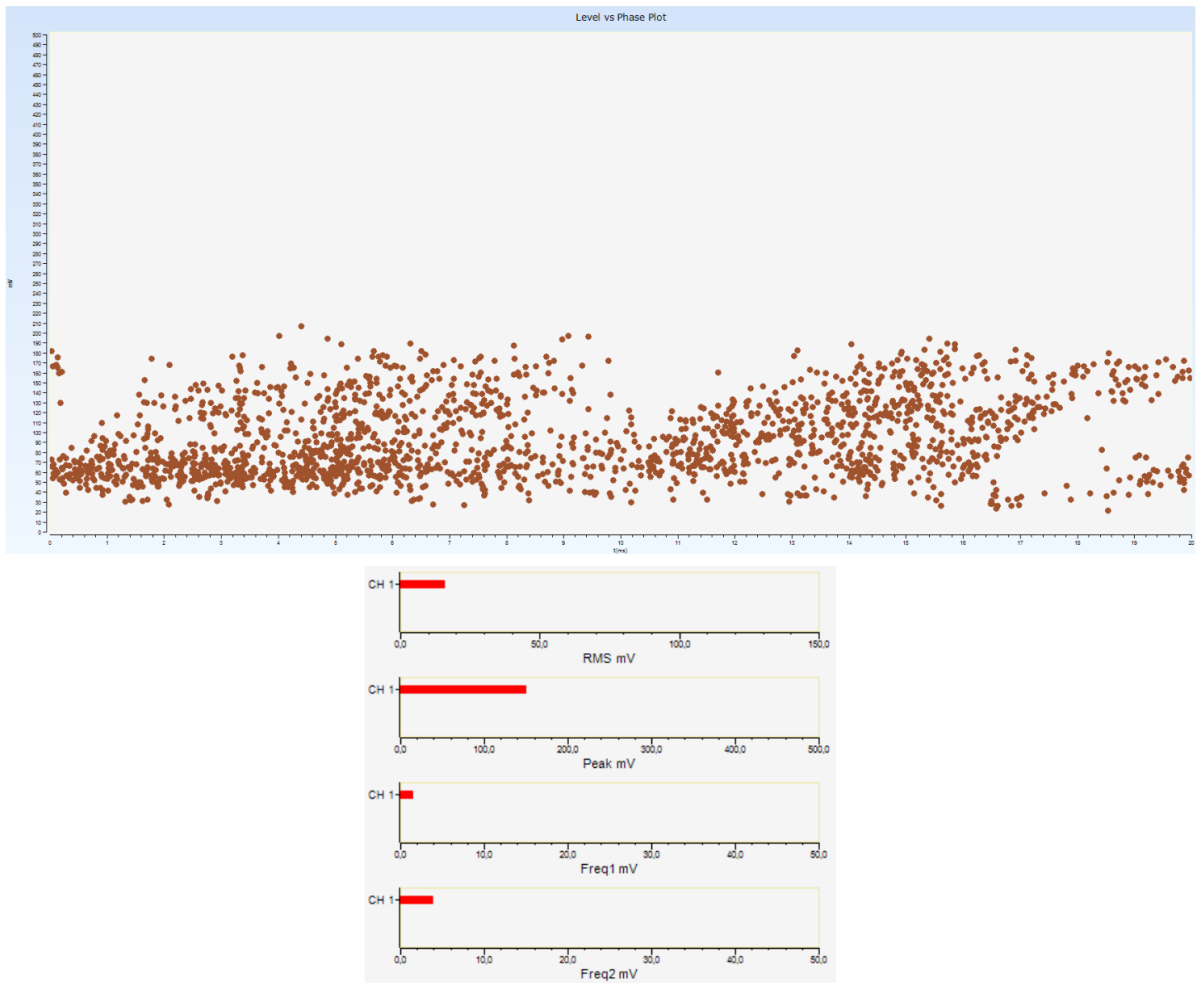
Dalinių išlydžių lygio registravimas, Neutralės pusė 0,5 m aukštyje.



Dalinių išlydžių lygio registravimas, Neutralės pusė 1,8 m aukštyje.



Dalinių išlydžių lygio registravimas, valdymo spintos pusė 0,5 m aukštyje.



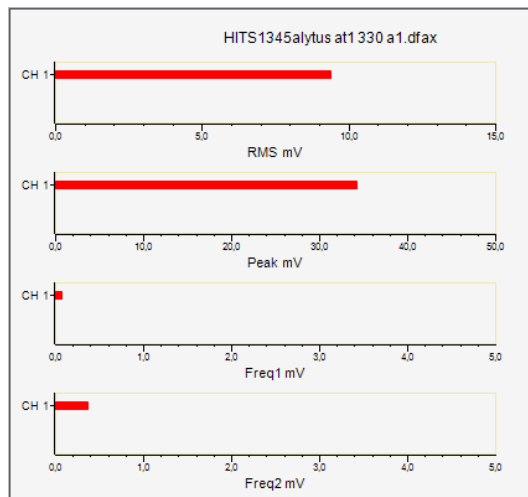
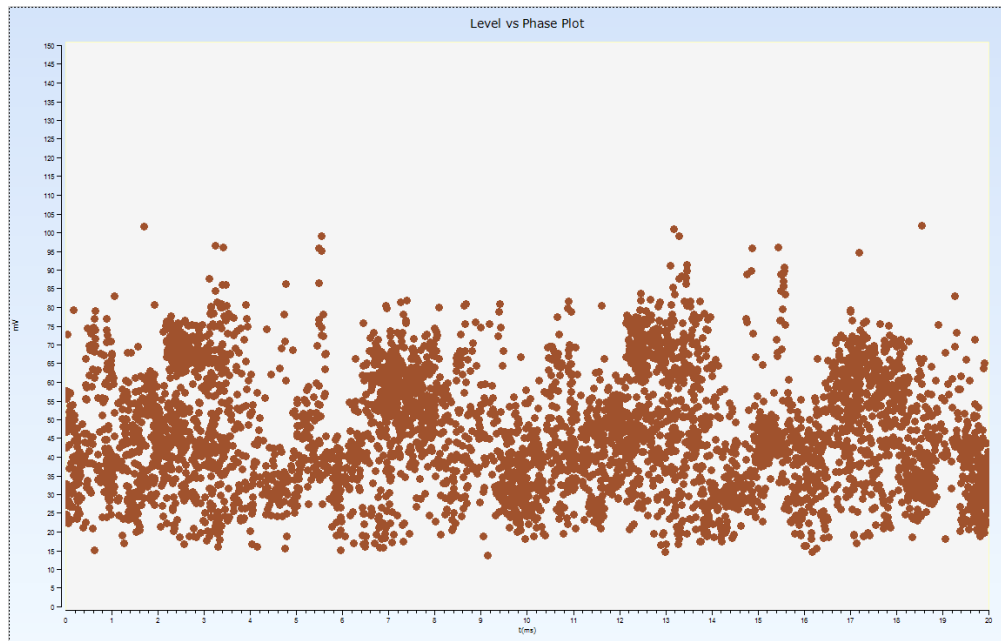
Dalinių išlydžių lygio registravimas, valdymo spintos pusė 1,8 m aukštyje.

#### 4 priedas. Pakartotiniai AT-1 ir AT-2 matavimai

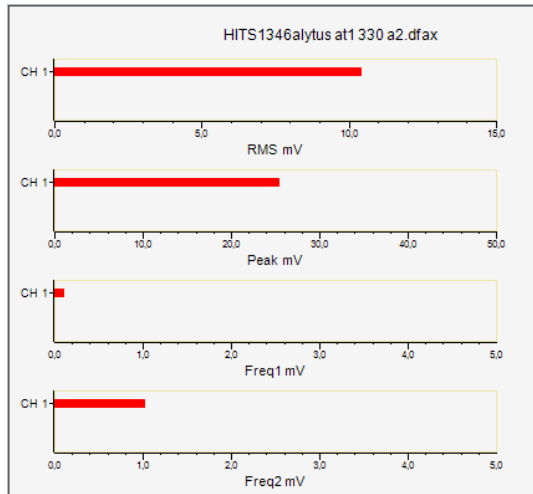
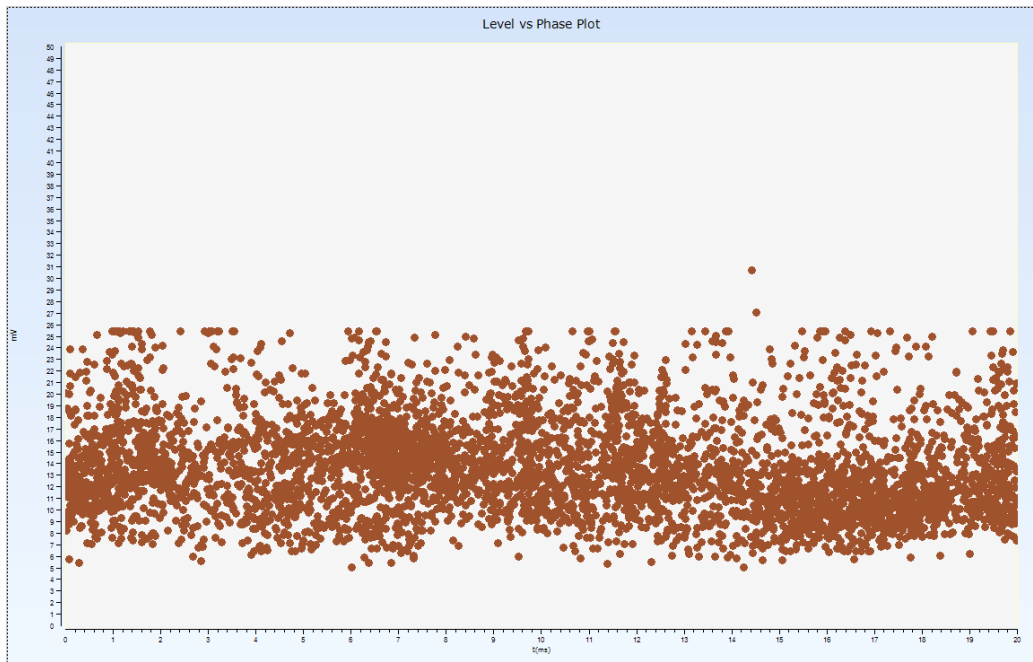
Alytaus TP transformatorių dalinių išlydžių registravimo rezultatai (akustinis).

DI registravimui buvo nustatyta 5000 taškų. Apačios aukštis - ~1,5 m, Viršaus - ~2,8 - 3 m

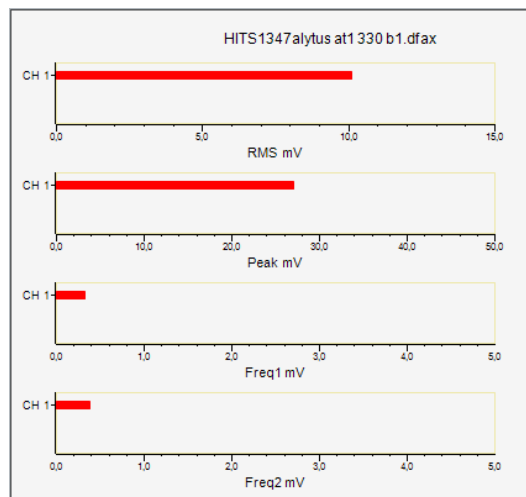
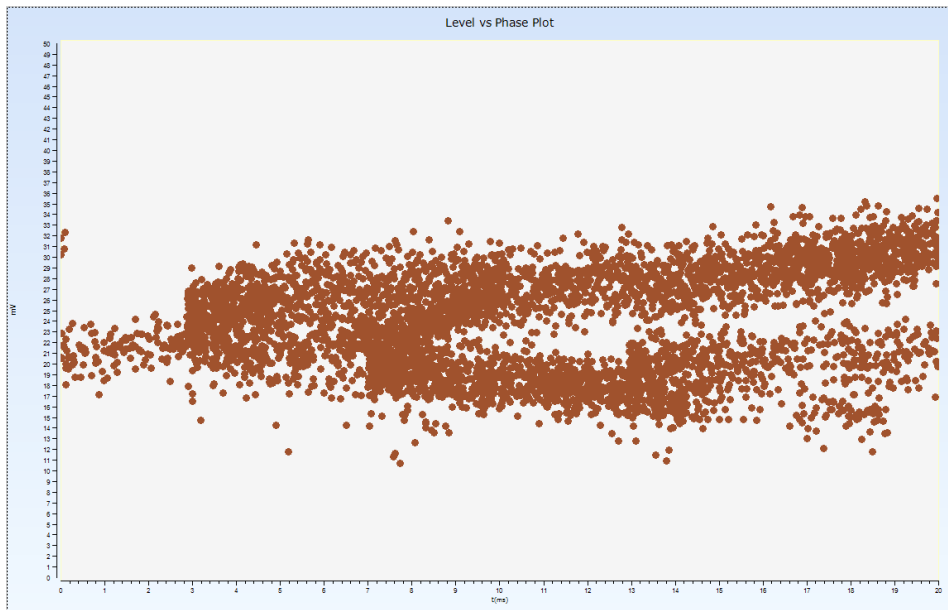
#### AT-1 registravimo duomenys



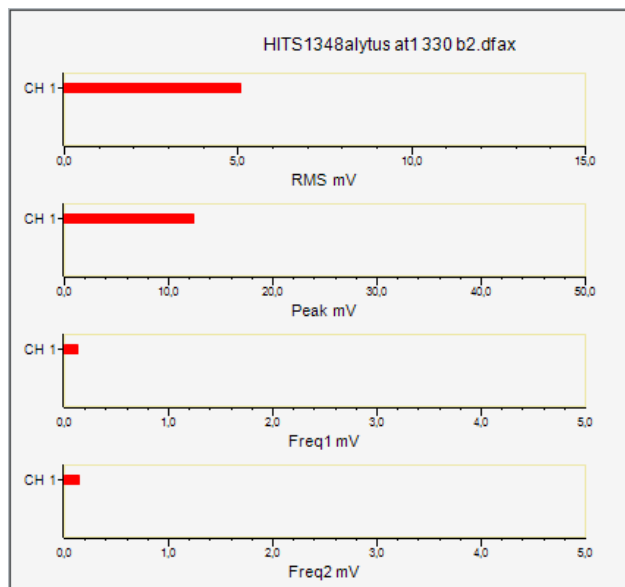
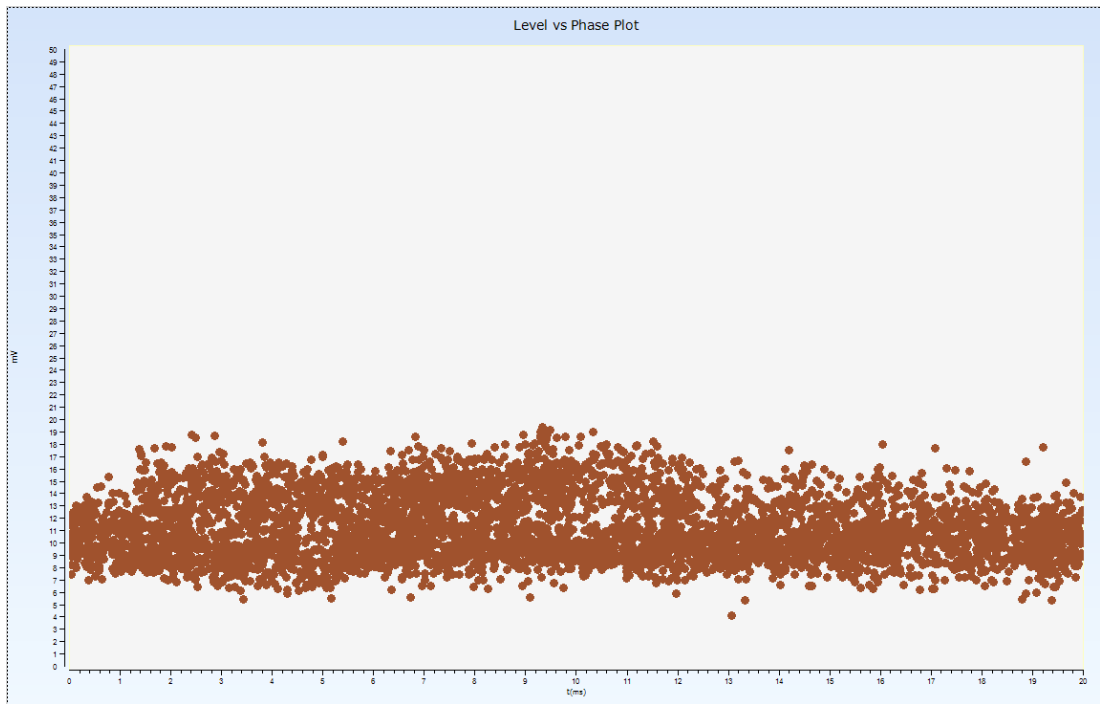
330kV pusēs A fazēs DI registravimas apačioje.



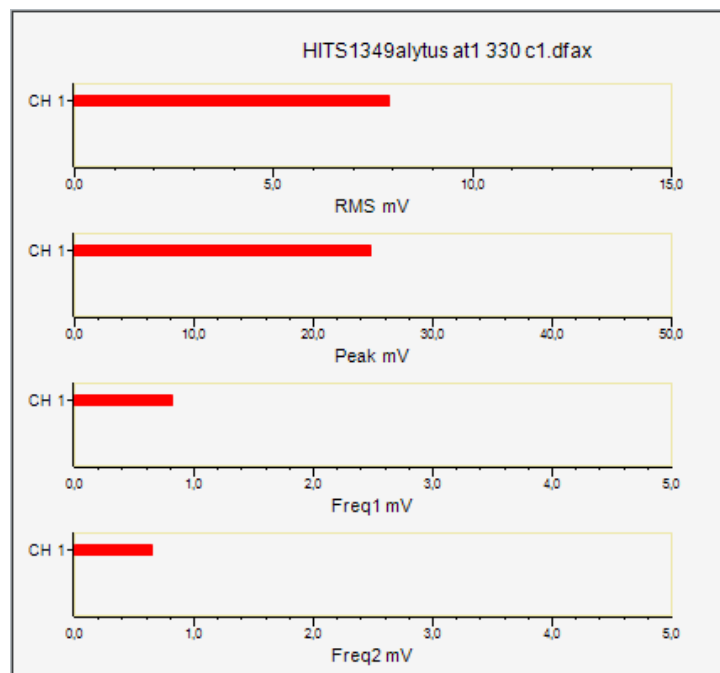
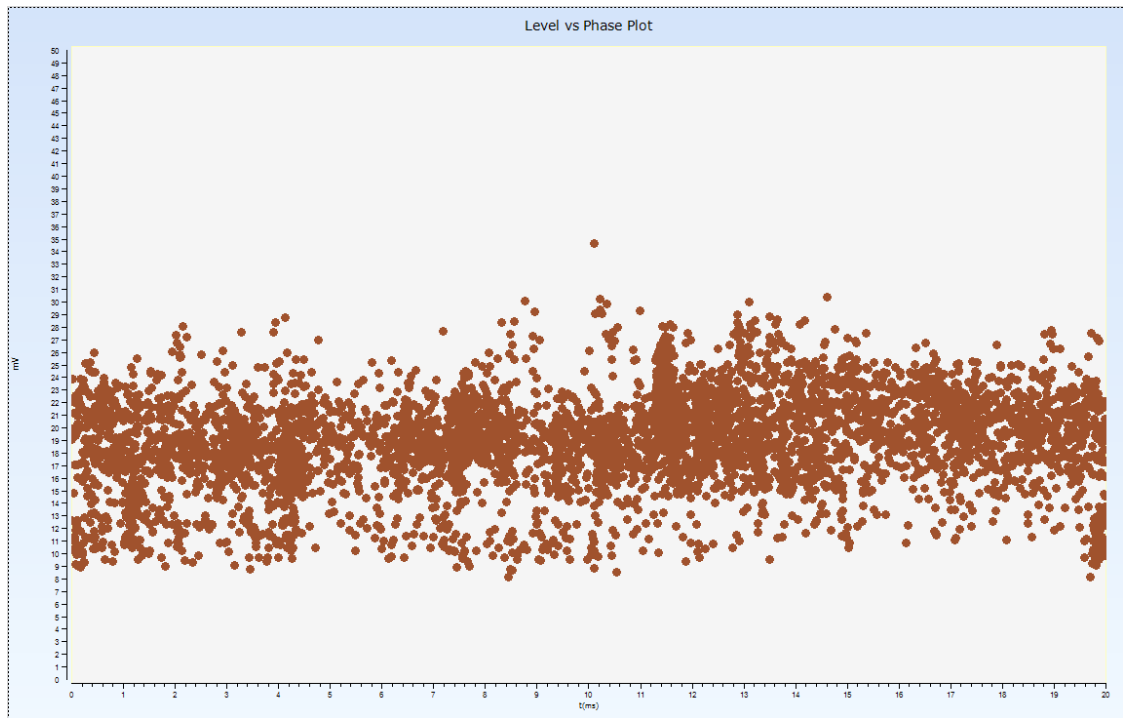
330kV pusēs A fazēs DI registravimas viršuje.



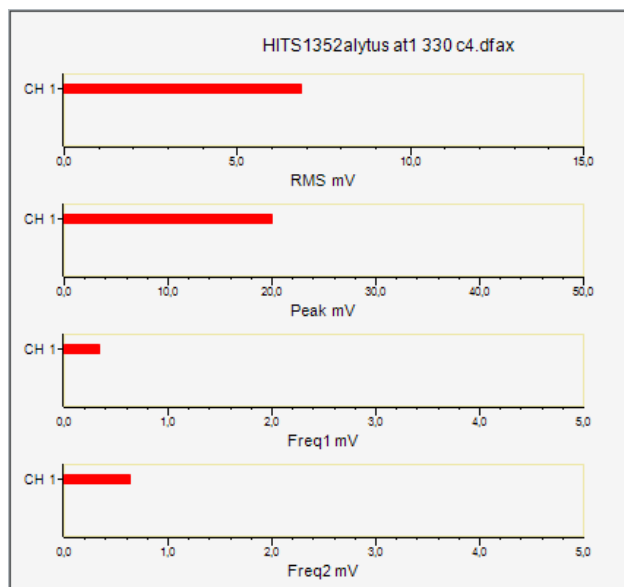
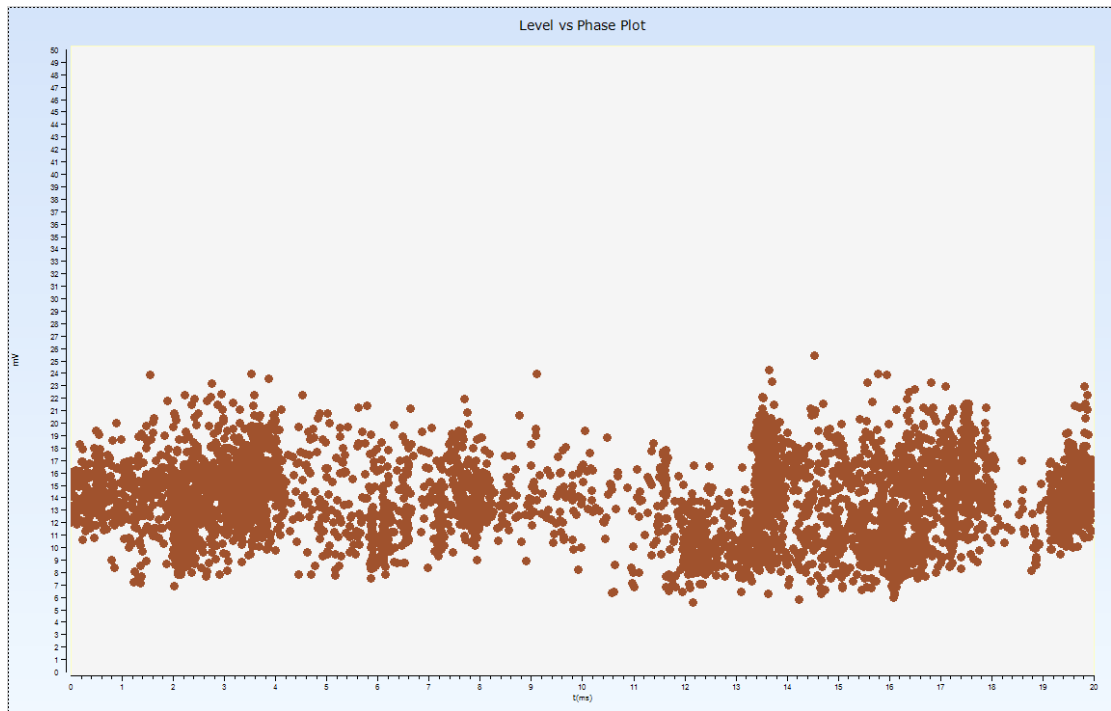
330kV pusēs B fazēs DI registravimas apačioje.



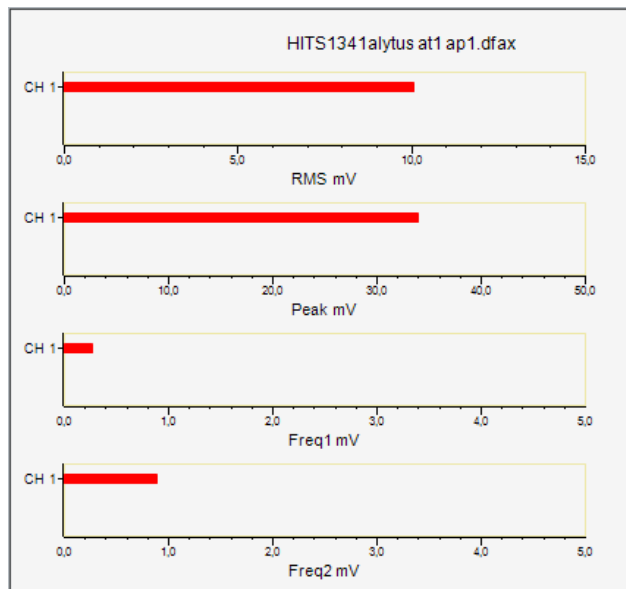
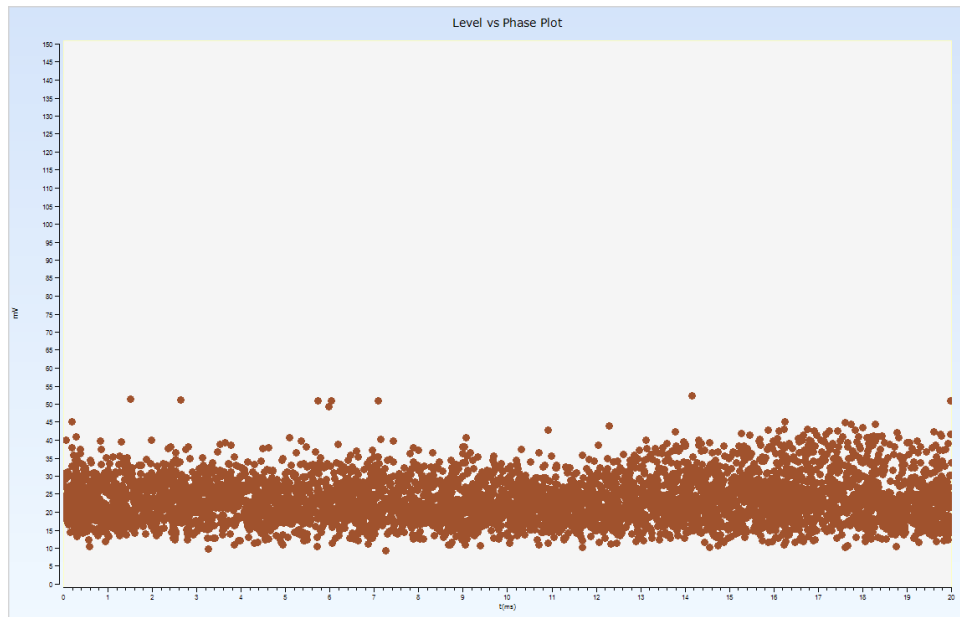
330kV pusēs B fazēs DI registravimas viršuje.



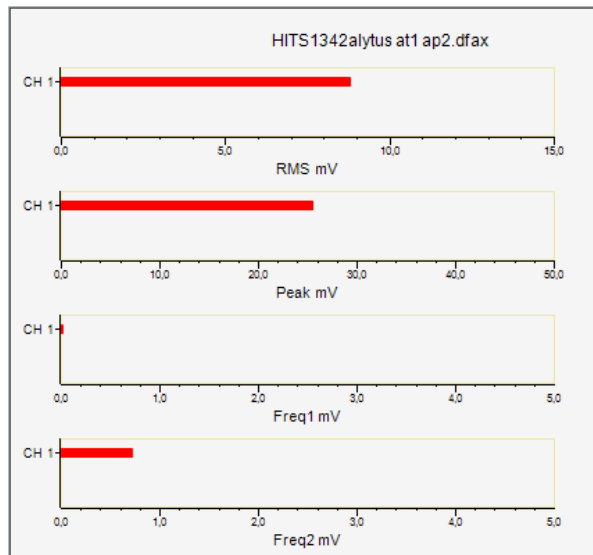
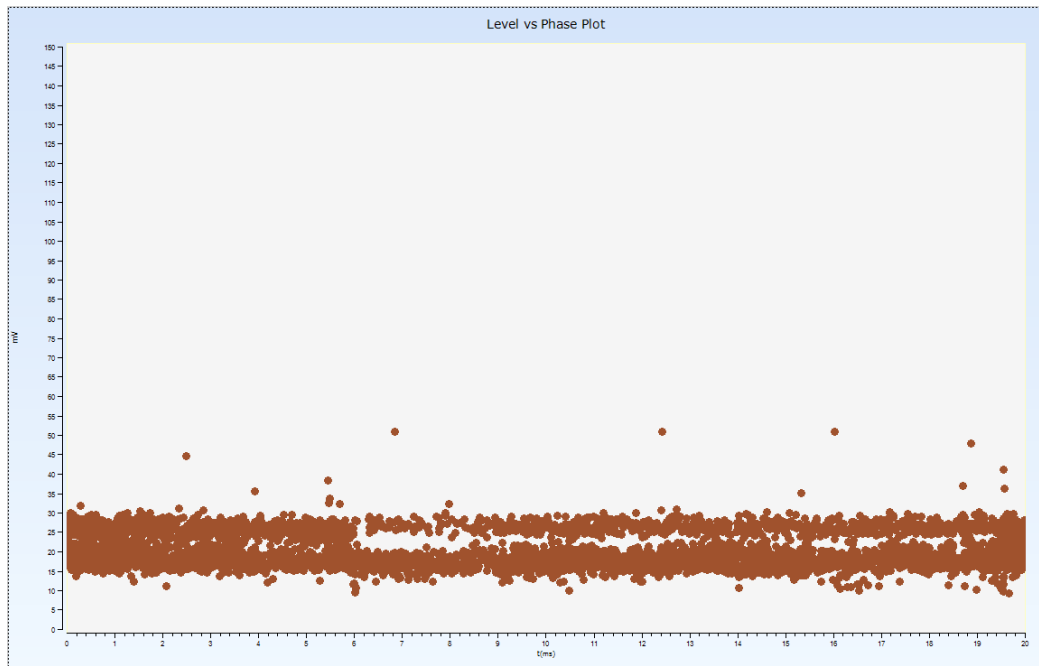
330kV pusēs C fazēs DI registravimas apačioje.



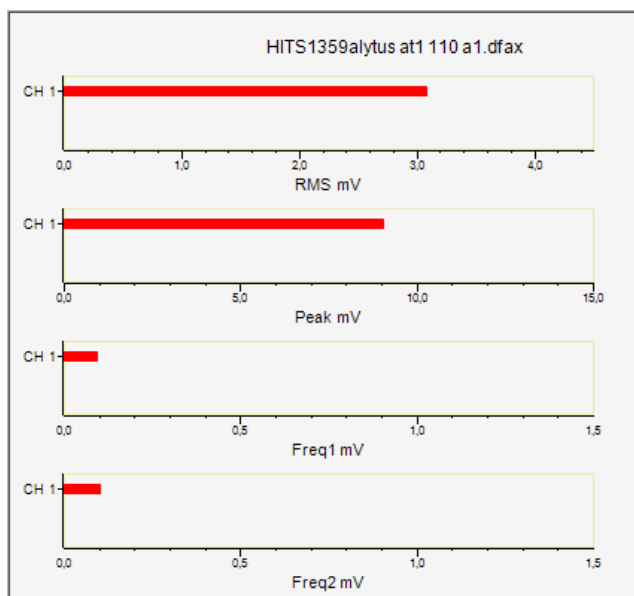
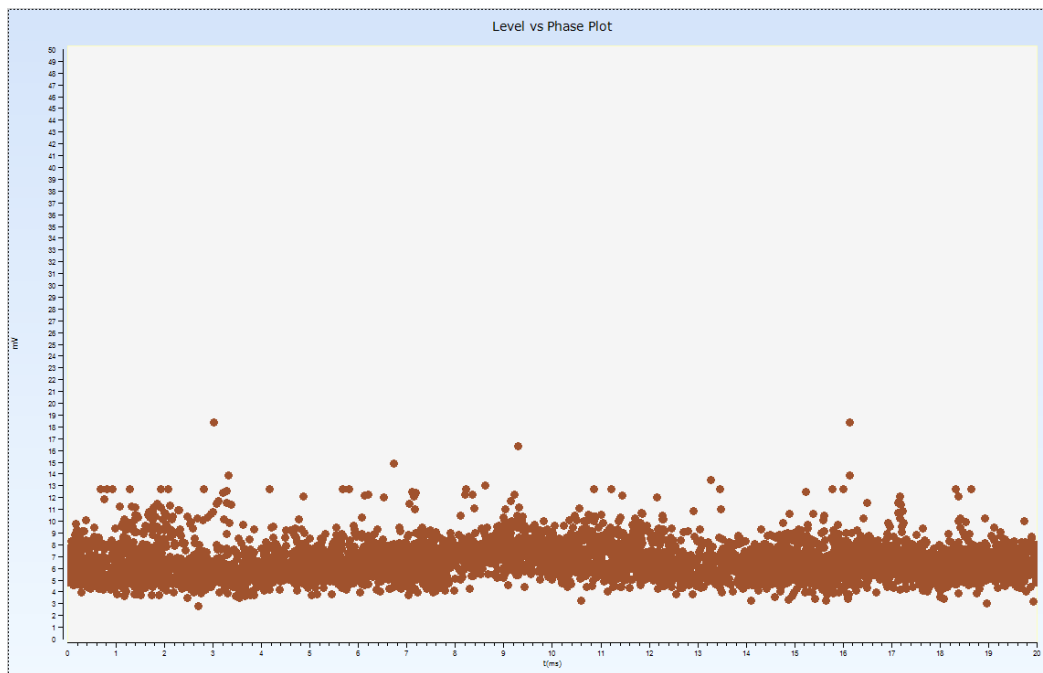
330kV pusēs C fazēs DI registravimas viršuje.



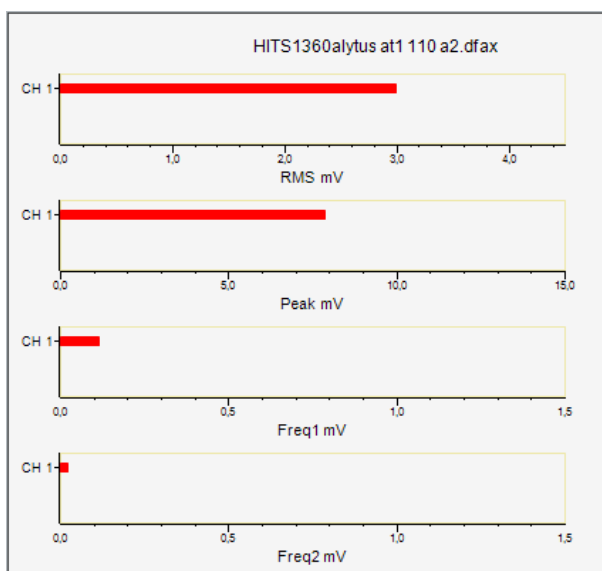
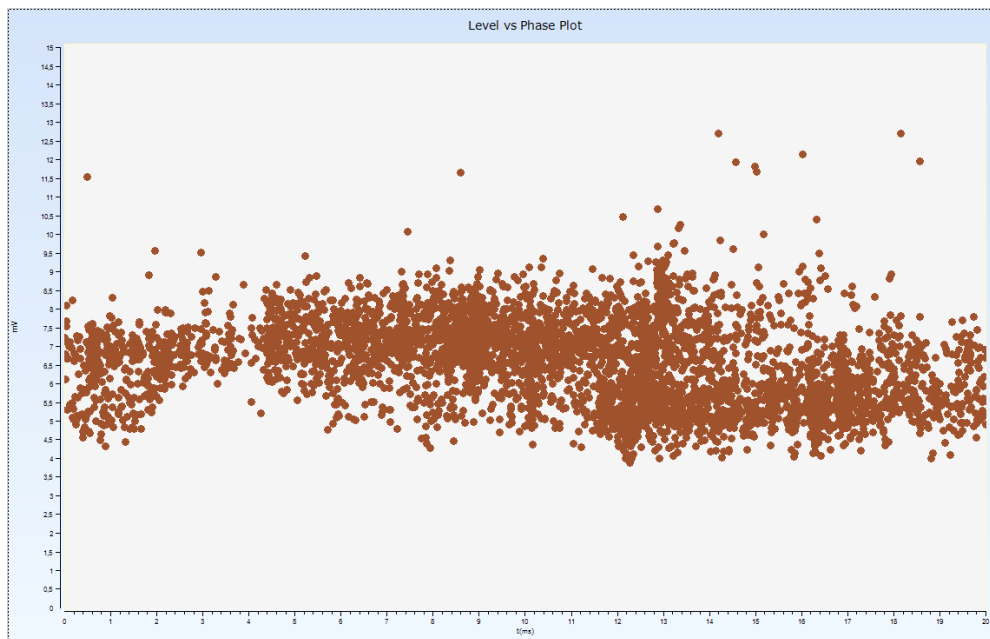
OLTC pusēs DI registravimas apačioje.



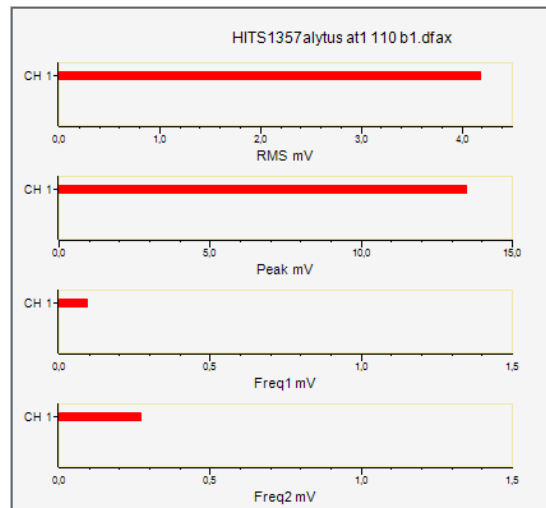
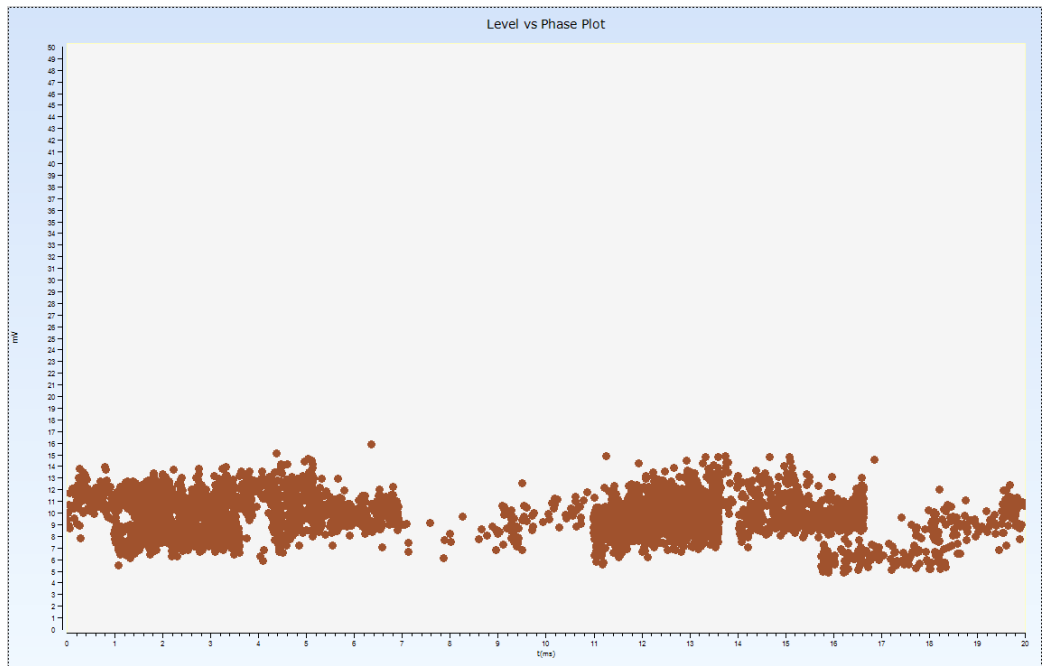
OLTC pusės DI registravimas viršuje.



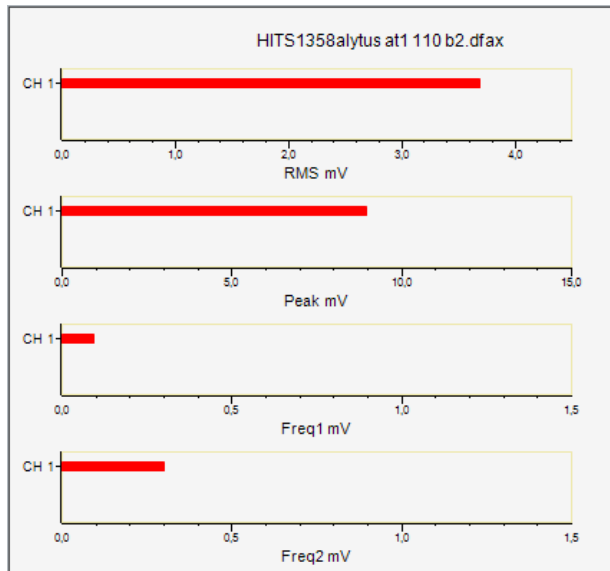
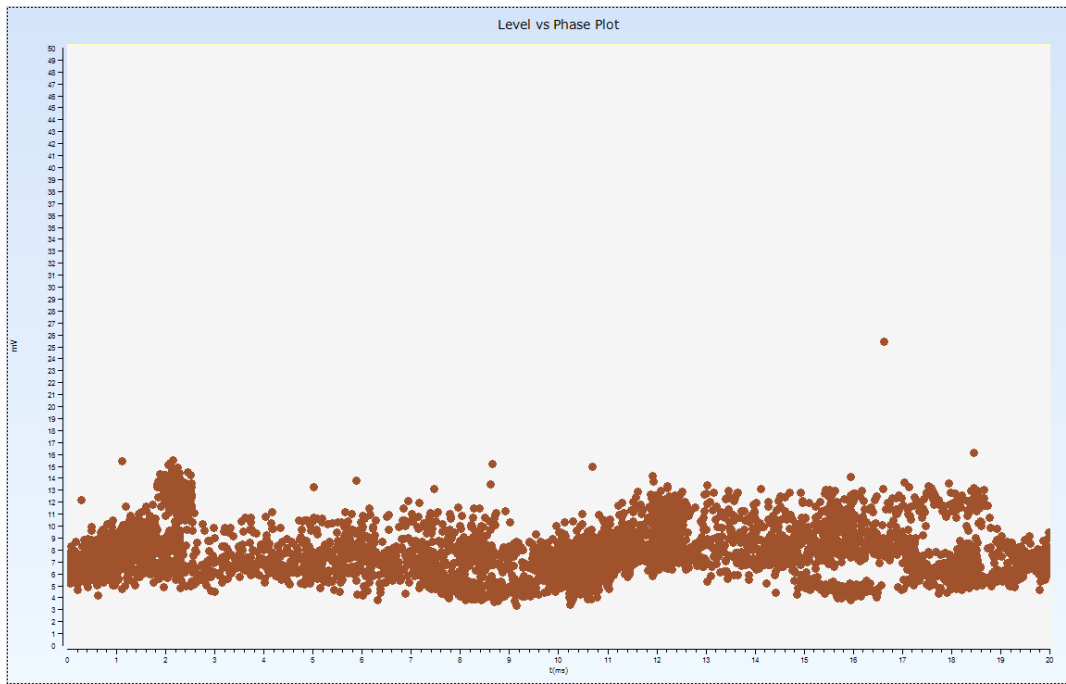
110kV pusēs A fazēs DI registravimas apačioje.



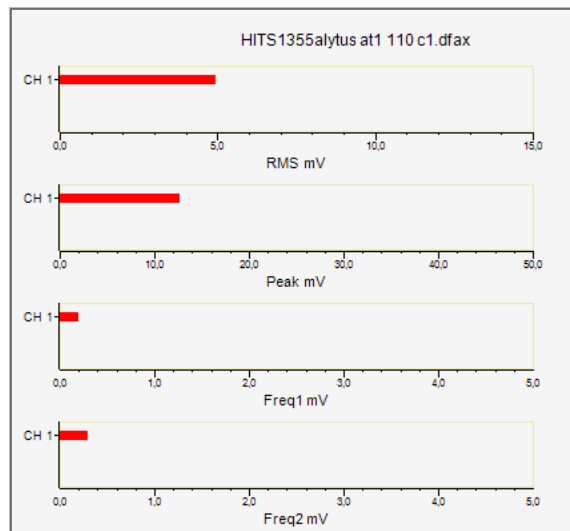
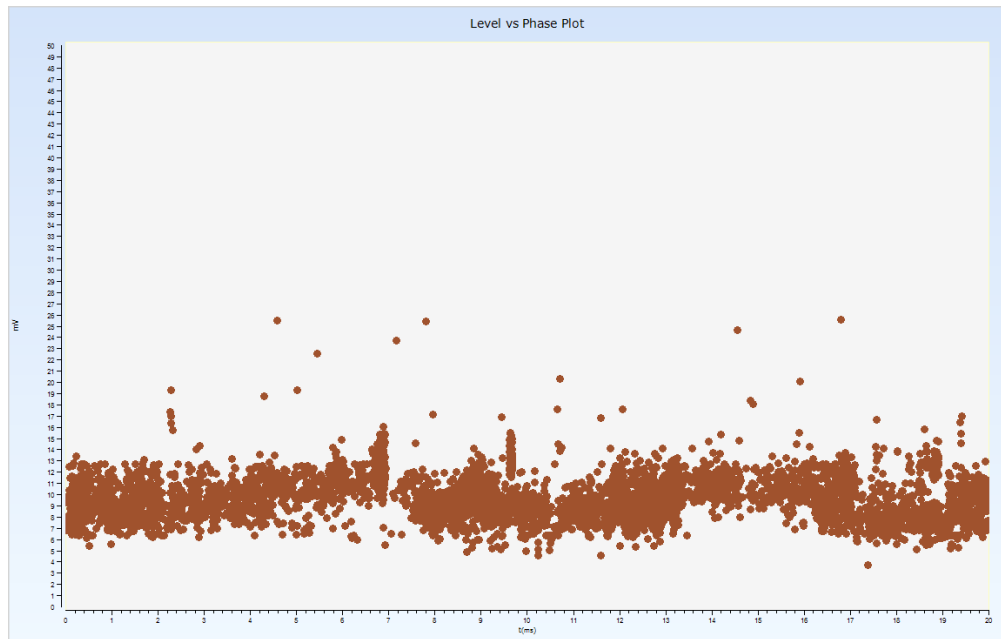
110kV pusēs A fazēs DI registravimas viršuje.



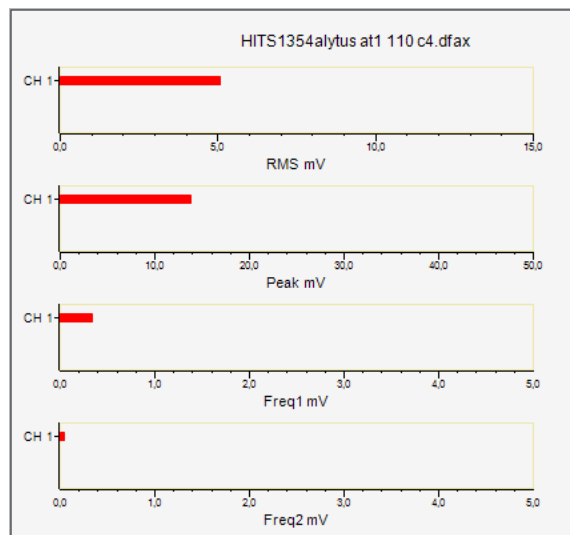
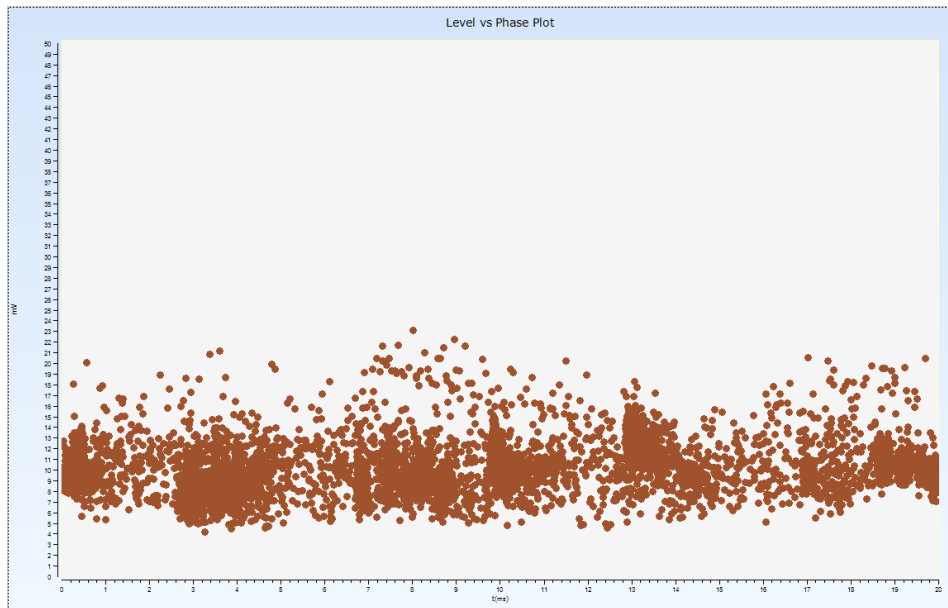
110kV pusēs B fazēs DI registravimas apačioje.



110kV pusēs B fazēs DI registravimas viršuje.

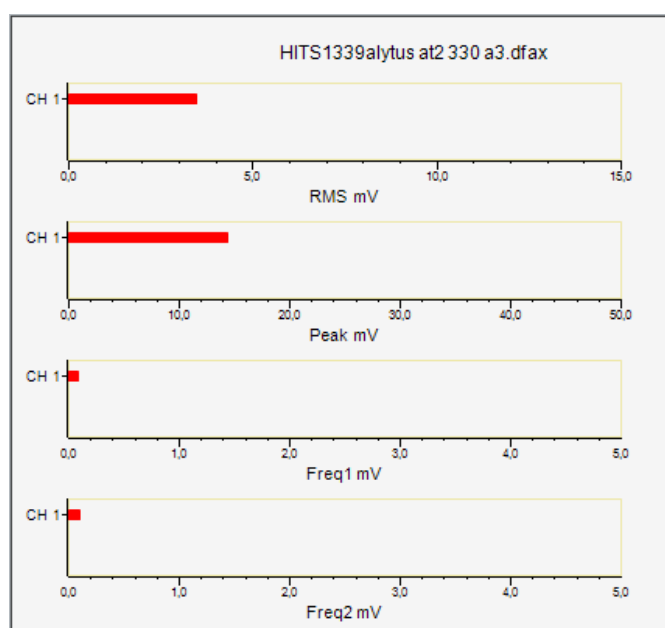
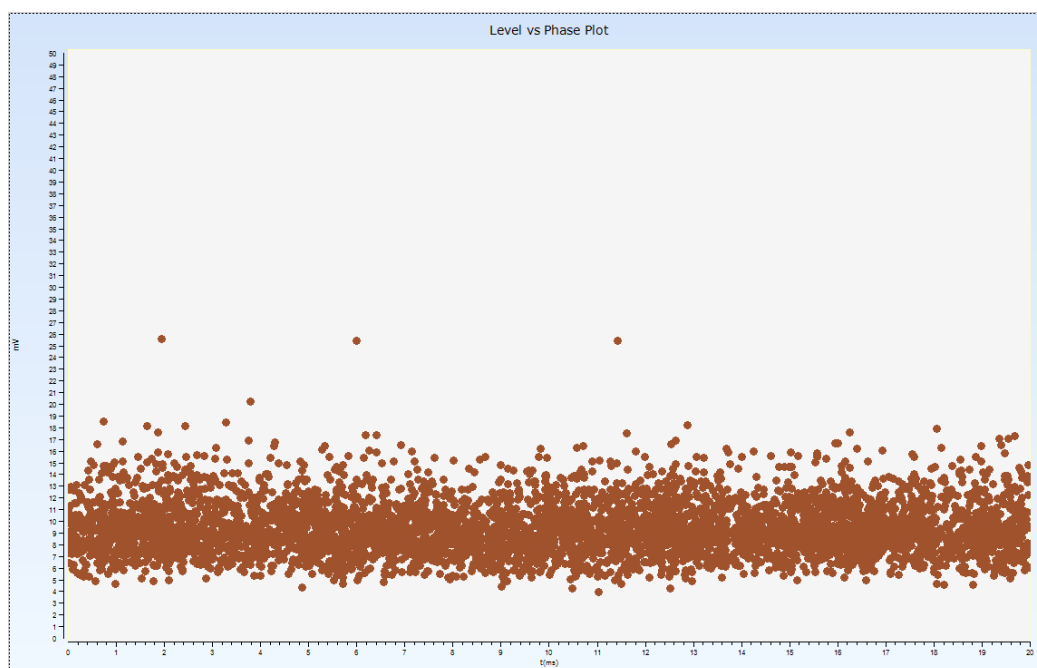


110kV pusēs C fazēs DI registravimas apačioje.

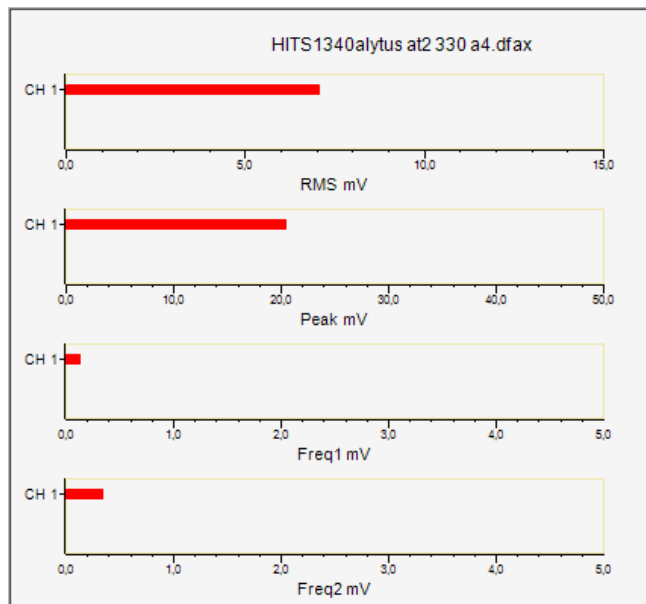
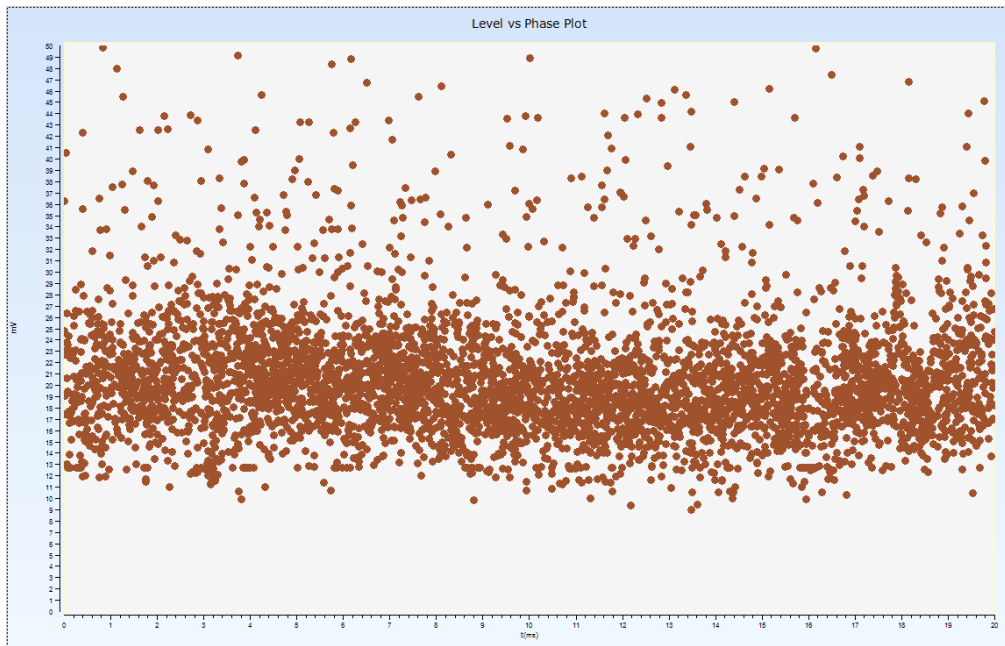


110kV pusēs C fazēs DI registravimas viršuje.

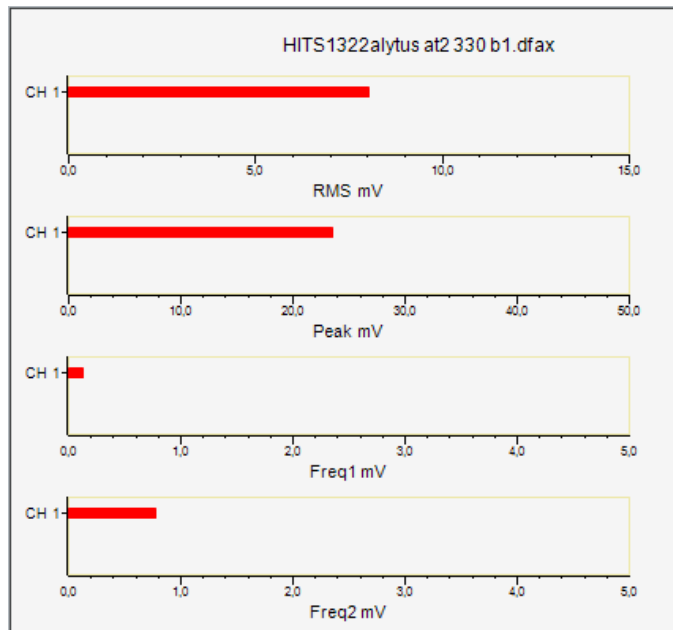
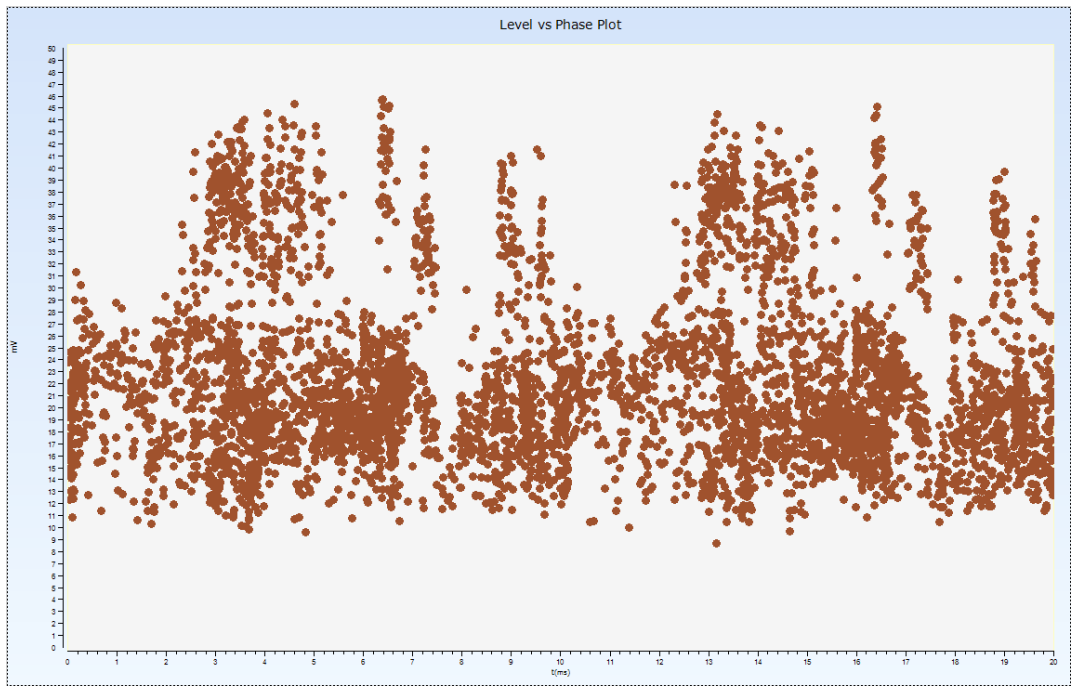
## AT-2 registravimo duomenys



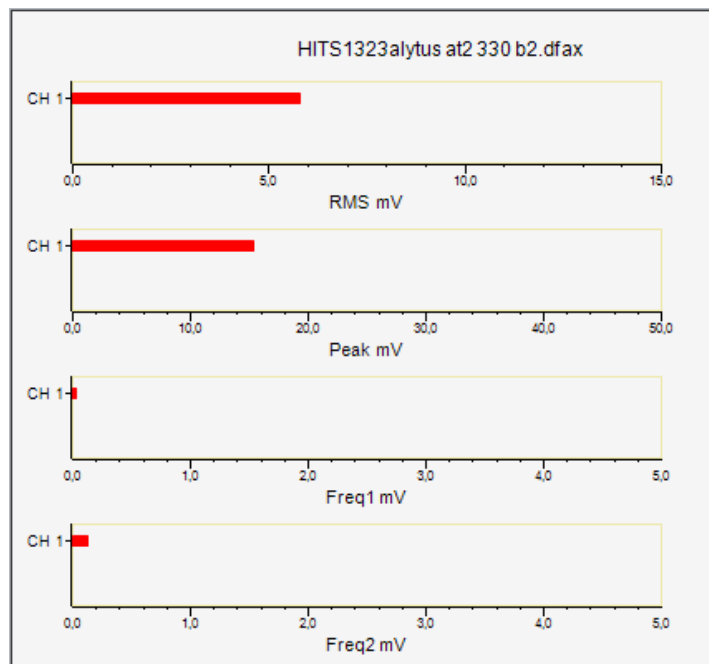
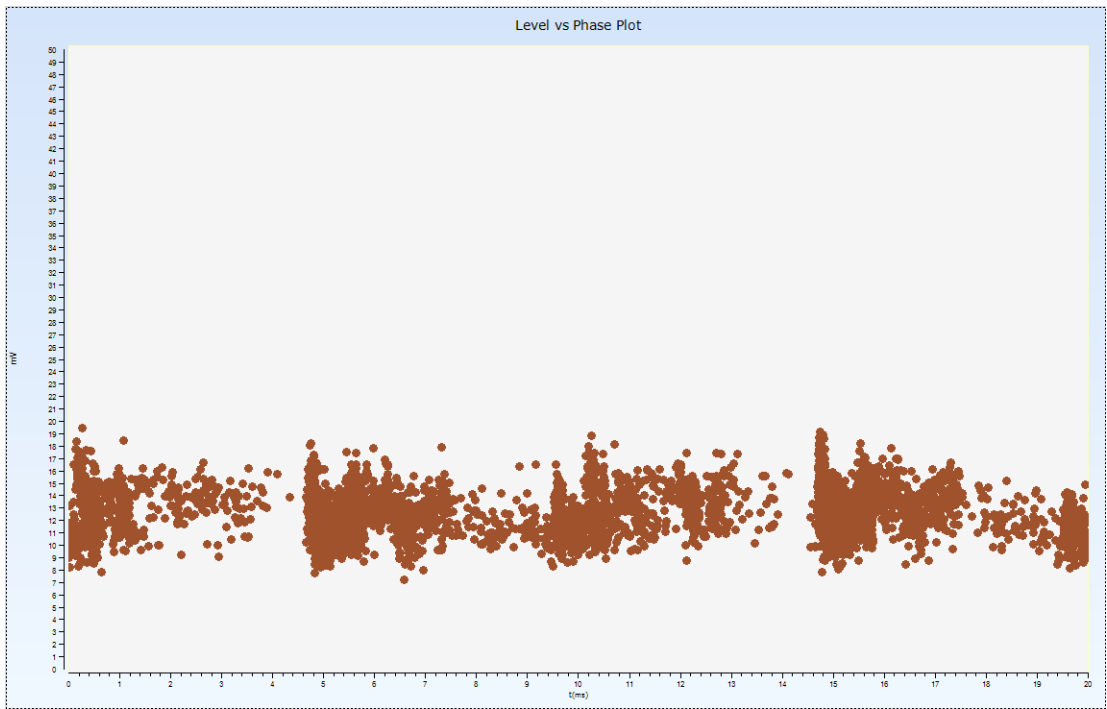
330kV pusės A fazės DI registravimas apačioje.



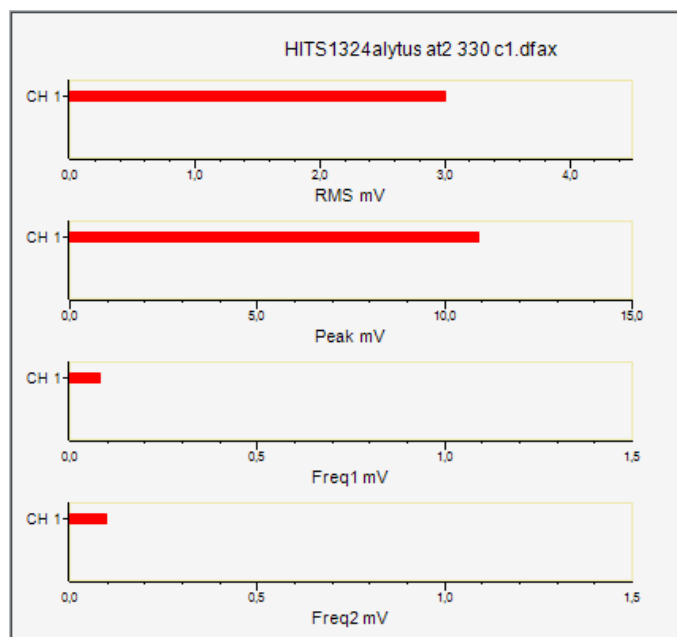
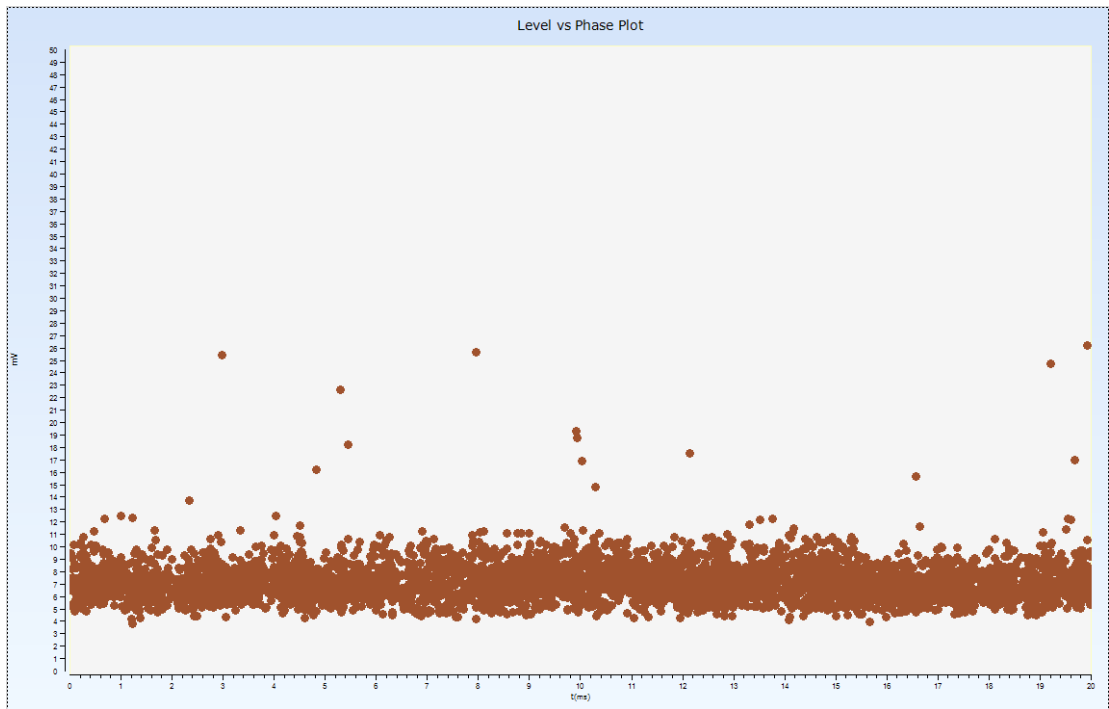
330kV pusēs A fazēs DI registravimas viršuje.



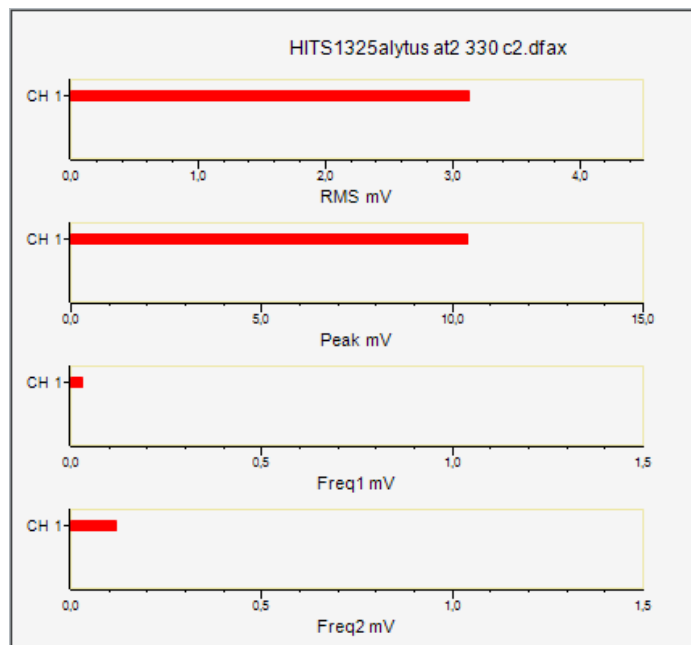
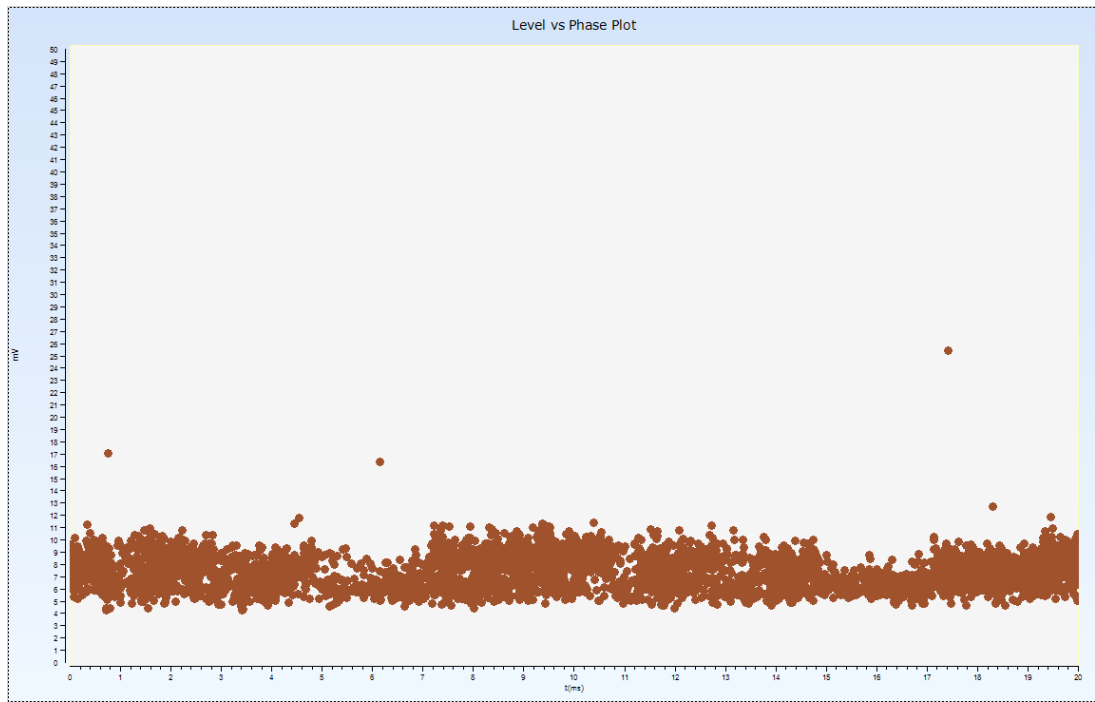
330kV pusēs B fazēs DI registravimas apačioje.



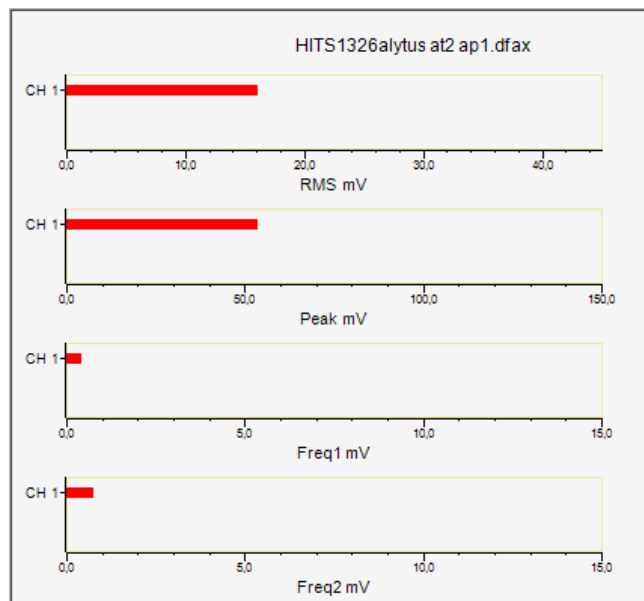
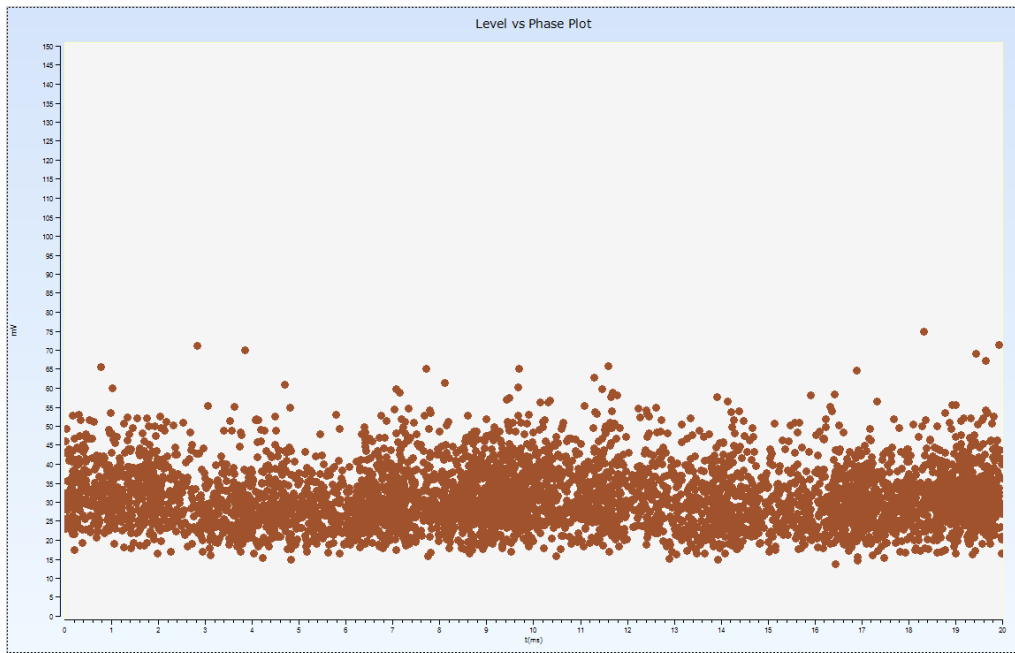
330kV pusēs B fazēs DI registravimas viršuje.



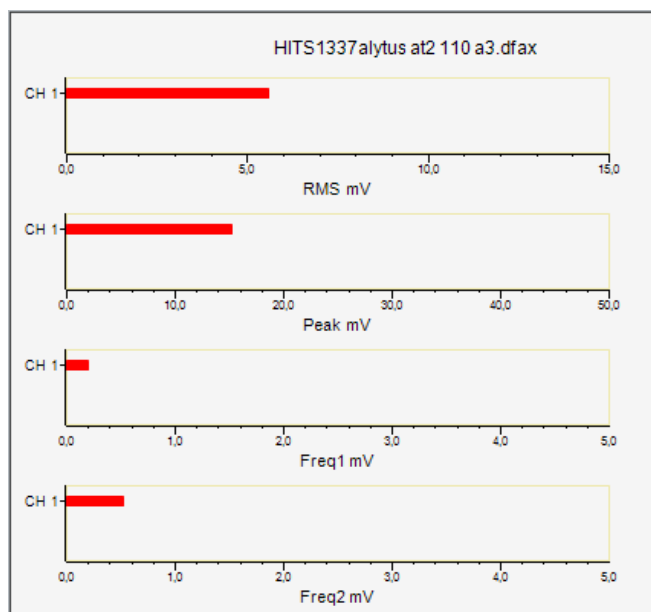
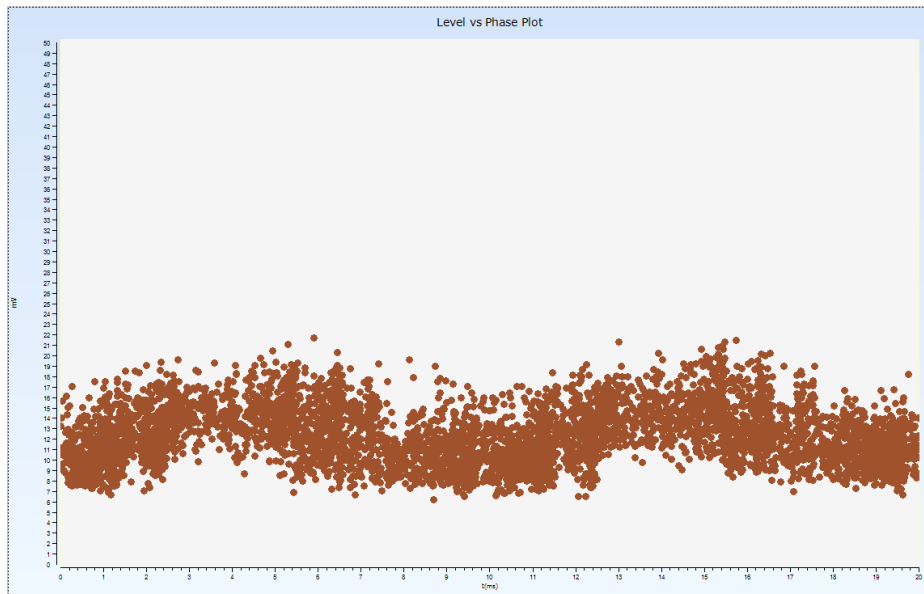
330kV pusēs C fazēs DI registravimas apačioje.



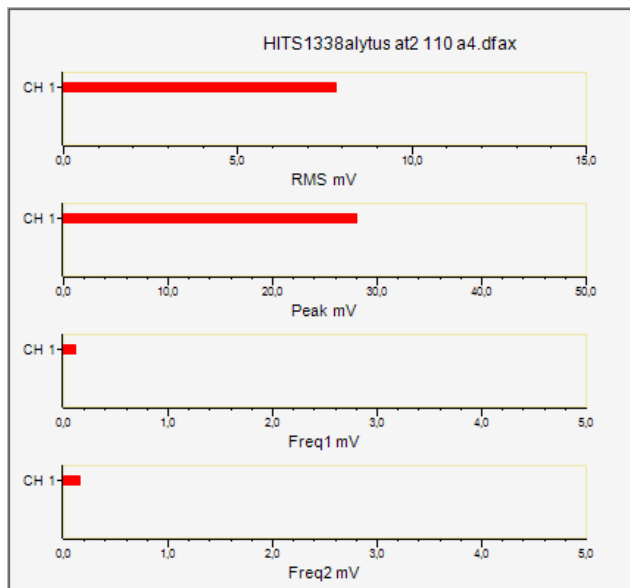
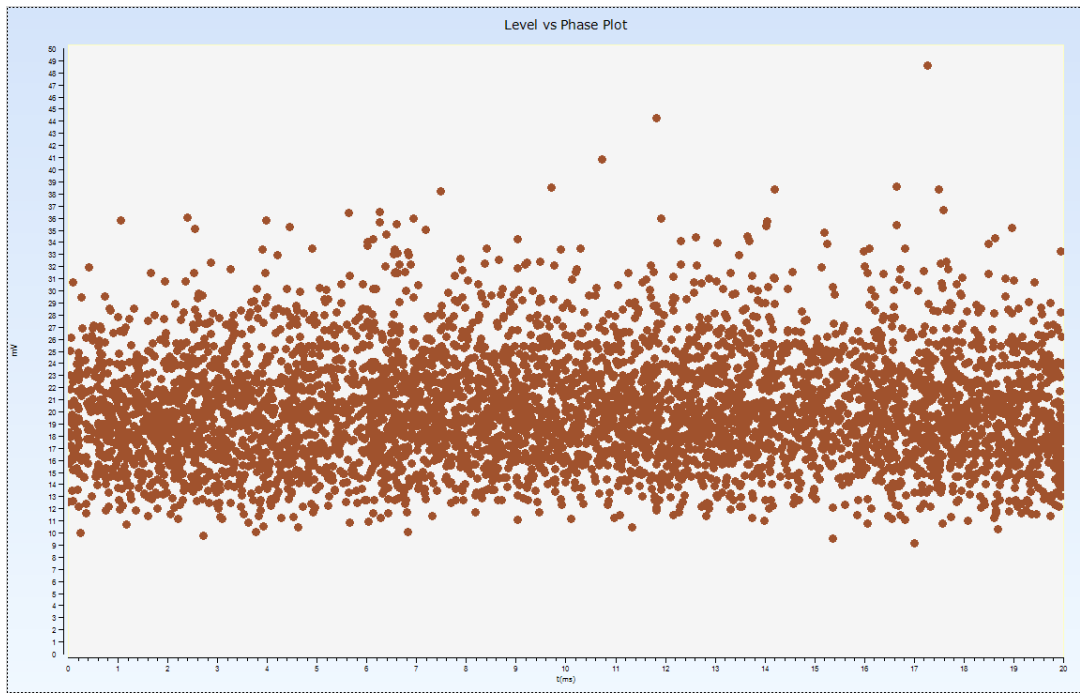
330kV pusēs C fazēs DI registravimas viršuje.



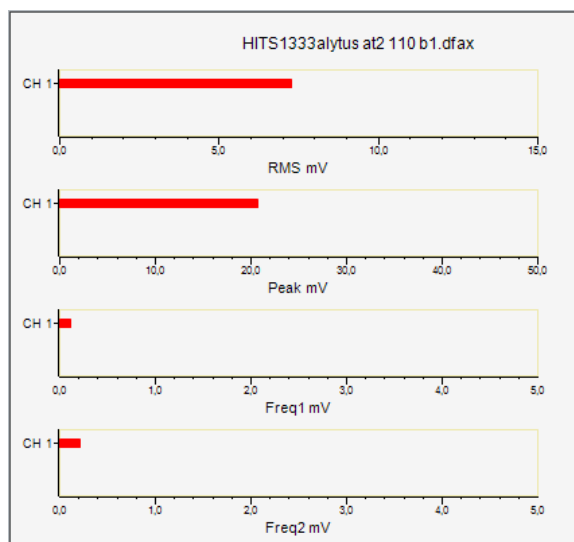
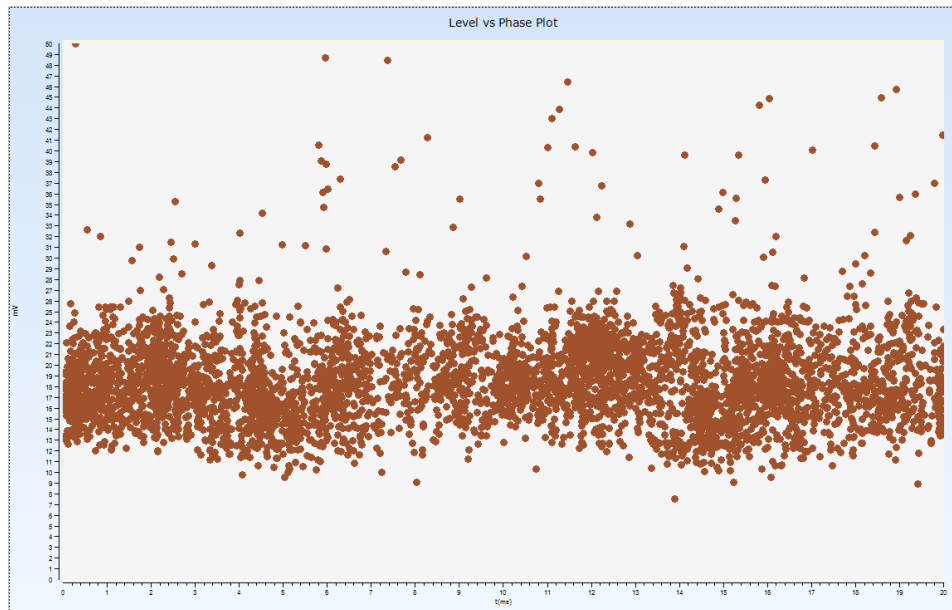
OLTC pusēs DI registravimas apačioje.



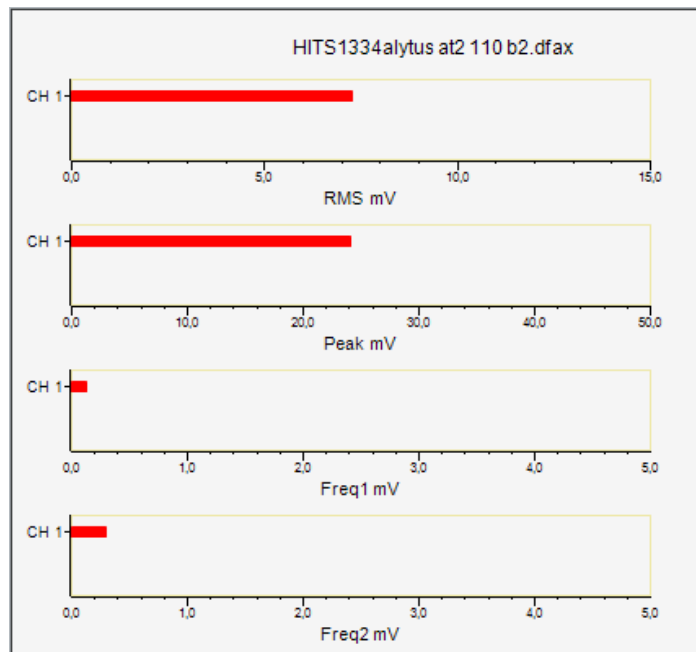
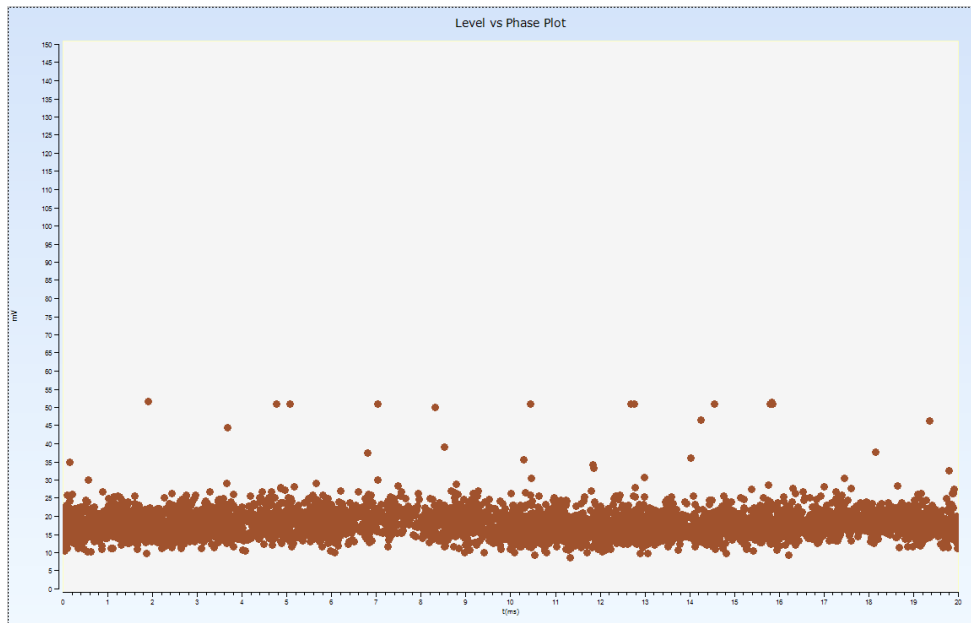
110kV pusēs A fazēs DI registravimas apačioje.



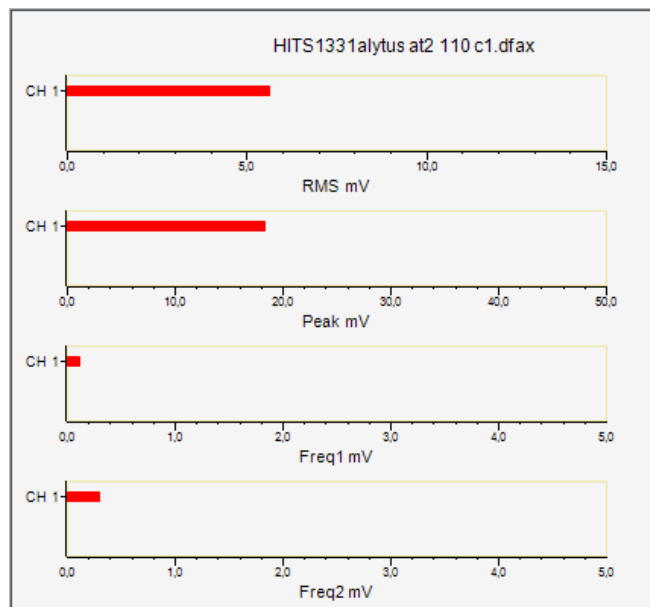
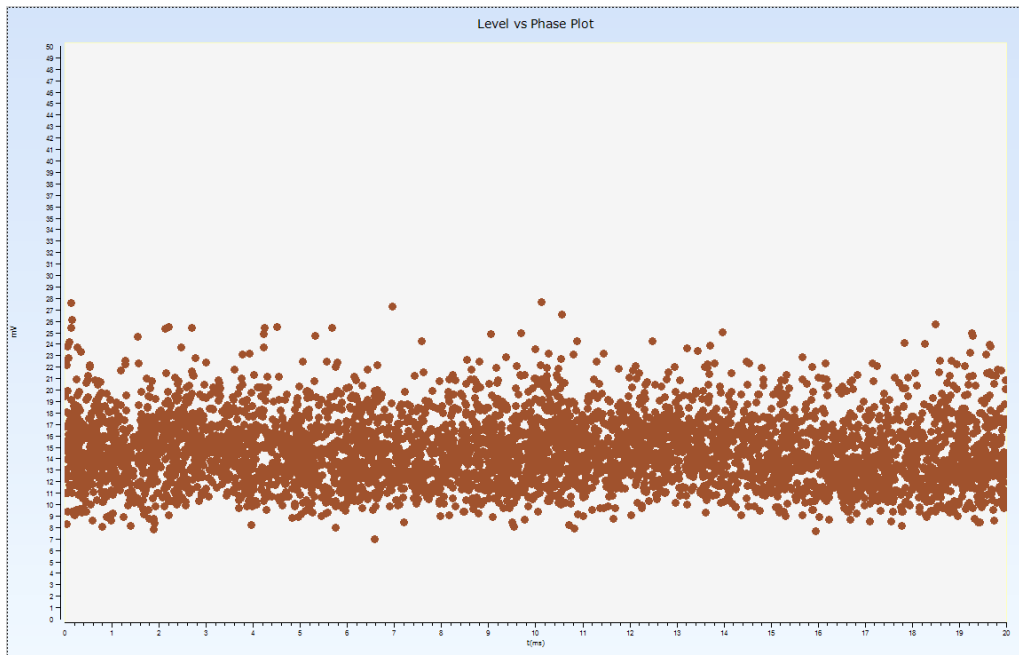
110kV pusēs A fazēs DI registravimas viršuje.



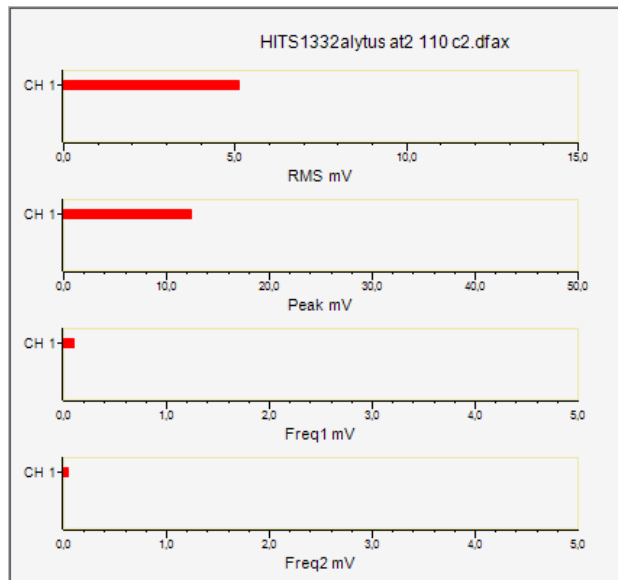
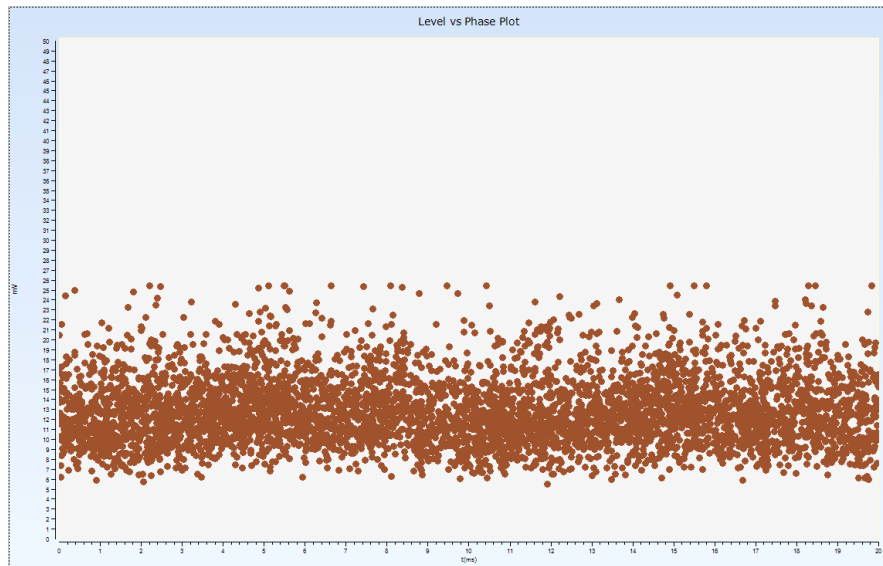
110kV pusēs B fazēs DI registravimas apačioje.



110kV pusēs B fazēs DI registravimas viršuje.



110kV pusēs C fazēs DI registravimas apačioje.



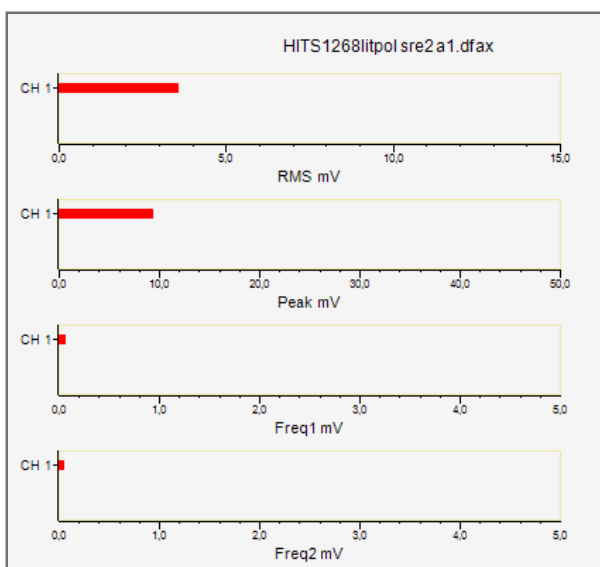
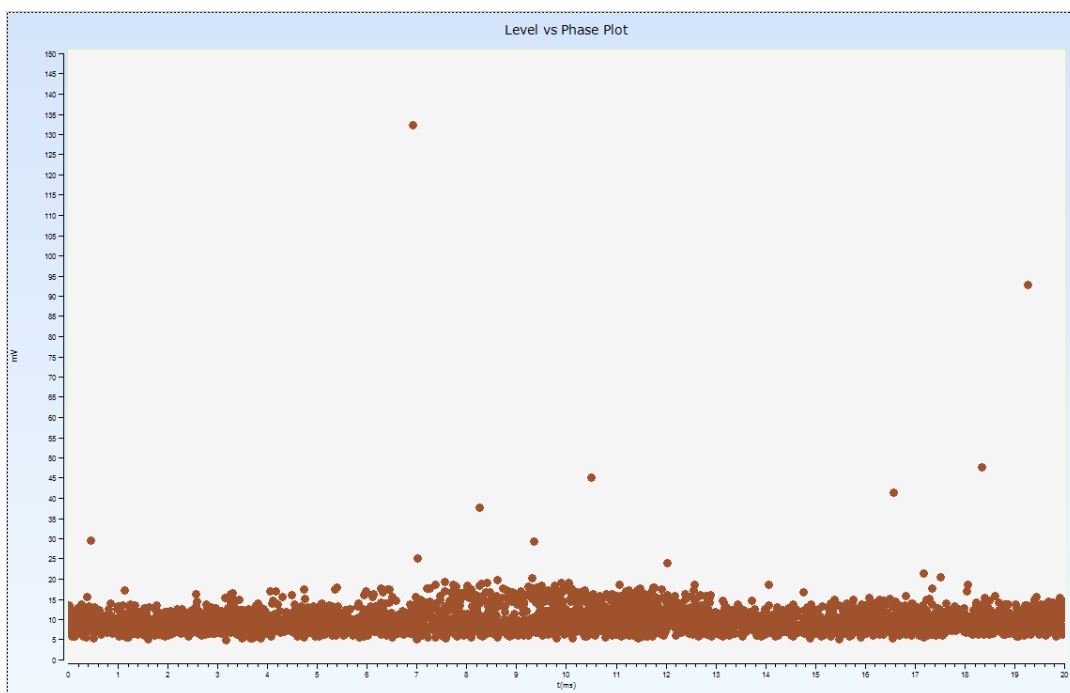
110kV pusēs C fazēs DI registravimas viršuje.

## 5 priedas. Pakartotiniai šuntinio reaktoriaus matavimai

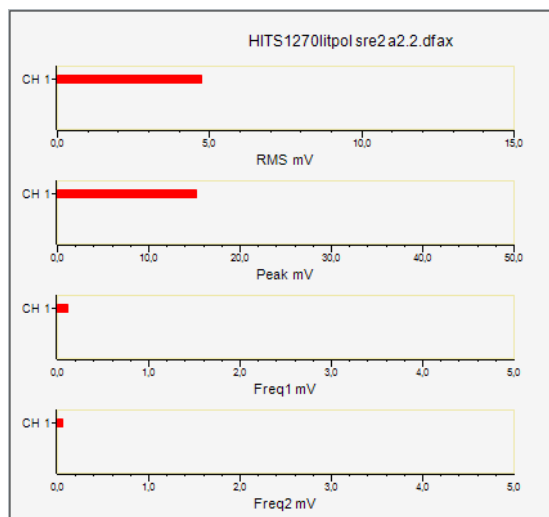
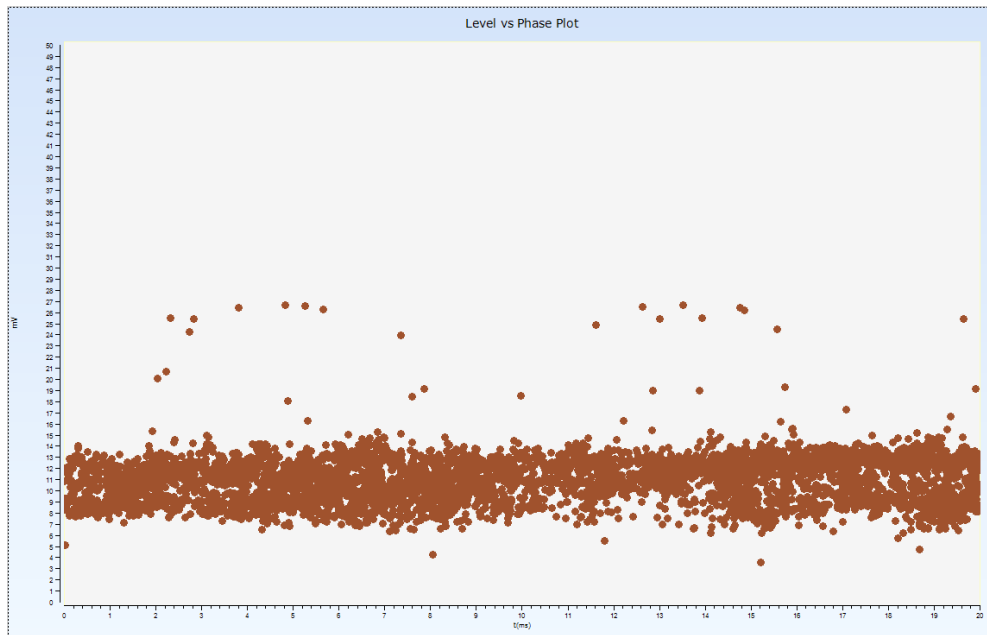
Dalinių išlydžių registravimo rezultatai (akustinis)

DI registravimui buvo nustatyta 5000 taškų. Apačios aukštis - ~1,5 m, Viršaus - ~2,8 - 3 m

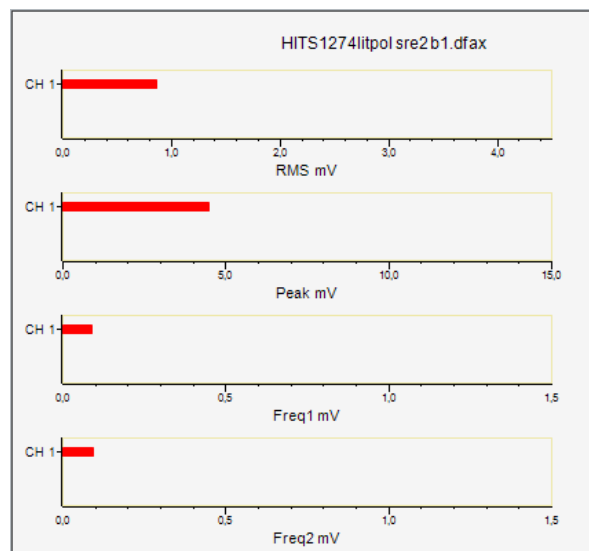
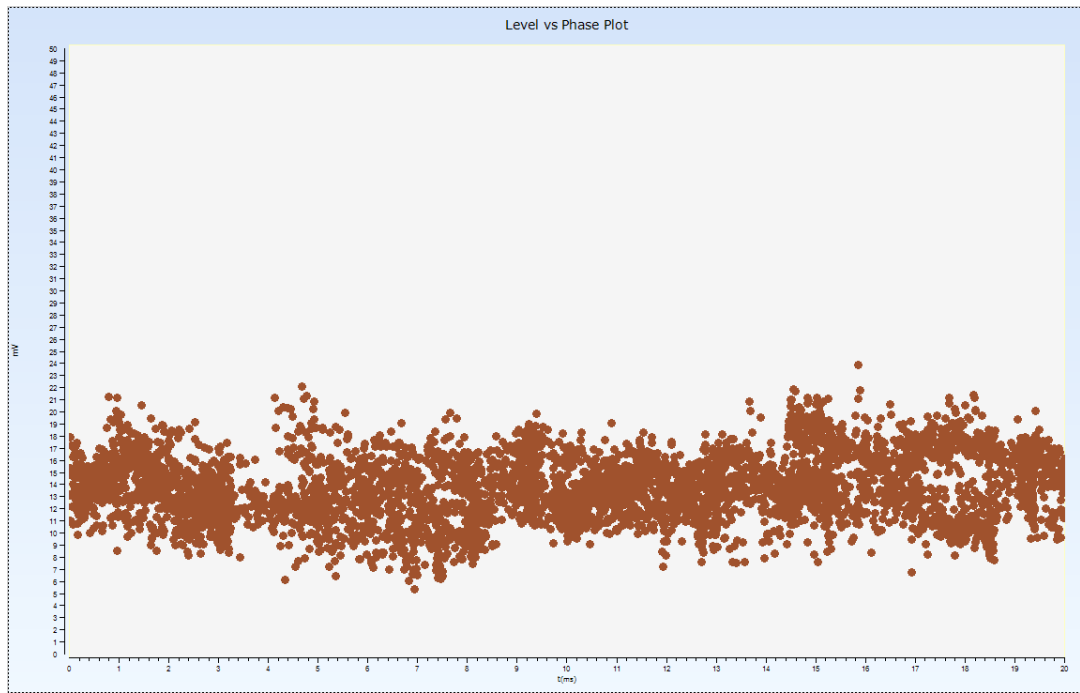
### Šuntinio reaktoriaus registravimo duomenys



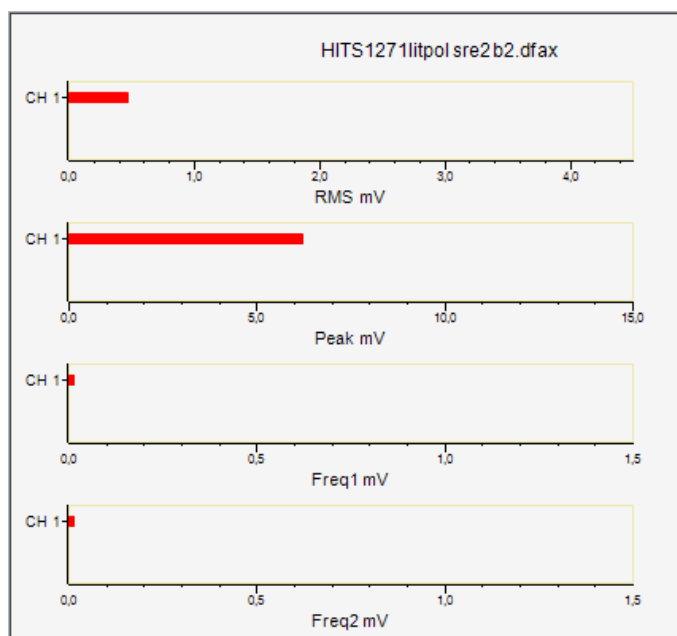
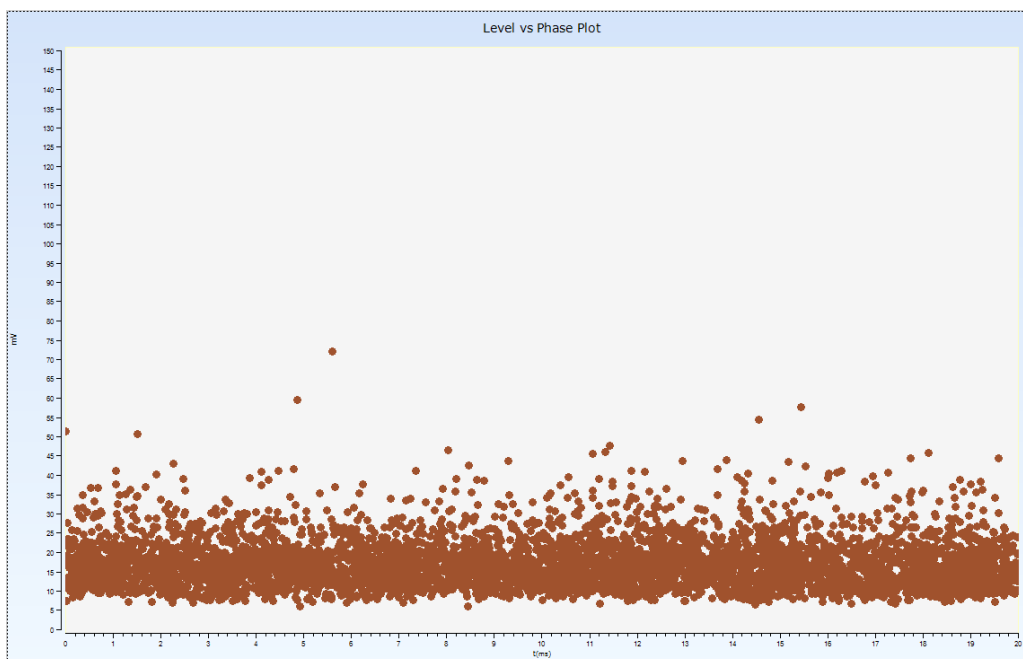
400kV pusės A fazės DI registravimas apačioje.



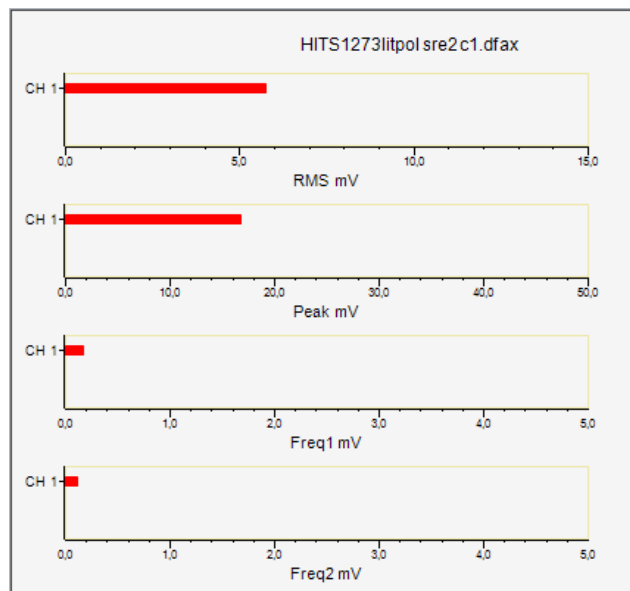
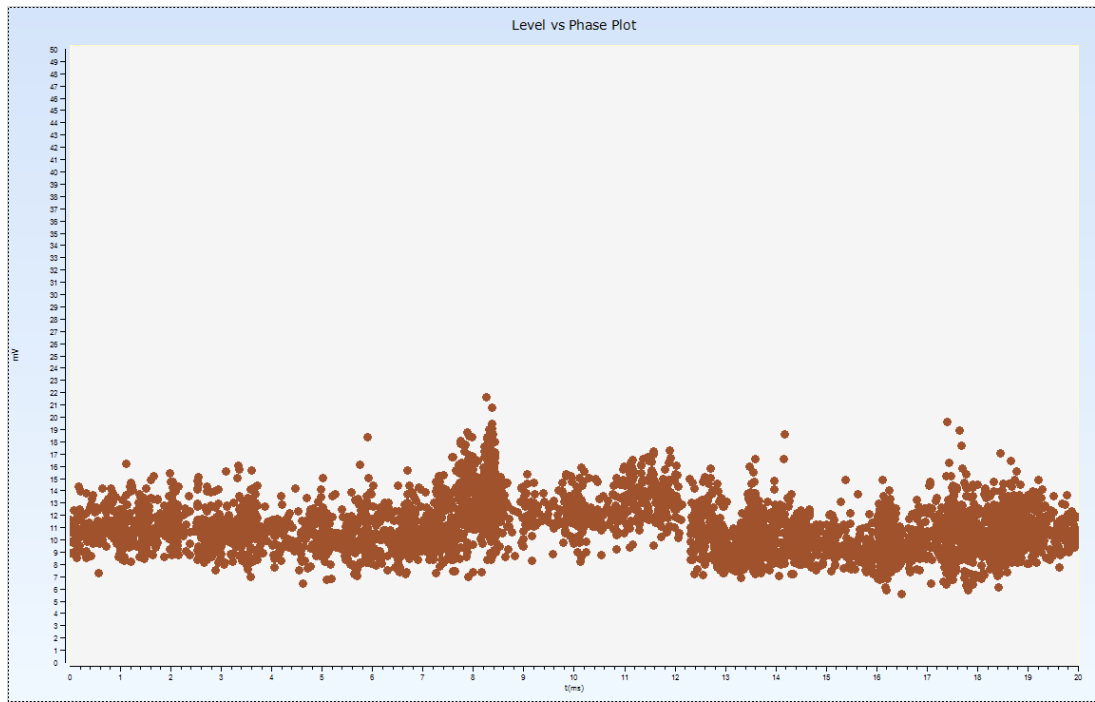
400kV pusēs A fazēs DI registravimas viršuje.



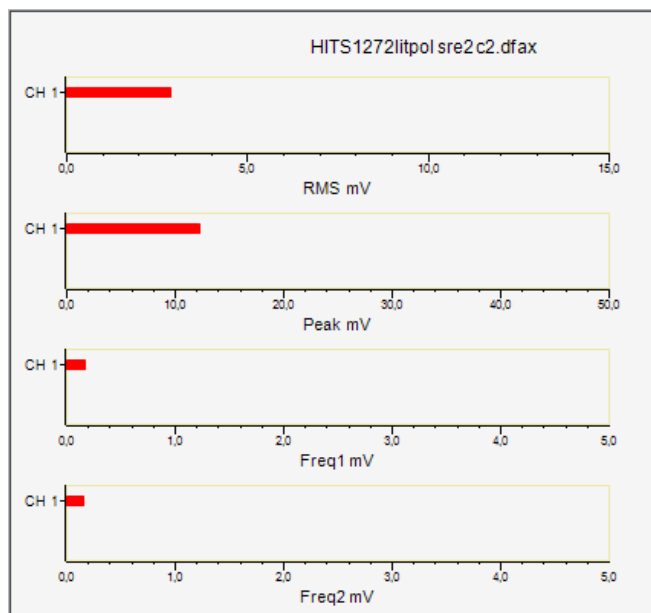
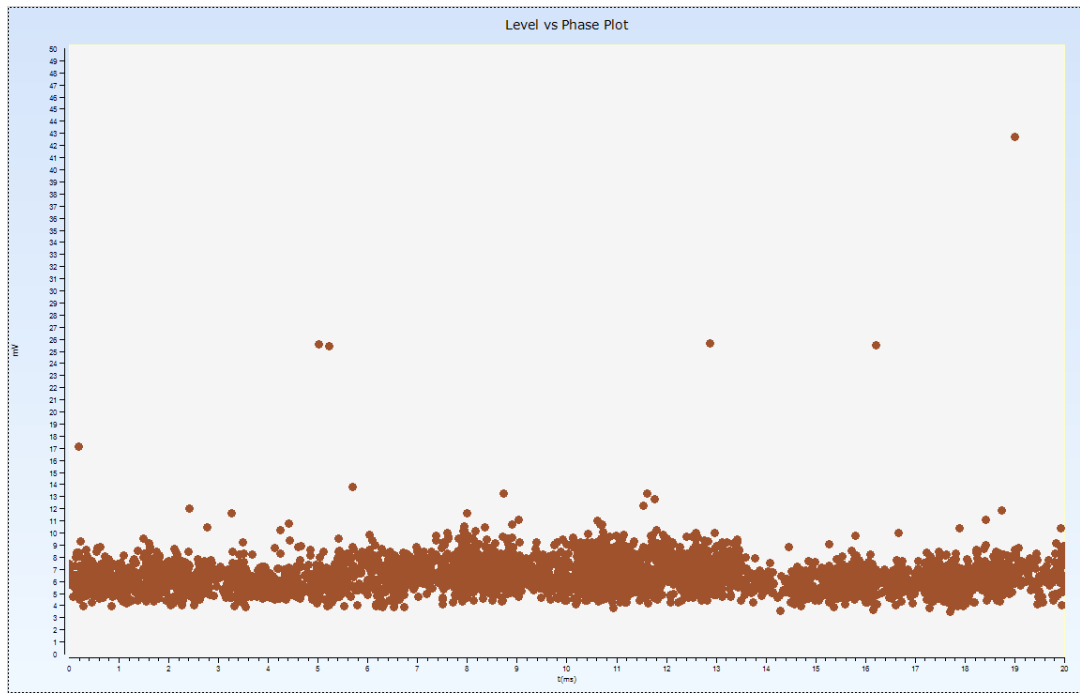
400kV pusēs B fazēs DI registravimas apačioje.



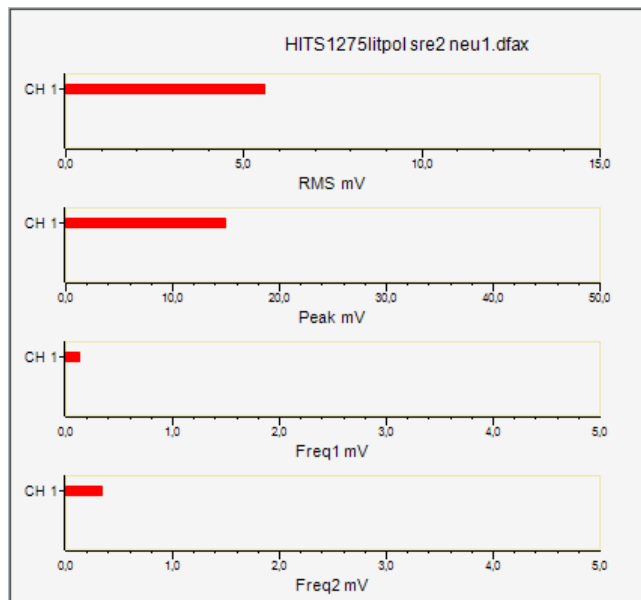
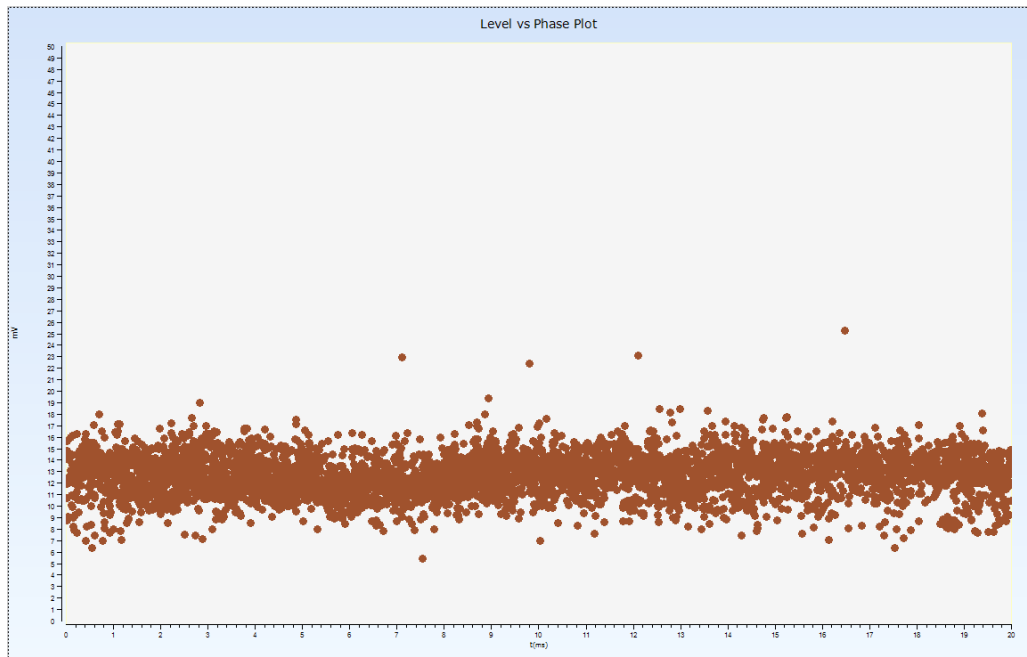
400kV pusēs B fazēs DI registravimas viršuje.



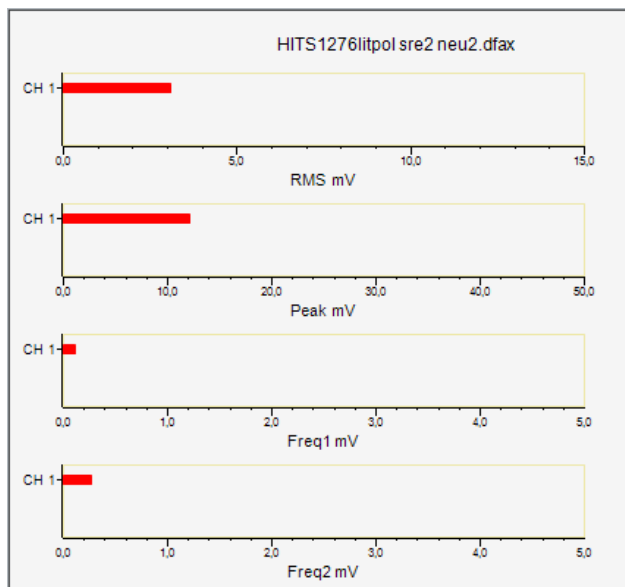
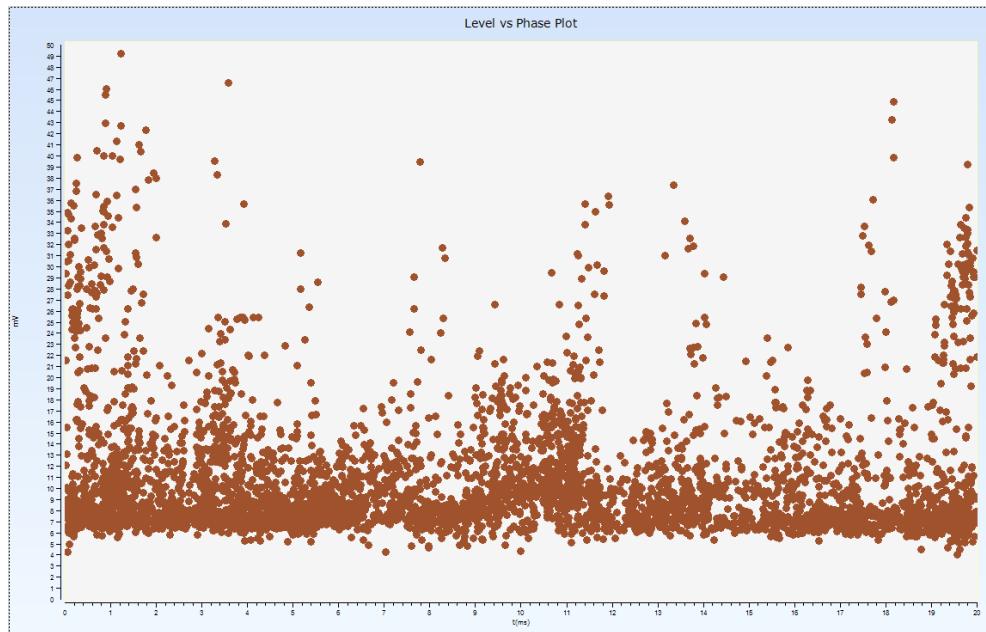
400kV pusēs C fazēs DI registravimas apačioje.



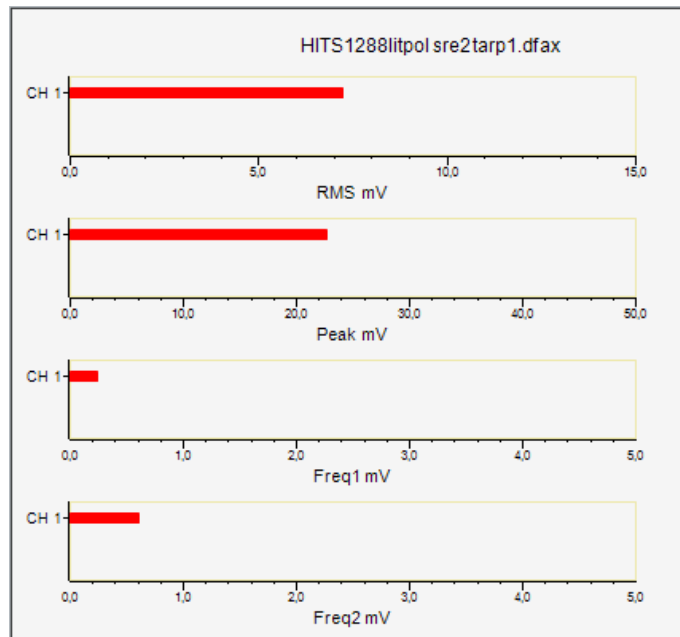
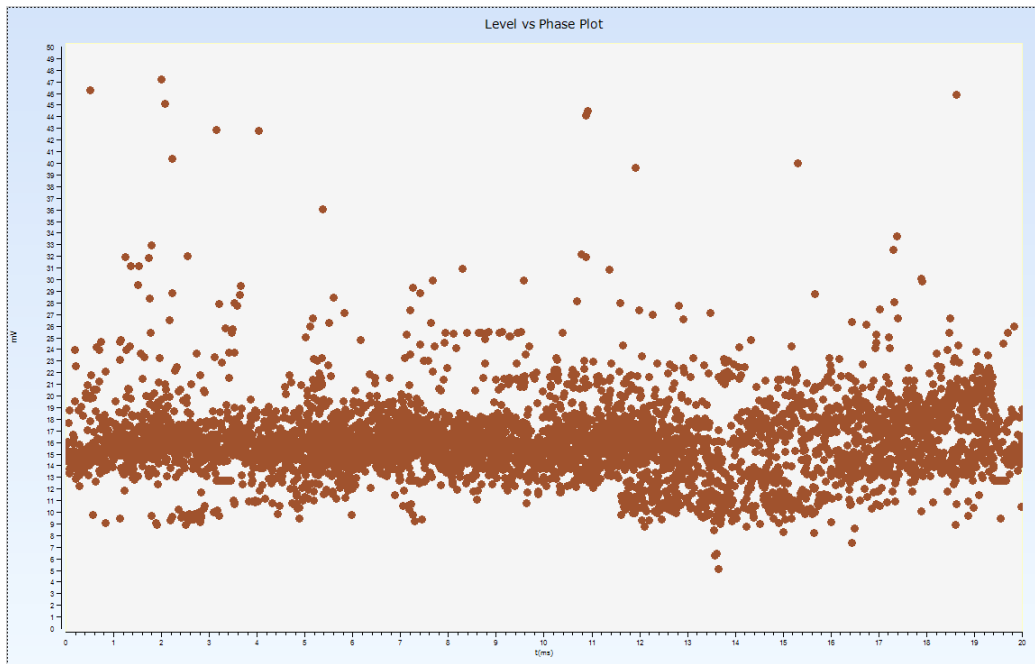
400kV pusēs C fazēs DI registravimas viršuje.



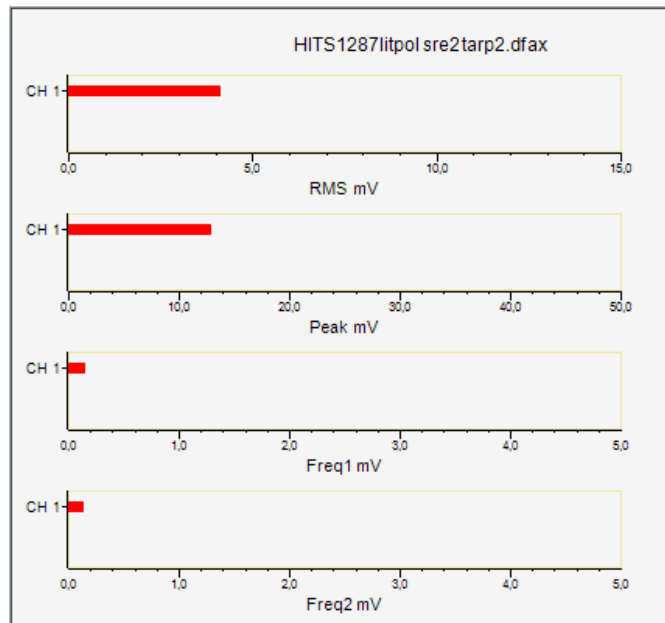
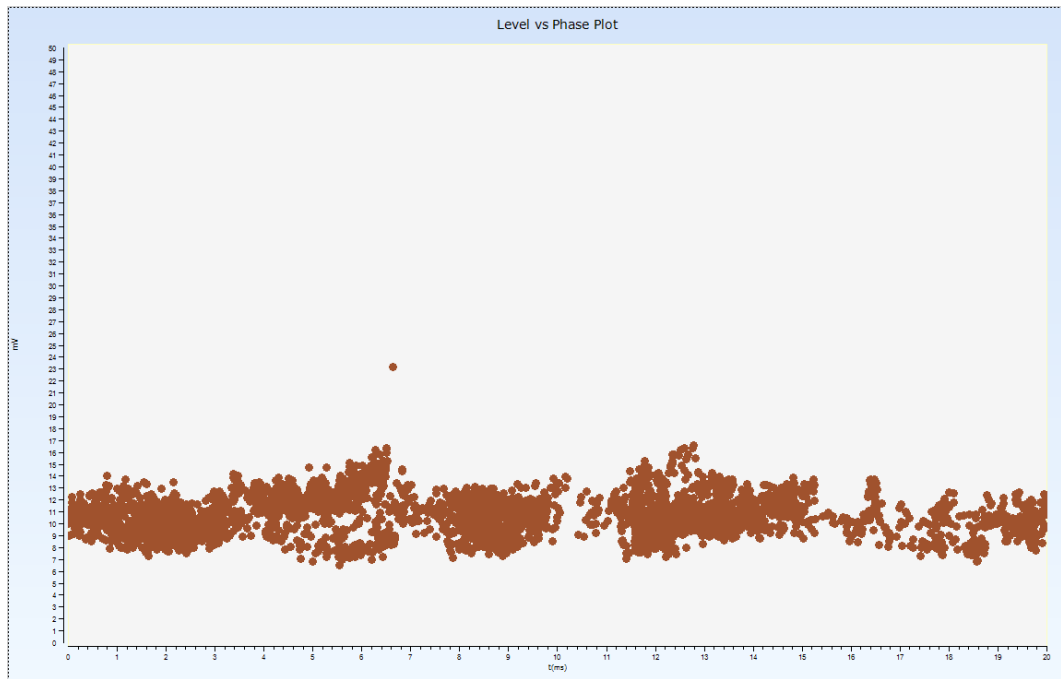
Neutralēs pusēs DI registravimas apačioje.



Neutralēs pusēs DI registravimas viršuje.

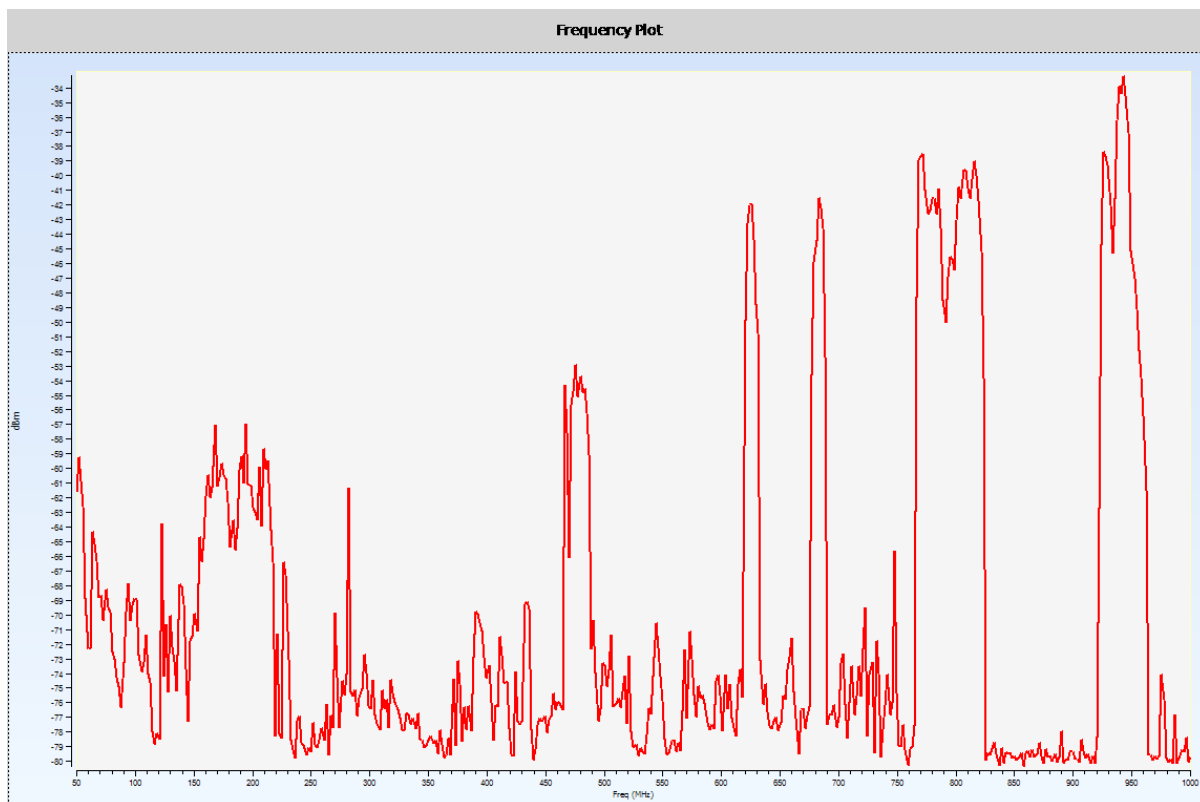


Kitos pusės DI registravimas apačioje.



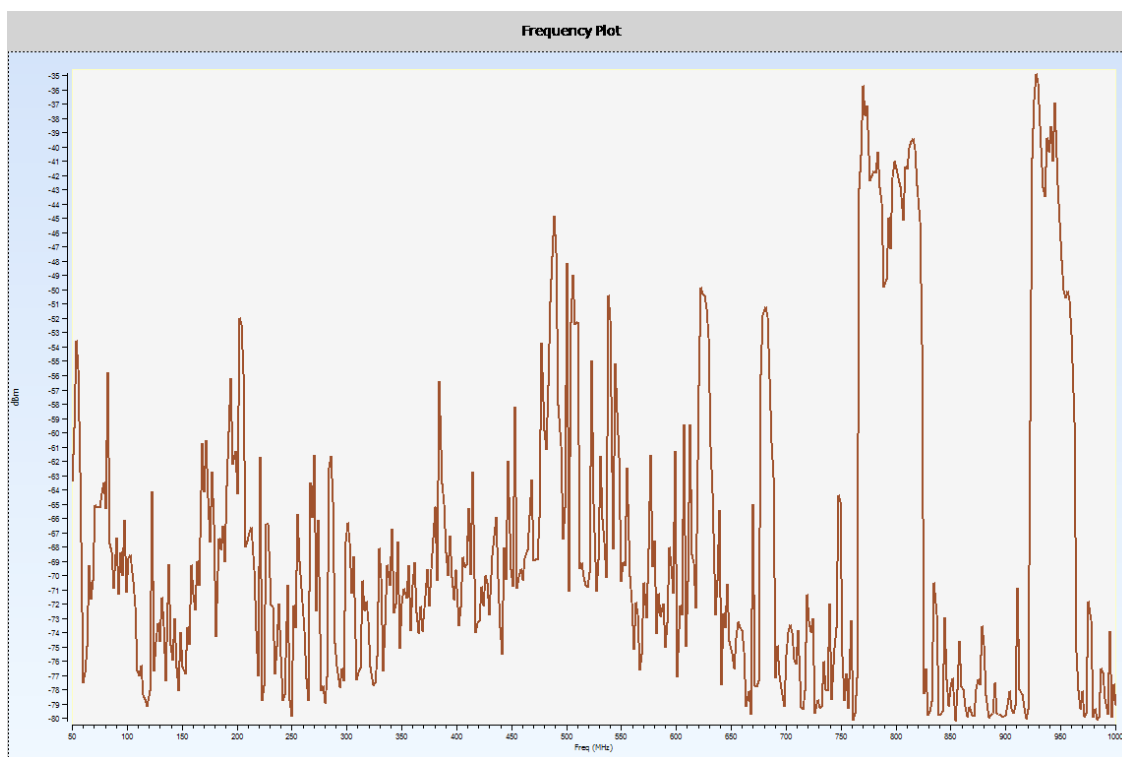
Kitos pusės DI registravimas viršuje.

## 6 priedas. Alytaus TP transformatorių dalinių išlydžių skenavimo rezultatai

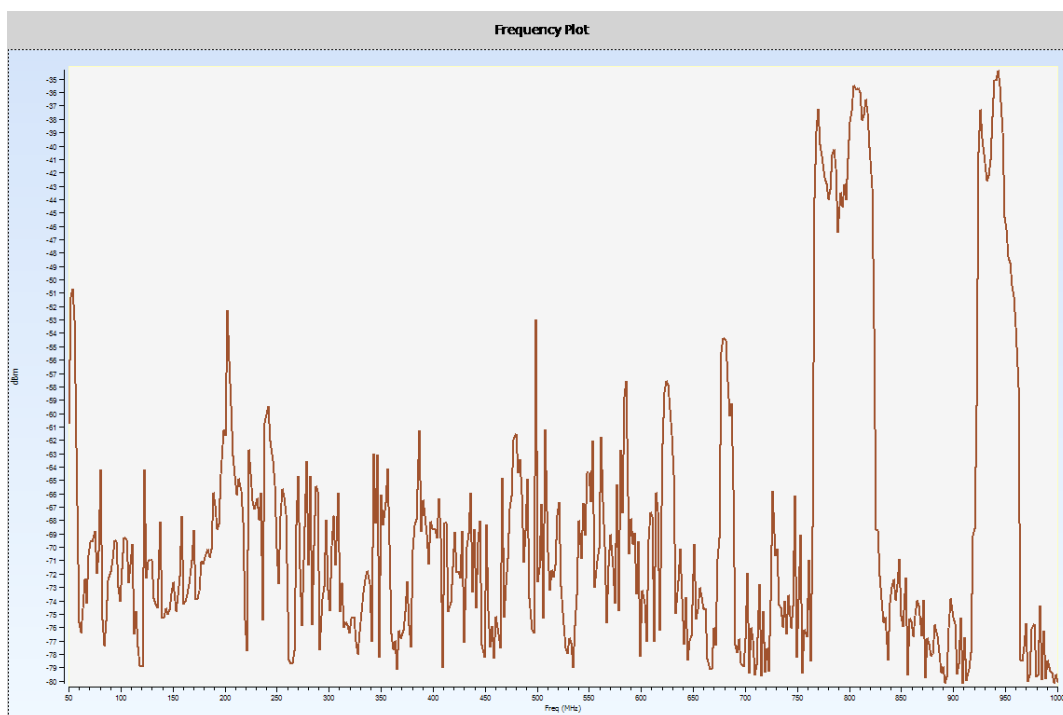


Fonas

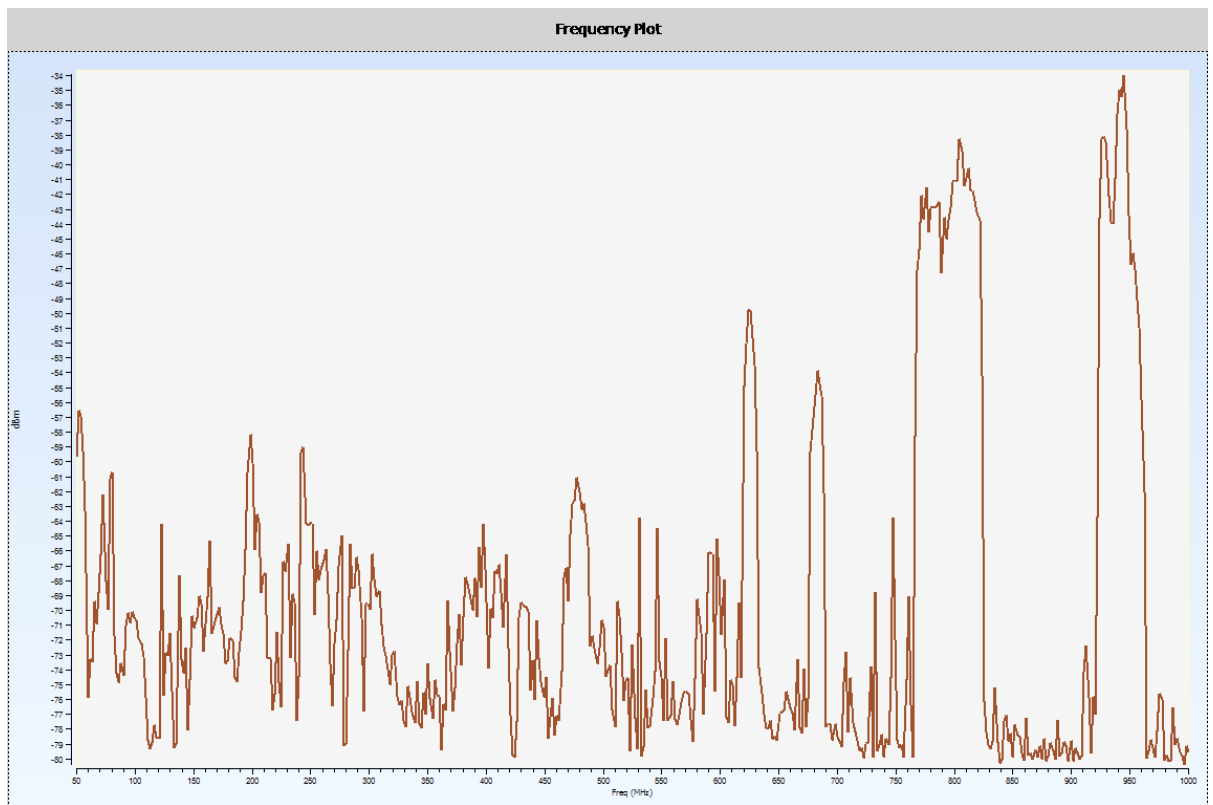
## Transformatoriaus AT-1 skenavimo duomenys



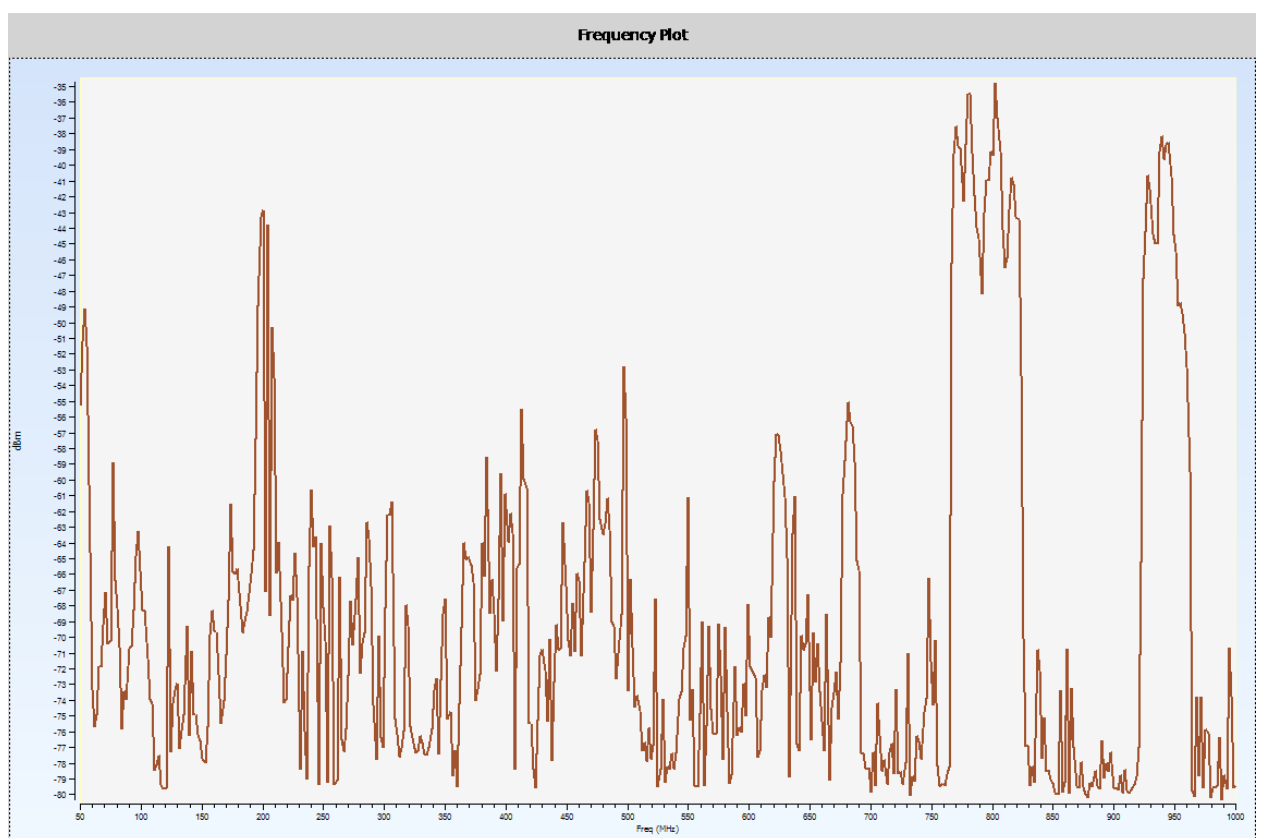
330kV pusės A fazės DI skenavimas.



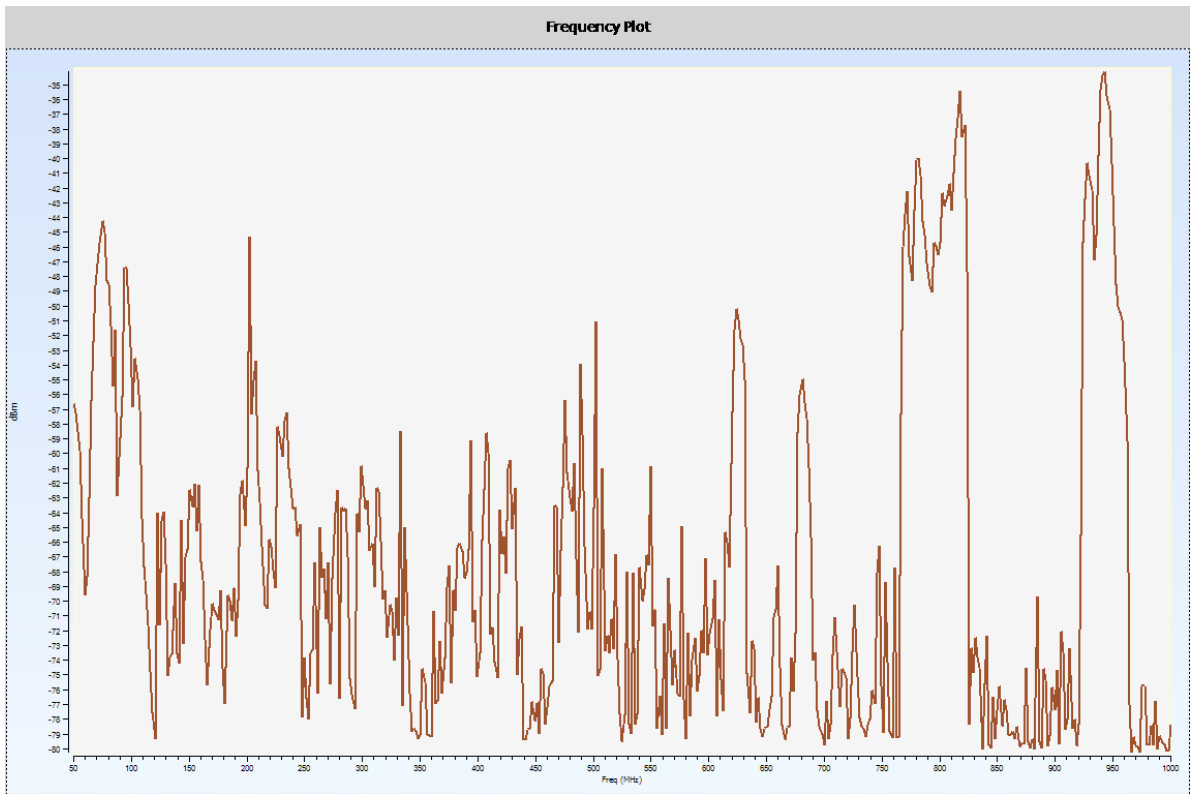
330kV pusės B fazės DI skenavimas.



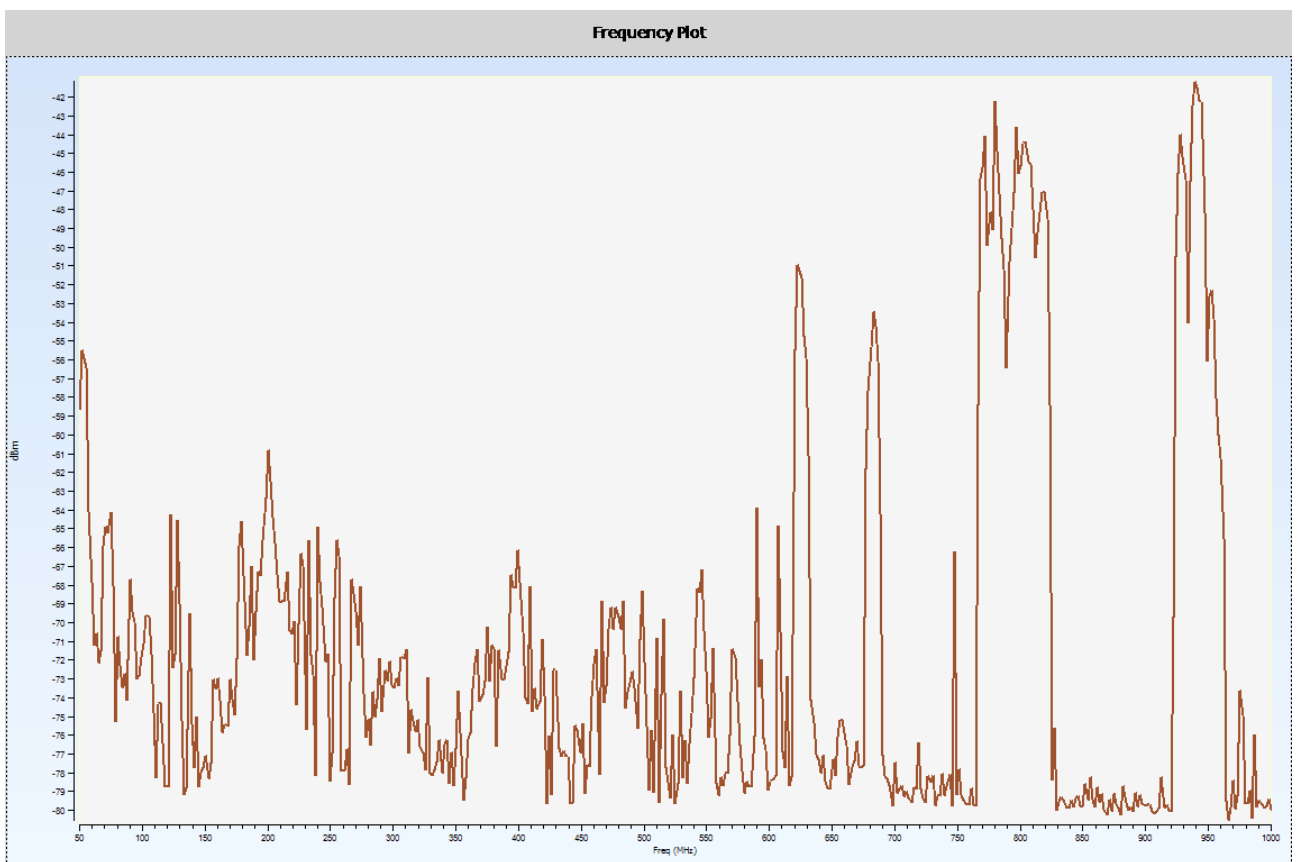
330kV pusēs C fazēs DI skenavimas.



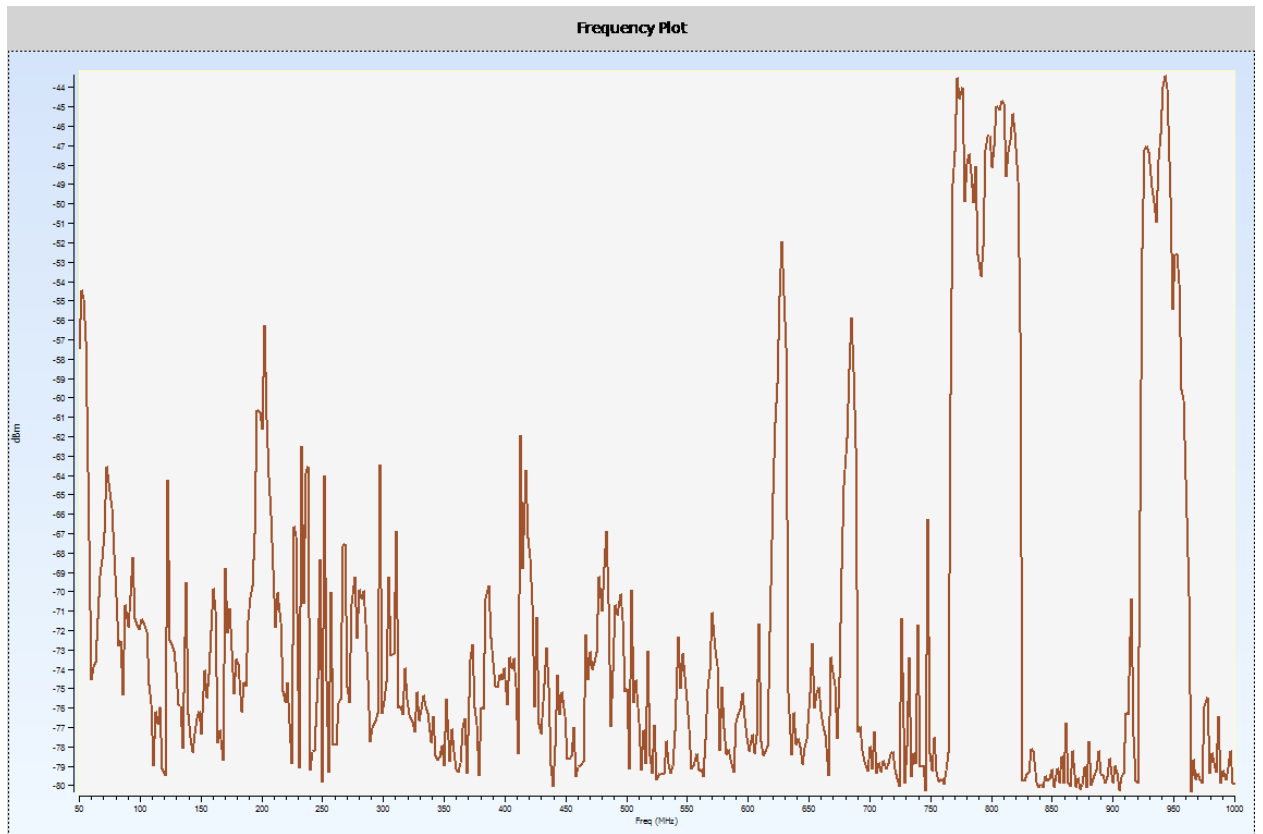
Neutralēs pusēs DI skenavimas.



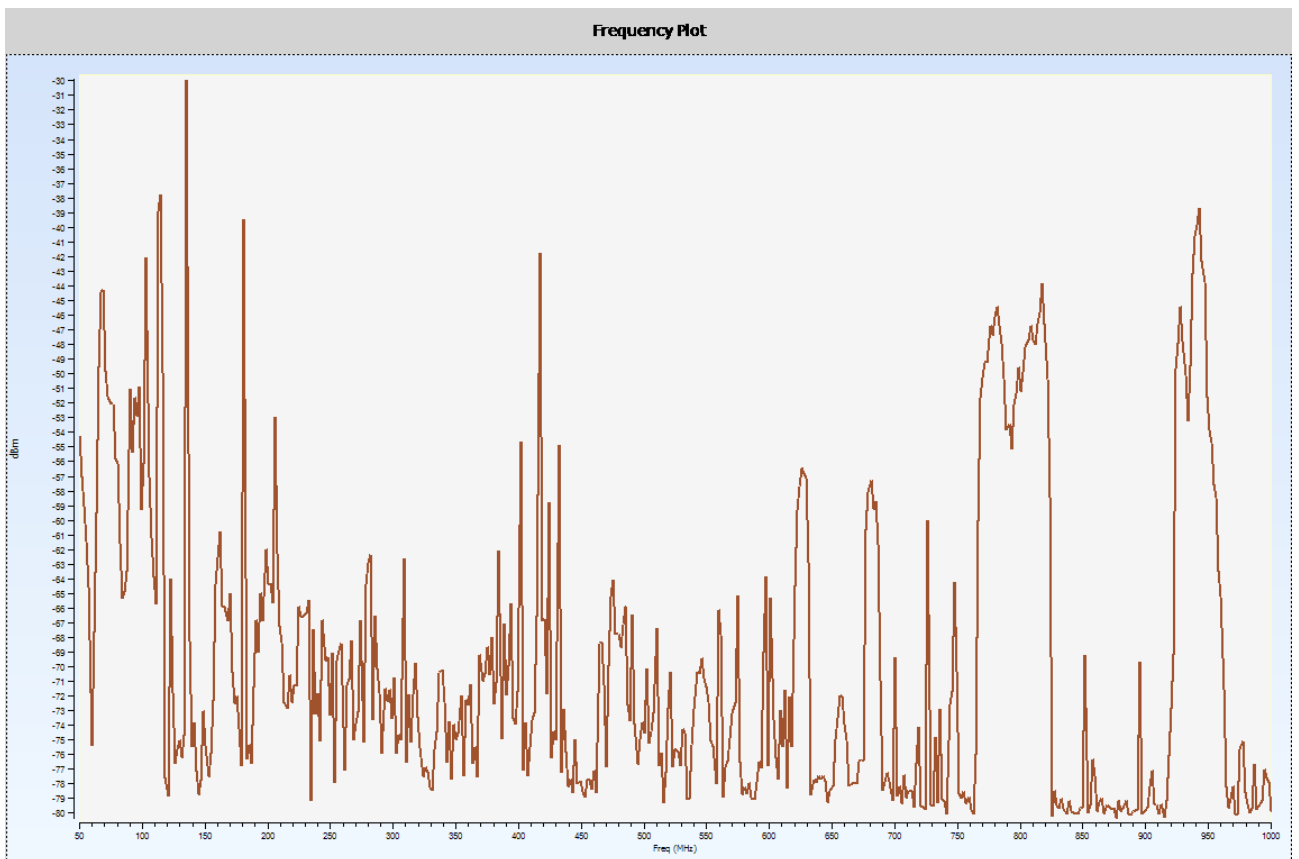
OLTC pusēs DI skenavimas.



110kV pusēs A fazēs DI skenavimas.

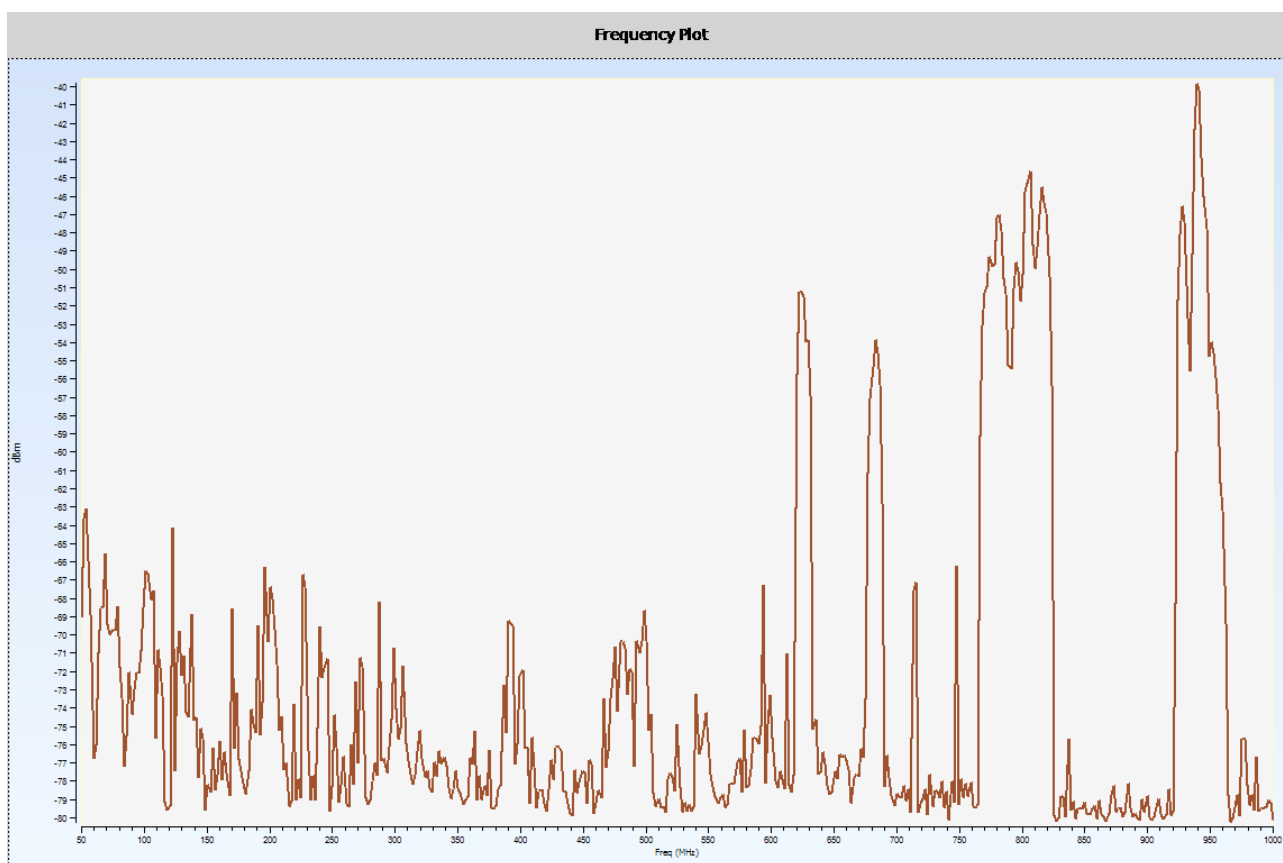


110kV pusės B fazės DI skenavimas.

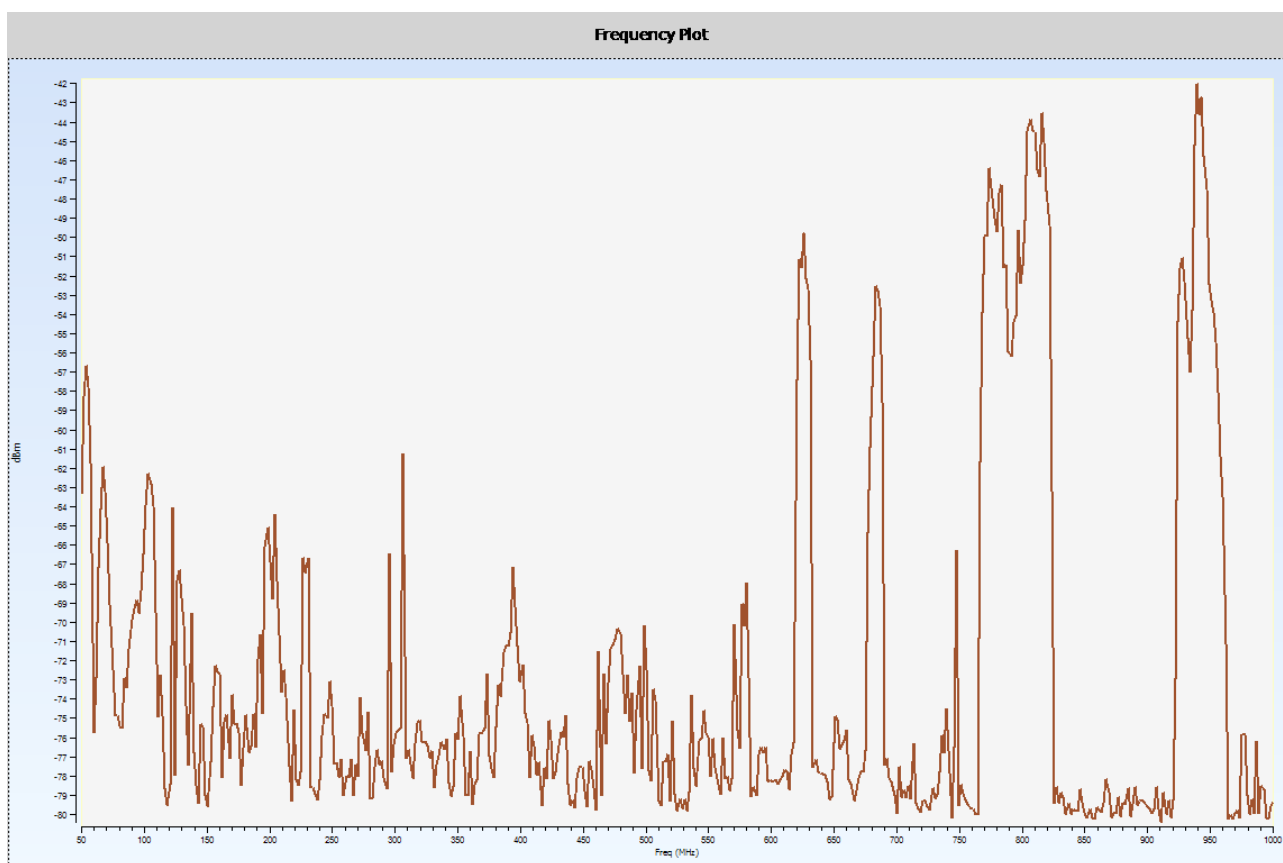


110kV pusės C fazės DI skenavimas.

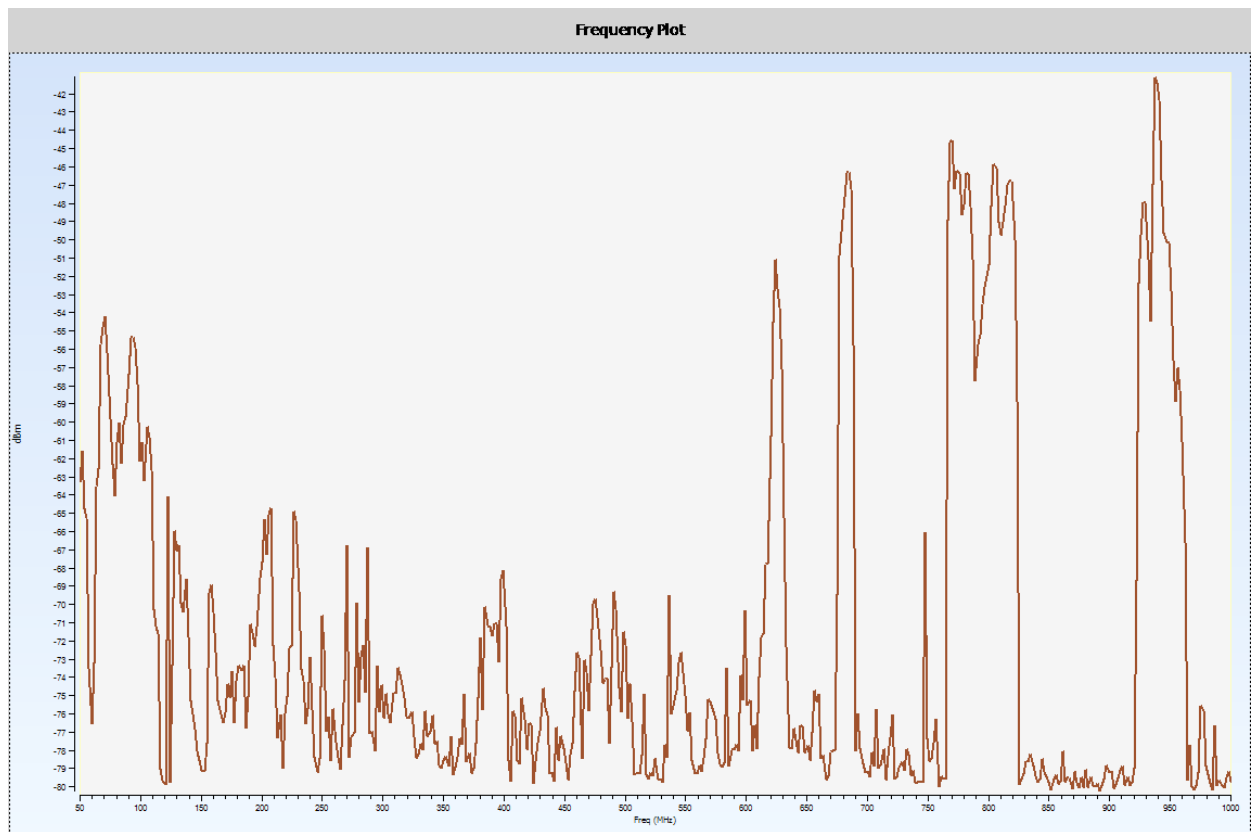
## Transformatoriaus AT-2 skenavimo duomenys



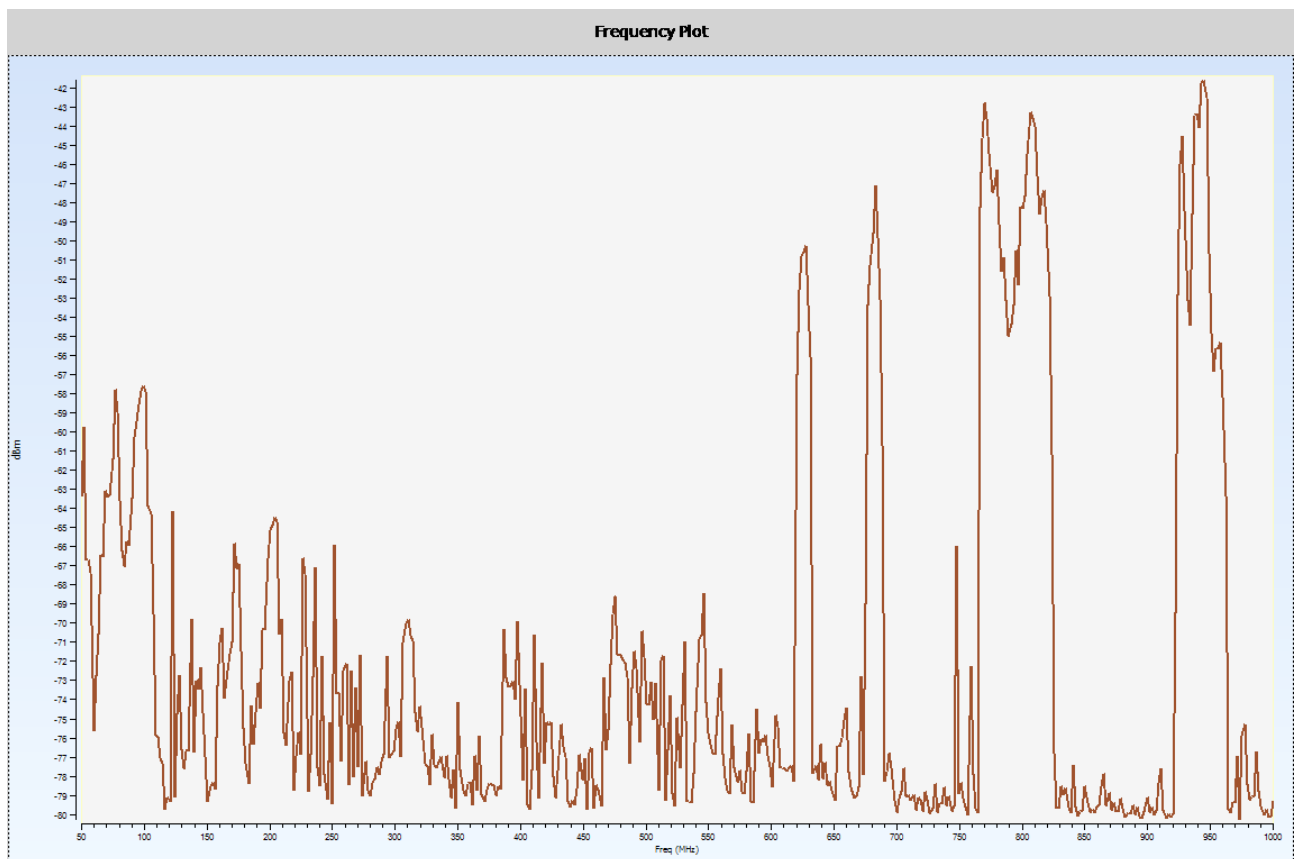
330kV pusės A fazės DI skenavimas.



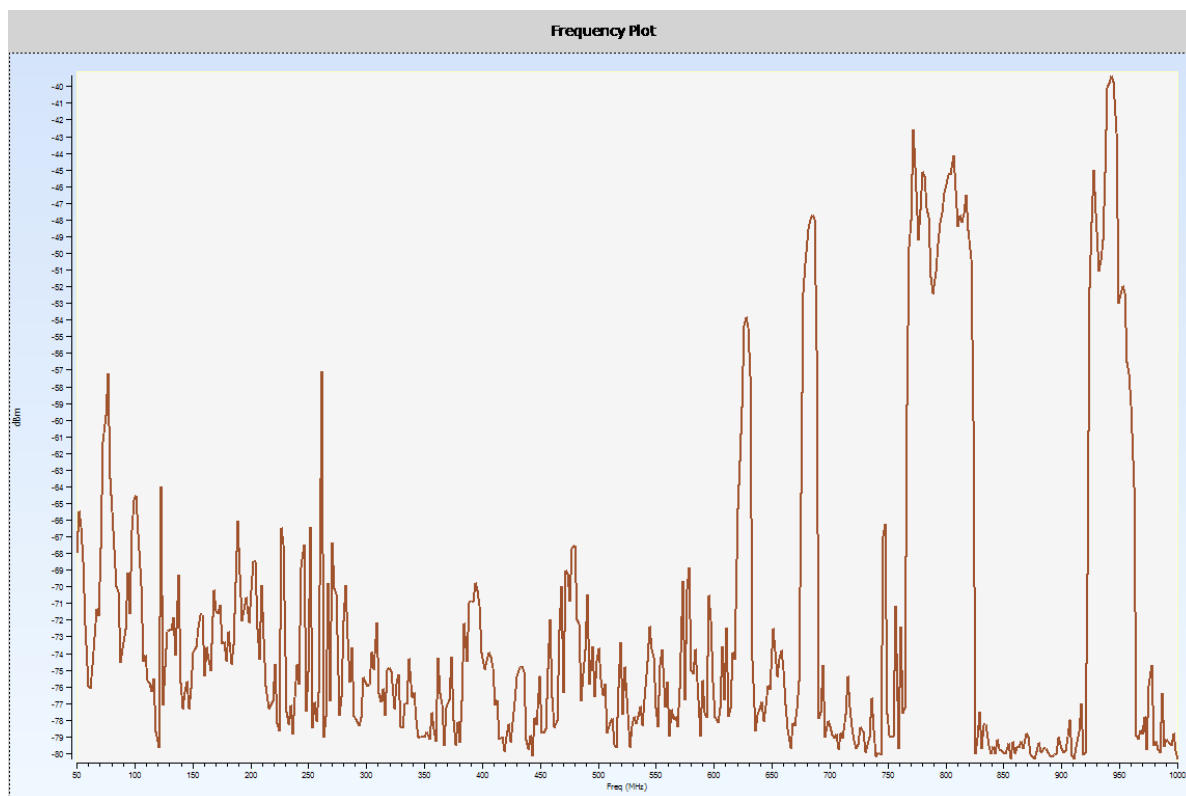
330kV pusės B fazės DI skenavimas.



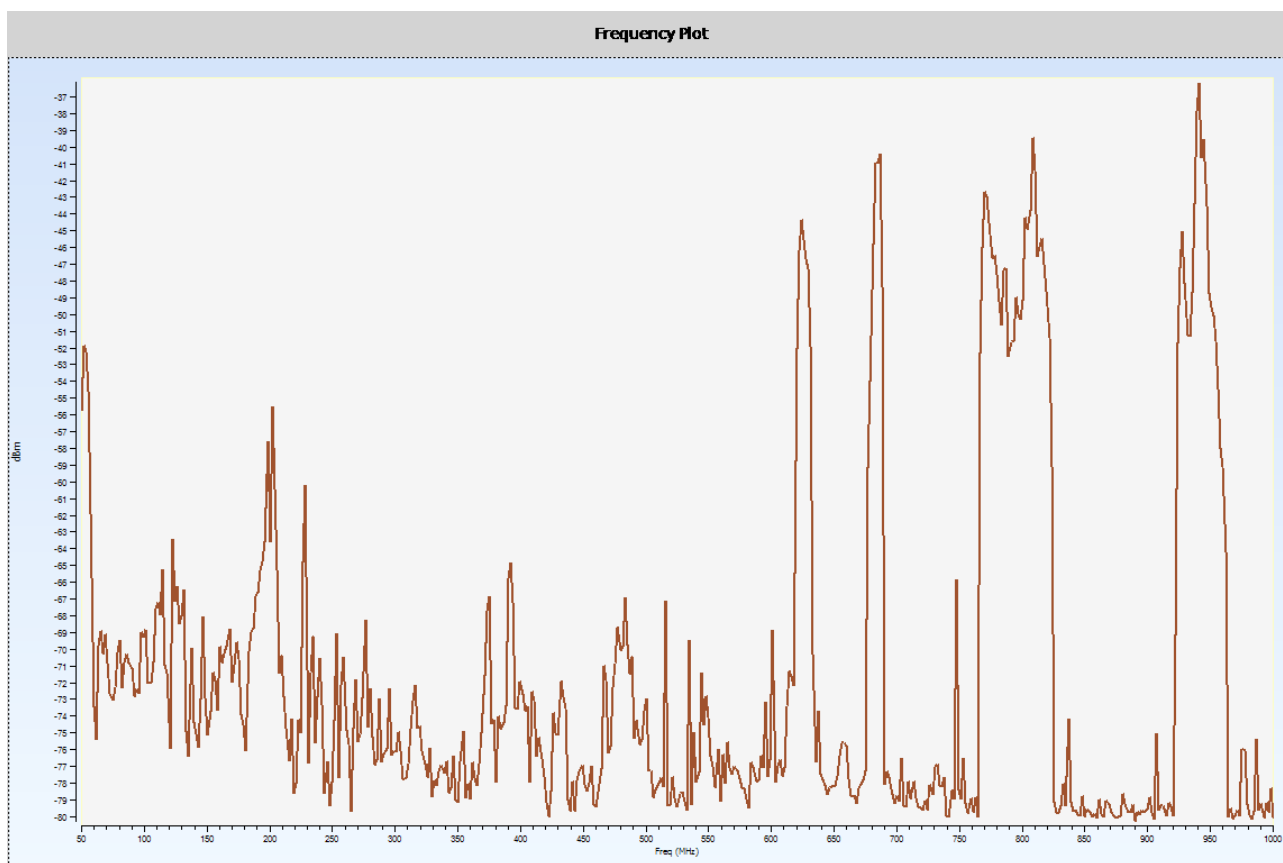
330kV pusės C fazės DI skenavimas.



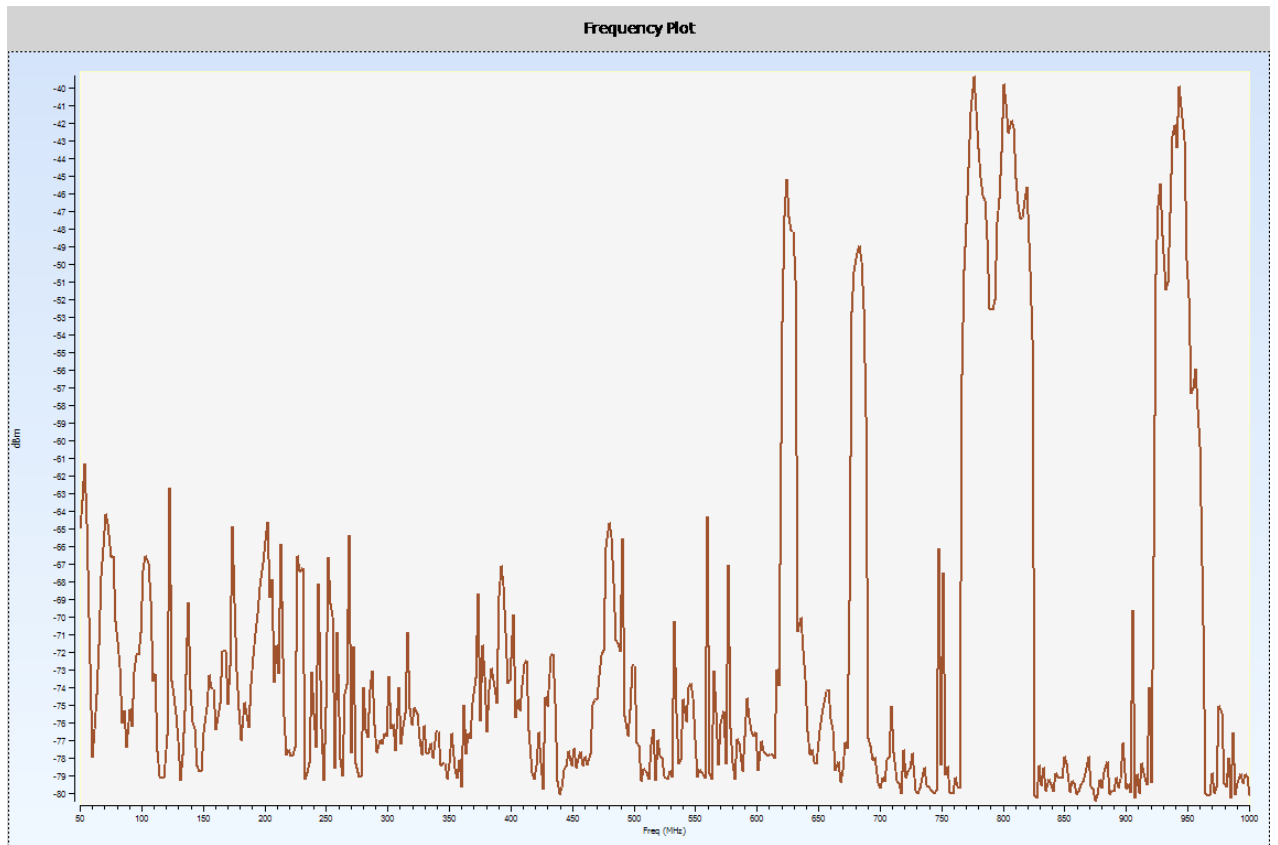
Neutralės pusės DI skenavimas.



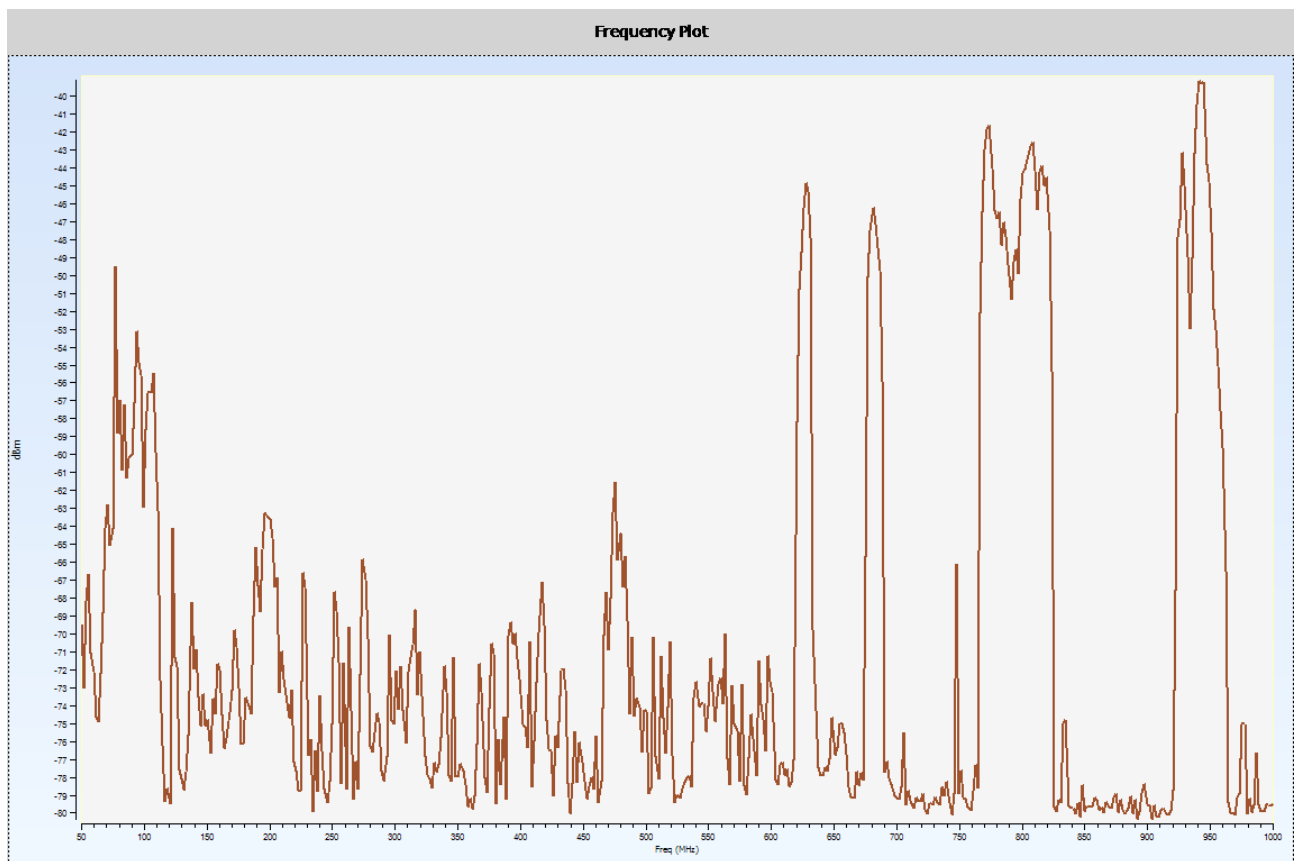
OLTC pusės DI skenavimas.



110kV pusės A fazės DI skenavimas.

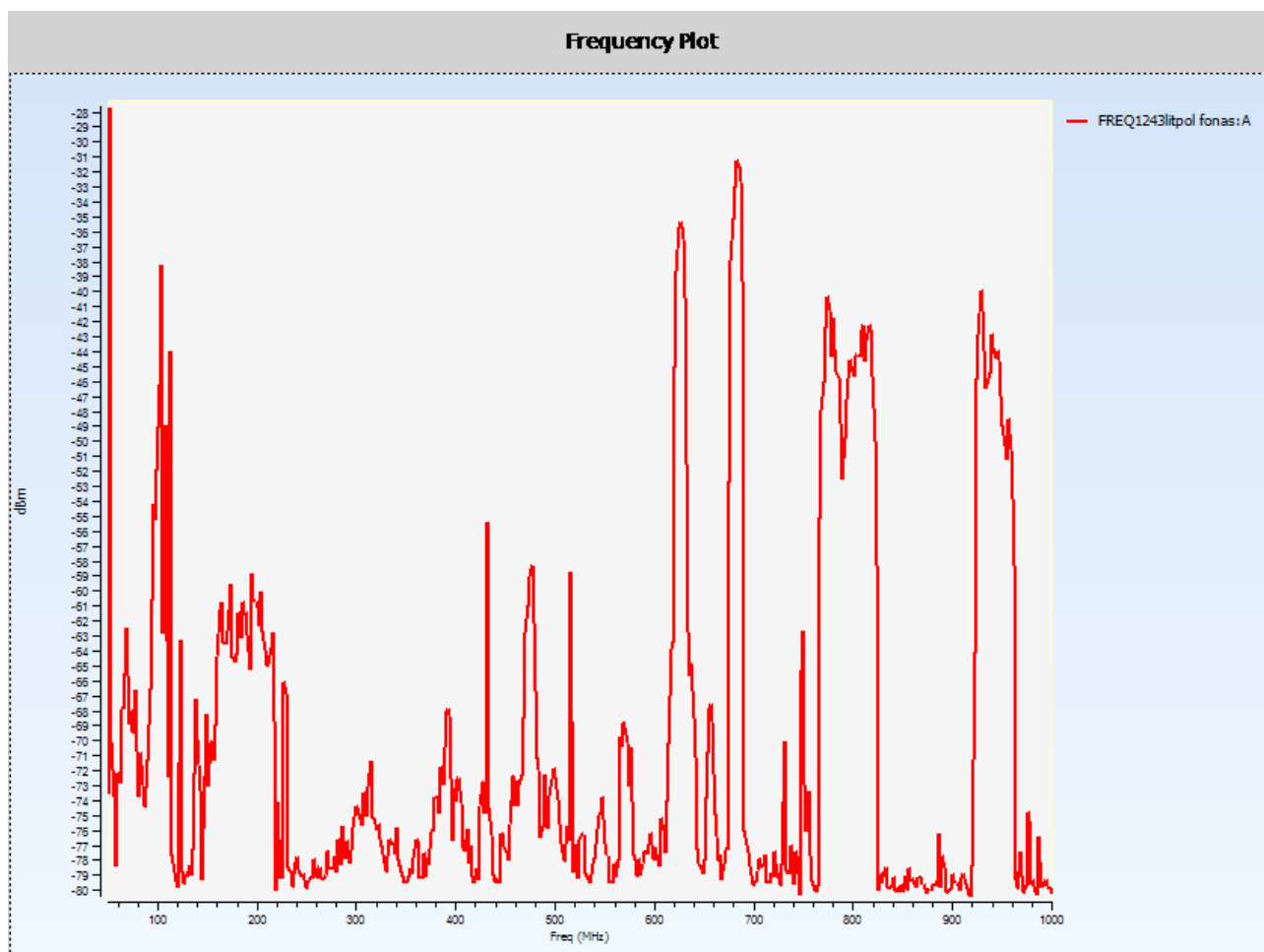


110kV pusės B fazės DI skenavimas.



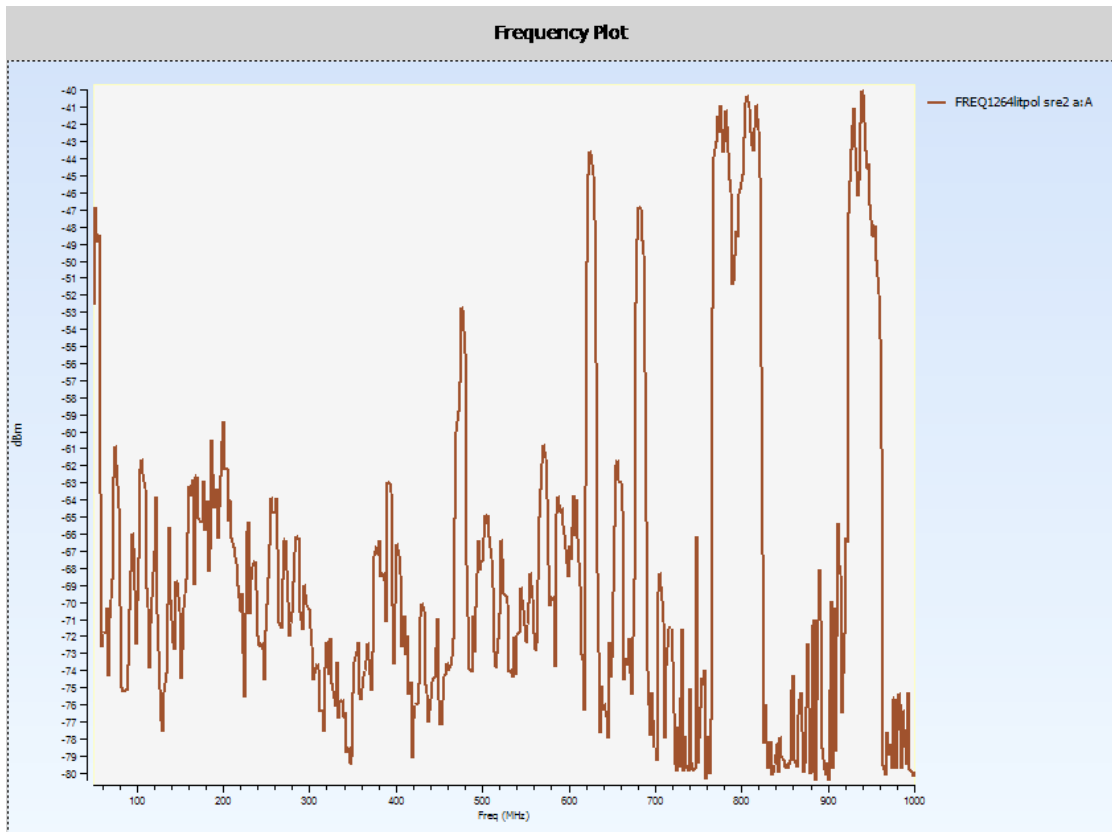
110kV pusės C fazės DI skenavimas.

## 7 priedas. Alytaus 400 kV TP dalinių išlydžių skenavimo rezultatai

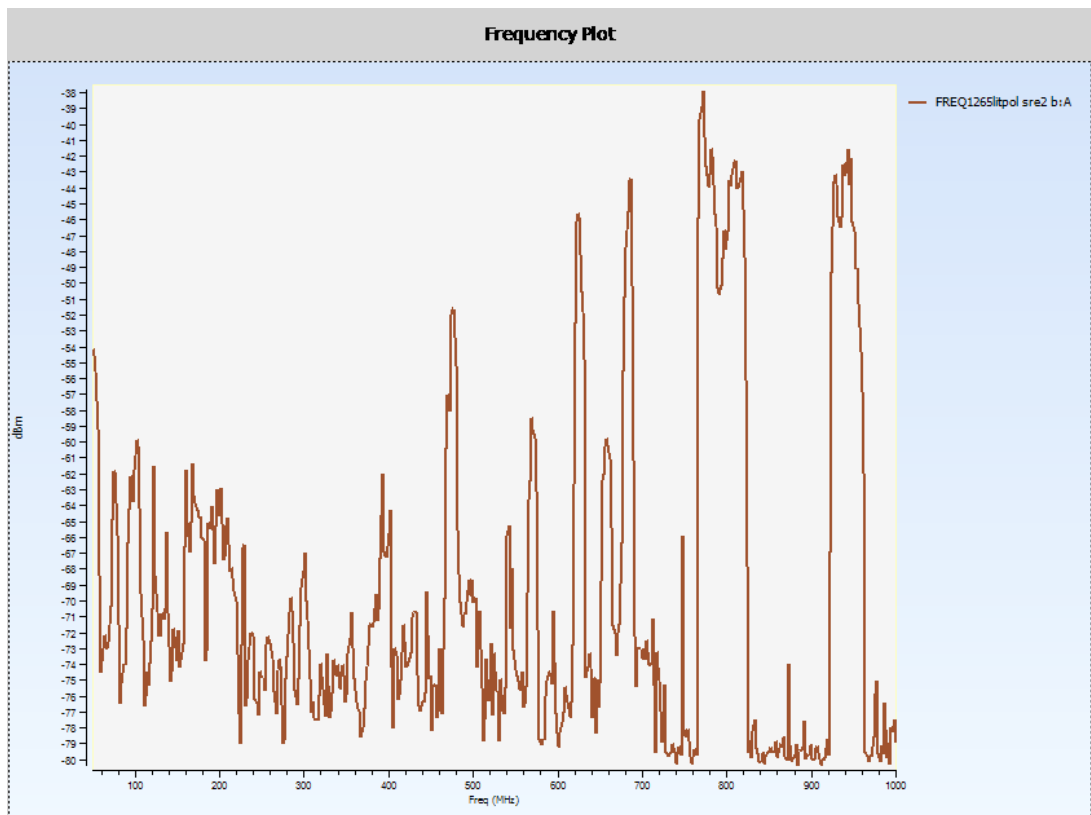


Fonas.

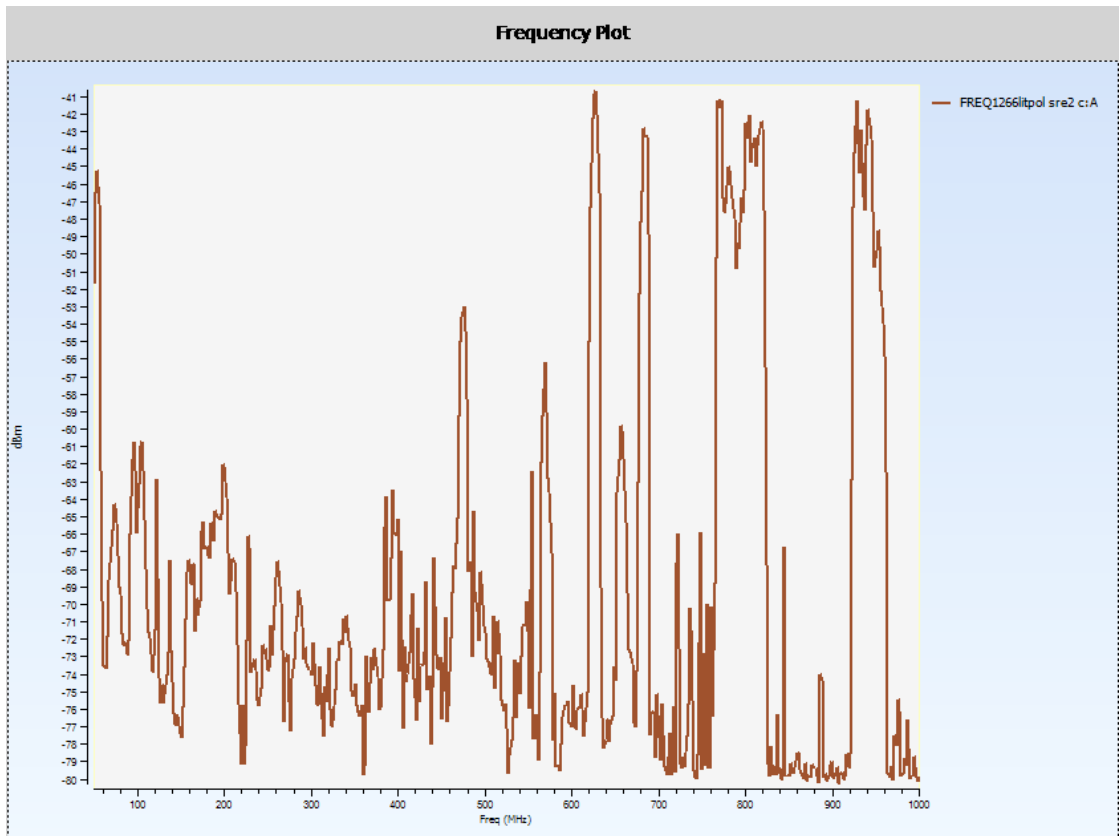
## Šuntinio reaktoriaus skenavimo duomenys



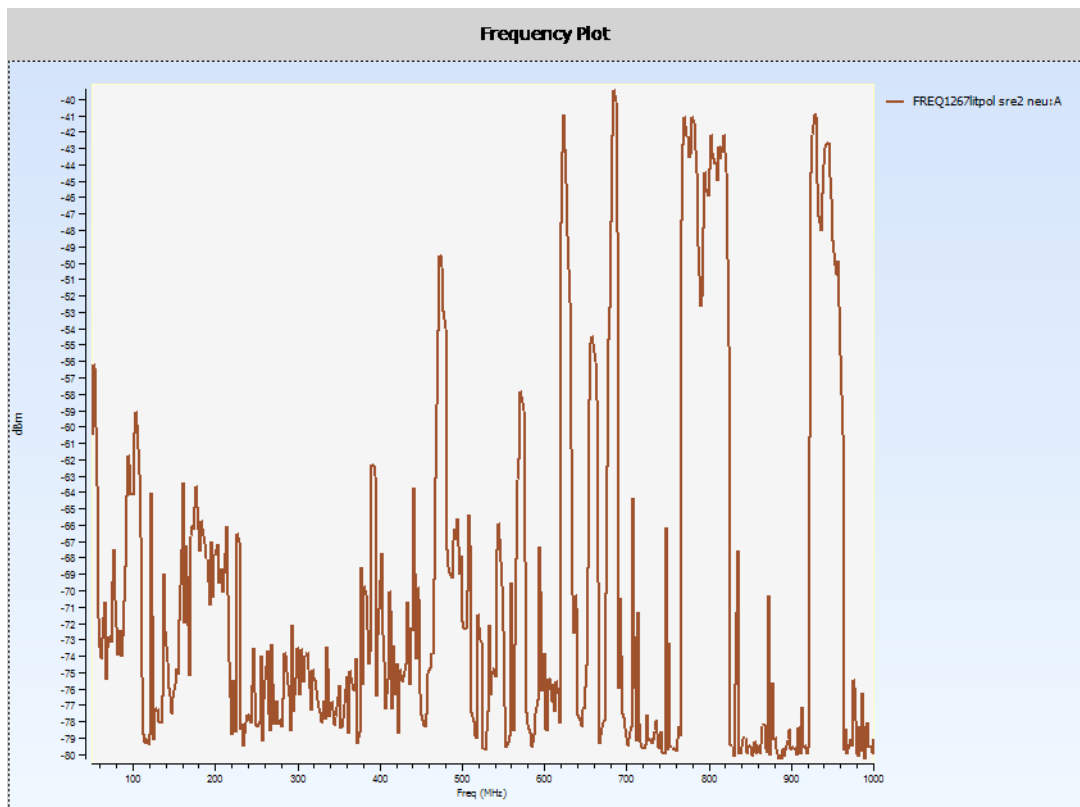
400kV A fazes DI skenavimas.



400kV B fazès DI skenavimas.



400kV C fazės DI skenavimas.



400kV C neutralės DI skenavimas.

## 8 priedas. Alyvos chromatografinės analizės duomenų apdorojimo kodas

Python/JupyterLab kodas.

```
1
2 """
3 Sutrumpinta alyvoje ištirpusių dujų chromatografinės analizės programa.
4
5 Programa skirta baigiamojo darbo priedui. Ji:
6 1. nuskaito alyvos chromatografinės analizės duomenis iš Excel failo;
7 2. apskaičiuoja diagnostinius dujų santykius;
8 3. apskaičiuoja TDCG rodiklį;
9 4. apskaičiuoja dujų prieaugio spartą ml/d;
10 5. parengia rezultatų lenteles, grafikus ir išsaugo rezultatus į Excel failą.
11
12 Dujų prieaugio spartos formulė:
13
14 
$$v = ((C_i - C_{(i-1)}) * m) / (q * \Delta t)$$

15
16 čia:
17 v      - dujų prieaugio sparta, ml/d;
18 C_i    - paskutinio matavimo dujų koncentracija;
19 C_(i-1) - ankstesnio matavimo dujų koncentracija;
20 m      - transformatoriaus alyvos masė, kg;
21 q      - alyvos tankis, kg/m³;
22 Δt     - intervalas tarp matavimų, d.
23
24 Naudojamos bibliotekos: pandas, numpy, openpyxl, matplotlib.
25 """
26
27 # =====
28 # 1. Bibliotekos ir pagrindiniai nustatymai
29 # =====
30
31 from pathlib import Path
32 import re
33 import unicodedata
34
35 import numpy as np
36 import pandas as pd
37 import matplotlib.pyplot as plt
38
39 try:
40     from IPython.display import display, Markdown
41 except Exception:
42     display = print
43     Markdown = lambda text: text
44
45
46 FILE_NAME = "alyvos_analizes_duomenys.xlsx"
47 SAVE_PLOTS = True
48 SHOW_PLOTS = True
49
50 GAS_COLUMNS = ["H2", "CO", "CO2", "CH4", "C2H6", "C2H4", "C2H2"]
51 ADDITIONAL_COLUMNS = ["H2O", "O2", "N2"]
52
53
54 # =====
55 # 2. Pagalbinės funkcijos
56 # =====
57
58 def remove_accents(text: str) -> str:
59     """Pašalina lietuviškas diakritines žymes."""
60     normalized = unicodedata.normalize("NFKD", str(text))
61     return "".join(char for char in normalized if not unicodedata.combining(char))
62
63
```

```

52
53
54 # =====
55 # 2. Pagalbinės funkcijos
56 # =====
57
58 def remove_accents(text: str) -> str:
59     """Pašalina lietuviškas diakritines žymes."""
60     normalized = unicodedata.normalize("NFKD", str(text))
61     return "".join(char for char in normalized if not unicodedata.combining(char))
62
63
64 def normalize_text(value) -> str:
65     """Suvienodina tekstą paieškai."""
66     if pd.isna(value):
67         return ""
68     text = str(value).strip().translate(str.maketrans("0123456789", "0123456789"))
69     return remove_accents(text)
70
71
72 def canonical_column_name(value: str) -> str:
73     """Suvienodina dažniausiai pasitaikančius stulpelių pavadinimus."""
74     original = "" if pd.isna(value) else str(value).strip()
75     original = original.translate(str.maketrans("0123456789", "0123456789"))
76     compact = re.sub(r"^[A-Za-z0-9]", "", normalize_text(original)).upper()
77
78     mapping = {
79         "H2": "H2", "CO": "CO", "CO2": "CO2",
80         "CH4": "CH4", "C2H6": "C2H6",
81         "C2H4": "C2H4", "C2H2": "C2H2",
82         "H2O": "H2O", "O2": "O2", "N2": "N2",
83     }
84
85     if compact in mapping:
86         return mapping[compact]
87     if "DATA" in compact or "MATAVIM" in compact or "MATVIM" in compact:
88         return "Data"
89     return original
90
91
92 def find_input_file(file_name: str) -> Path:
93     """Randa nurodytą arba naujausią tinkamą Excel failą."""
94     file_path = Path(file_name)
95
96     if file_path.exists():
97         return file_path
98
99     candidates = [
100         path for path in Path.cwd().glob("*.xlsx")
101         if not path.name.startswith("~$")
102         and "rezultatai" not in path.name.lower()
103         and "jupyter" not in path.name.lower()
104     ]
105
106     if not candidates:
107         raise FileNotFoundError("Nerastas analizuojamas .xlsx failas.")
108
109     return max(candidates, key=lambda path: path.stat().st_mtime)
110
111
112 def read_raw_sheet(file_path: Path, sheet_name: str) -> pd.DataFrame:
113     """Nuskaito Excel lapą be antraščių."""
114     return pd.read_excel(file_path, sheet_name=sheet_name, header=None, engine="openpyxl")
115

```

```

115
116
117 def find_row_contains(df: pd.DataFrame, pattern: str) -> int:
118     """Randa pirmą eilutę pagal tekstinį šabloną."""
119     regex = re.compile(pattern, flags=re.IGNORECASE)
120
121     for row_index, row in df.iterrows():
122         row_text = " | ".join("" if pd.isna(value) else normalize_text(value) for value in row.values)
123         if regex.search(row_text):
124             return row_index
125
126     raise ValueError(f"Neįrasta eilutė pagal šabloną: {pattern}")
127
128
129 def find_measurement_header_row(df: pd.DataFrame) -> int:
130     """Randa pagrindinės matavimų lentelės antraštės eilutę."""
131     for row_index, row in df.iterrows():
132         values = [normalize_text(value).lower() for value in row.values]
133         joined = " | ".join(values)
134
135         gas_count = sum(gas.lower() in values for gas in GAS_COLUMNS)
136         has_date = "data" in joined and ("matavim" in joined or "matvim" in joined)
137
138         if has_date and gas_count >= 4:
139             return row_index
140
141     return find_row_contains(df, r"matavimu data|matvimu data|matavim.*data|matvim.*data")
142
143
144 def excel_dates_to_datetime(series: pd.Series) -> pd.Series:
145     """Konvertuoja Excel datas į datetime formatą."""
146     result = pd.to_datetime(series, errors="coerce")
147     numeric = pd.to_numeric(series, errors="coerce")
148
149     mask = numeric.notna() & numeric.between(20000, 70000)
150     if mask.any():
151         result.loc[mask] = pd.to_datetime(
152             numeric.loc[mask],
153             unit="D",
154             origin="1899-12-30",
155             errors="coerce",
156         )
157
158     return result
159
160
161 def find_numeric_parameter(df: pd.DataFrame, patterns, preferred_cols=(5,)) -> float:
162     """Randa skaitinį parametą, pvz., alyvos masę arba tankį."""
163     regexes = [re.compile(pattern, flags=re.IGNORECASE) for pattern in patterns]
164
165     for _, row in df.iterrows():
166         row_text = " | ".join("" if pd.isna(value) else normalize_text(value) for value in row.values).lower()
167
168         if not any(regex.search(row_text) for regex in regexes):
169             continue
170

```

```

171     for column_index in preferred_cols:
172         if column_index < len(row):
173             value = pd.to_numeric(row.iloc[column_index], errors="coerce")
174             if pd.notna(value):
175                 return float(value)
176
177     for value in row.iloc[1:].tolist():
178         value = pd.to_numeric(value, errors="coerce")
179         if pd.notna(value):
180             return float(value)
181
182     return np.nan
183
184
185 def safe_division(numerator: pd.Series, denominator: pd.Series) -> pd.Series:
186     """Atlieka dalybą, apsaugant nuo dalybos iš nulio."""
187     return numerator / denominator.replace(0, np.nan)
188
189
190 def save_plot(fig, output_dir: Path, file_name: str) -> None:
191     """Išsaugo arba parodo grafiką."""
192     if SAVE_PLOTS:
193         output_dir.mkdir(exist_ok=True)
194         fig.savefig(output_dir / file_name, dpi=160, bbox_inches="tight")
195
196     if SHOW_PLOTS:
197         plt.show()
198     else:
199         plt.close(fig)
200
201
202 # =====
203 # 3. Excel failo nuskaitymas ir matavimų Lentelės paruošimas
204 # =====
205
206 file_path = find_input_file(FILE_NAME)
207 xls = pd.ExcelFile(file_path, engine="openpyxl")
208
209 main_sheet_name = None
210 raw_main = None
211
212 for sheet_name in xls.sheet_names:
213     raw_candidate = read_raw_sheet(file_path, sheet_name)
214
215     try:
216         find_measurement_header_row(raw_candidate)
217         main_sheet_name = sheet_name
218         raw_main = raw_candidate
219         break
220     except ValueError:
221         continue
222
223 if raw_main is None:
224     raise ValueError("Excel faile nerasta alyvos chromatografinės analizės lentelė.")
225
226 header_row = find_measurement_header_row(raw_main)
227 header_values = raw_main.iloc[header_row].tolist()
228 last_column = max(index for index, value in enumerate(header_values) if pd.notna(value))
229
230 headers = [canonical_column_name(value) for value in header_values[: last_column + 1]]
231 rows = []
232

```

```

232
233 for _, row in raw_main.iloc[header_row + 1:].iterrows():
234     if pd.isna(row.iloc[0]):
235         break
236     rows.append(row.iloc[: last_column + 1].tolist())
237
238 oil_data = pd.DataFrame(rows, columns=headers)
239 oil_data = oil_data.loc[:, [column for column in oil_data.columns if column != ""]]
240
241 if "Data" not in oil_data.columns:
242     oil_data = oil_data.rename(columns={oil_data.columns[0]: "Data"})
243
244 oil_data["Data"] = excel_dates_to_datetime(oil_data["Data"])
245
246 for column in oil_data.columns:
247     if column != "Data":
248         oil_data[column] = pd.to_numeric(oil_data[column], errors="coerce")
249
250 oil_data = oil_data.dropna(subset=["Data"]).sort_values("Data").reset_index(drop=True)
251
252 missing_columns = [column for column in GAS_COLUMNS if column not in oil_data.columns]
253 if missing_columns:
254     raise ValueError(f"Trūksta privalomų dujų stulpelių: {missing_columns}")
255
256
257 # =====
258 # 4. Diagnostiniai santykiai, TDCG ir pokyčiai
259 # =====
260
261 gas_ratios = pd.DataFrame({"Data": oil_data["Data"]})
262 gas_ratios["C2H2/C2H4"] = safe_division(oil_data["C2H2"], oil_data["C2H4"])
263 gas_ratios["CH4/H2"] = safe_division(oil_data["CH4"], oil_data["H2"])
264 gas_ratios["C2H4/C2H6"] = safe_division(oil_data["C2H4"], oil_data["C2H6"])
265 gas_ratios["C2H2/H2"] = safe_division(oil_data["C2H2"], oil_data["H2"])
266 gas_ratios["CO2/CO"] = safe_division(oil_data["CO2"], oil_data["CO"])
267
268 oil_summary = oil_data.copy()
269 combustible_columns = ["H2", "CH4", "C2H6", "C2H4", "C2H2", "CO"]
270 oil_summary["TDCG"] = oil_summary[combustible_columns].sum(axis=1)
271
272 numeric_columns = [column for column in oil_data.columns if column != "Data"]
273
274 if len(oil_data) >= 2:
275     previous = oil_data.iloc[-2]
276     latest = oil_data.iloc[-1]
277
278     changes = pd.DataFrame({
279         "Rodiklis": numeric_columns,
280         "Ankstesnė reikšmė": [previous[column] for column in numeric_columns],
281         "Paskutinė reikšmė": [latest[column] for column in numeric_columns],
282     })
283
284     changes["Pokytis"] = changes["Paskutinė reikšmė"] - changes["Ankstesnė reikšmė"]
285     changes["Pokytis, %"] = changes["Pokytis"] / changes["Ankstesnė reikšmė"].replace(0, np.nan) * 100
286 else:
287     changes = pd.DataFrame()
288

```

```

289
290 # =====
291 # 5. Dujų prieaugio spartos skaičiavimas
292 # =====
293
294 oil_mass_kg = find_numeric_parameter(
295     raw_main,
296     patterns=[r"alyvos\s*mase", r"alyvos\s*kiekis"],
297 )
298
299 oil_density_kg_m3 = find_numeric_parameter(
300     raw_main,
301     patterns=[r"masės\s*tankis", r"tankis"],
302 )
303
304 if pd.isna(oil_mass_kg) or pd.isna(oil_density_kg_m3) or oil_density_kg_m3 == 0:
305     oil_volume_factor = np.nan
306     print("Įspėjimas: nerasta alyvos masės arba tankio, todėl prieaugio sparta gali būti neskaičiuojama.")
307 else:
308     oil_volume_factor = oil_mass_kg / oil_density_kg_m3
309
310 days = oil_summary["Data"].diff().dt.total_seconds() / 86400
311 days = days.replace(0, np.nan)
312
313 growth_columns = [column for column in GAS_COLUMNS + ADDITIONAL_COLUMNS if column in oil_summary.columns]
314 growth_columns.append("TDCG")
315
316 gas_growth_rate = pd.DataFrame({
317     "Nuo": oil_summary["Data"].shift(1),
318     "Iki": oil_summary["Data"],
319     "Dienų intervalas": days,
320     "Alyvos masė m, kg": oil_mass_kg,
321     "Tankis q, kg/m³": oil_density_kg_m3,
322     "m/q, m³": oil_volume_factor,
323 })
324
325 for column in growth_columns:
326     gas_growth_rate[f"{column}, prieaugis ml/d"] = (
327         oil_summary[column].diff() * oil_volume_factor / days
328     )
329
330 gas_growth_rate = gas_growth_rate.dropna(subset=["Nuo", "Iki"]).reset_index(drop=True)
331
332
333 # =====
334 # 6. Automatinė rezultatų suvestinė
335 # =====
336
337 summary_rows = [
338     ["Naudotas failas", file_path.name],
339     ["Pagrindinis Excel lapas", main_sheet_name],
340     ["Matavimų skaičius", len(oil_data)],
341 ]
342
343 if not oil_data.empty:
344     summary_rows.append(["Paskutinio matavimo data", oil_data["Data"].max().date().isoformat()])
345     summary_rows.append(["Paskutinio matavimo TDCG", float(oil_summary.iloc[-1]["TDCG"])])
346
347 if not gas_growth_rate.empty:
348     latest_growth = gas_growth_rate.iloc[-1]
349     growth_value_columns = [column for column in gas_growth_rate.columns if column.endswith("prieaugis ml/d")]
350

```

```

351     max_growth = (
352         latest_growth[growth_value_columns]
353         .dropna()
354         .sort_values(key=lambda series: series.abs(), ascending=False)
355         .head(3)
356     )
357
358     summary_rows.extend([
359         ["Paskutinio intervalo trukmė, d.", round(float(latest_growth["Dienų intervalas"]), 2)],
360         ["Naudota alyvos masė m, kg", oil_mass_kg],
361         ["Naudotas tankis q, kg/m3", oil_density_kg_m3],
362         [
363             "Didžiausia prieaugio sparta",
364             "; ".join(f"{index.replace(' ', prieaugis ml/d', '')}: {value:.3g} ml/d"
365                     for index, value in max_growth.items()),
366         ],
367     ])
368
369     summary = pd.DataFrame(summary_rows, columns=["Rodiklis", "Reikšmė"])
370
371
372     # =====
373     # 7. Rezultatų peržiūra JupyterLab aplinkoje
374     # =====
375
376     display(Markdown("## Alyvos chromatografinės analizės duomenys"))
377     display(oil_data)
378
379     display(Markdown("## Diagnostiniai dujų santykiai"))
380     display(gas_ratios)
381
382     display(Markdown("## Pokyčiai tarp paskutinio ir ankstesnio matavimo"))
383     display(changes)
384
385     display(Markdown("## Dujų prieaugio sparta, ml/d"))
386     display(gas_growth_rate)
387
388     display(Markdown("## Automatinė suvestinė"))
389     display(summary)
390
391
392     # =====
393     # 8. Grafikų sudarymas
394     # =====
395
396     plot_dir = file_path.with_name(file_path.stem + "_grafikai")
397     plot_columns = [column for column in GAS_COLUMNS + ADDITIONAL_COLUMNS if column in oil_data.columns]
398
399     if plot_columns:
400         fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
401         oil_data.set_index("Data")[plot_columns].plot(marker="o", ax=ax)
402         ax.set_title("Alyvoje ištirpusių dujų koncentracijų pokytis")
403         ax.set_xlabel("Matavimo data")
404         ax.set_ylabel("Dujų koncentracija")
405         ax.grid(True, alpha=0.3)
406         plt.xticks(rotation=45)
407         plt.tight_layout()
408         save_plot(fig, plot_dir, "01_duju_koncentraciju_pokytis.png")

```

```

409
410 ratio_columns = [column for column in gas_ratios.columns if column != "Data"]
411
412 if ratio_columns:
413     fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
414     gas_ratios.set_index("Data")[ratio_columns].plot(marker="o", ax=ax)
415     ax.set_title("Pagrindinių diagnostinių dujų santykių pokytis")
416     ax.set_xlabel("Matavimo data")
417     ax.set_ylabel("Santykis")
418     ax.grid(True, alpha=0.3)
419     plt.xticks(rotation=45)
420     plt.tight_layout()
421     save_plot(fig, plot_dir, "02_duju_santykiu_pokytis.png")
422
423 growth_plot_columns = [
424     f"{column}, prieaugis ml/d"
425     for column in plot_columns
426     if f"{column}, prieaugis ml/d" in gas_growth_rate.columns
427 ]
428
429 if not gas_growth_rate.empty and growth_plot_columns:
430     fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
431     gas_growth_rate.set_index("Iki")[growth_plot_columns].rename(
432         columns={f"{column}, prieaugis ml/d": column for column in plot_columns}
433     ).plot(marker="o", ax=ax)
434     ax.axhline(0, linewidth=1)
435     ax.set_title("Dujų prieaugio sparta pagal matavimo intervalus")
436     ax.set_xlabel("Matavimo data")
437     ax.set_ylabel("Prieaugio sparta, ml/d")
438     ax.grid(True, alpha=0.3)
439     plt.xticks(rotation=45)
440     plt.tight_layout()
441     save_plot(fig, plot_dir, "03_duju_prieaugio_sparta.png")
442
443
444 # =====
445 # 9. Rezultatų išsaugojimas
446 # =====
447
448 output_file = file_path.with_name(file_path.stem + "_sutrumpinti_rezultatai.xlsx")
449
450 with pd.ExcelWriter(output_file, engine="openpyxl") as writer:
451     summary.to_excel(writer, sheet_name="Suvestinė", index=False)
452     oil_data.to_excel(writer, sheet_name="Alyvos duomenys", index=False)
453     oil_summary.to_excel(writer, sheet_name="Alyvos su TDCG", index=False)
454     gas_ratios.to_excel(writer, sheet_name="Dujų santykiai", index=False)
455     gas_growth_rate.to_excel(writer, sheet_name="Prieaugio sparta", index=False)
456     changes.to_excel(writer, sheet_name="Pokyčiai", index=False)
457
458 print(f"Rezultatai išsaugoti: {output_file.resolve()}")
459
460 if SAVE_PLOTS:
461     print(f"Grafikai išsaugoti aplanke: {plot_dir.resolve()}")
462

```