



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

## **Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Karolis Šilkaitis**

Projekto autorius

**Doc. Povilas Marčiulionis**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

## **Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Karolis Šilkaitis**

Projekto autorius

**Doc. Povilas Marčiulionis**

Vadovas

**Lekt. Kęstutis Jasiūnas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Karolis Šilkaitis

## **Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autorius 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.

Karolis Šilkaitis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Šilkaitis, Karolis. Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Povilas Marčiulionis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: vainikinis išlydis, elektrinis lauko stipris, erdvinis krūvio tankis.

Kaunas, 2021. 43 p.

### **Santrauka**

Baigiamajame magistro darbe yra atliekamas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio tyrimas. Literatūros analizėje apžvelgiama vainikinio išlydžio tipai, keliamos problemos, apribojimo būdai bei panaudojimas praktikoje. Taip pat literatūros analizėje apžvelgiami modeliavimo metodai ir modeliavimo programos.

Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio tyrimui dėl savo populiarumo panaudojimo praktikoje pasirenkama „laidas šalia plokštumos“ elektrodų geometrija. Su baigtinių elementų modeliavimo programa sukuriama matematinis nuolatinės srovės vainikinio išlydžio modelis. Nustatoma vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa. Analizuojamos nuolatinės srovės vainikinio išlydžio charakteristikų priklausomybės nuo laidininko spindulio, aukščio tarp elektrodų ir įtampos. Tiriamas erdvinio krūvio tankio ir potencialo pasiskirstymas erdvėje vykstant vainikiniam išlydžiui.

Atliekamas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ elektrodų sistemos eksperimentinis tyrimas. Gauti eksperimentinio tyrimo rezultatai palyginami su sukurto matematinio modelio rezultatais.

Šilkaitis, Karolis. Investigation of Direct Current Corona Discharge. Master's Final Degree Project / supervisor Asoc. Prof. Dr. Povilas Marčiulionis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: corona discharge, electric field strength, spatial charge density.

Kaunas, 2021. 43 p.

### **Summary**

In the final master's degree project a study of direct current corona discharge is performed. The analysis of the literature reviews corona discharge types, problems, methods of restriction and use in practice. Modeling methods and modeling programs are also reviewed in the literature analysis.

Due to its popularity in practice the wire-to-plane electrode system is chosen for the study of direct current corona discharge. A mathematical model of direct current corona discharge is created with finite element modeling program. The voltage at which corona discharge occurs is determined. The dependence of the direct current corona discharge characteristics from conductor radius, height between electrodes and voltage are analyzed. The distribution of spatial charge density and potential in space during corona discharge is investigated.

An experimental direct current corona discharge study of the wire-to-plane electrode system is performed. The obtained results of the experimental research are compared with the results of developed mathematical model.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Santrumpų sąrašas</b> .....	<b>9</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Literatūros apžvalga</b> .....	<b>11</b>
1.1. Dalinis išlydis.....	11
1.1.1. Bendrai apie dalinį išlydį.....	11
1.1.2. Dalinio išlydžio aptikimo metodai .....	12
1.2. Vainikinis išlydis.....	13
1.2.1. Bendrai apie vainikinį išlydį.....	13
1.2.2. Vainikinio išlydžio keliamos problemos .....	14
1.2.3. Vainikinio išlydžio charakteristikų priklausomybės .....	14
1.2.4. Vainikinio išlydžio skirstymas.....	15
1.2.5. Vainikinio išlydžio panaudojimas.....	16
1.2.6. Vainikinio išlydžio apribojimas.....	17
1.3. Vainikinio išlydžio modeliavimas .....	18
1.3.1. Skaitinis modeliavimas.....	19
1.3.2. Modeliavimo metodai.....	21
1.3.3. Modeliavimo programos.....	23
<b>2. Modeliavimas</b> .....	<b>24</b>
2.1. Modelio geometrija .....	24
2.2. Matematinis skaičiavimų modelis.....	24
<b>3. Modeliavimo rezultatai</b> .....	<b>29</b>
3.1. Vainikinio išlydžio charakteristikų analizė esant 12 mm tarp elektrodų .....	29
3.2. Vainikinio išlydžio charakteristikų priklausomybė nuo laidininko spindulio, įtampos ir aukščio tarp elektrodų .....	32
3.3. Eksperimentinis tyrimas .....	37
3.4. Modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas.....	38
<b>Išvados</b> .....	<b>41</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>42</b>
<b>Priedai</b> .....	<b>44</b>
1 priedas. Ilginio srovės tankio esant laidininkui 10 mm aukštyje tarp elektrodų modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet $r_0 = 0,05$ mm .....	44
2 priedas. Ilginio srovės tankio esant laidininkui 15 mm aukštyje tarp elektrodų modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet $r_0 = 0,05$ mm.....	44

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Išlydžių charakteristikos esant skirtingų elektrodų tipams [11].....	15
<b>2 lentelė.</b> Vainikinio išlydžio žiedo įtaka potencialo pasiskirstymui tarp izoliatorių [14] .....	17
<b>3 lentelė.</b> Vainikinio išlydžio modeliavimo rezultatai esant 12 mm tarp elektrodų.....	29
<b>4 lentelė.</b> Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos priklausomybė nuo laidininko aukščio tarp elektrodų.....	32
<b>5 lentelė.</b> Erdvinio krūvio tankio priklausomybė nuo laidininko įtampos ir aukščio virš elektrodo	33
<b>6 lentelė.</b> Ilginio srovės tankio priklausomybė nuo laidininko įtampos ir aukščio virš elektrodo....	35
<b>7 lentelė.</b> Ilginio srovės tankio modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet $r_0 = 0,05$ mm .....	38
<b>8 lentelė.</b> Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet $r_0 = 0,05$ mm .....	40

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Dalinių išlydžių aptikimo metodai [5] .....	12
<b>2 pav.</b> Pradinės dalinio išlydžio įtampos (PDIV) priklausomybė nuo dažnio ir oro slėgio [10] .....	14
<b>3 pav.</b> Neigiamo ir teigiamo vainikinio išlydžio stadijos [9].....	15
<b>4 pav.</b> Santykinio intensyvumo priklausomybė nuo įtampos [13].....	16
<b>5 pav.</b> Ryšys tarp skirtingų reiškinių elektrosstatiniuose nusodintuvuose [15].....	19
<b>6 pav.</b> Tinklelio tipai: (a) struktūrizuotas, (b) nestruktūrizuotas [19] .....	21
<b>7 pav.</b> Tūrio valdymo schemas: (a) Orientuota į elementą, (b) Orientuota į mazgą (dvigubo valdymo) [19].....	22
<b>8 pav.</b> Vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ modelio geometrija.....	24
<b>9 pav.</b> Baigtinių elementų tinklelis geometrijoje: kairėje – priartintas vainikinio išlydžio elektrodas, dešinėje – visa geometrija. ....	27
<b>10 pav.</b> Elektrinio lauko stipris ant vainikinio išlydžio elektrodo, kuomet $V = 10 \text{ kV}$ , $\rho = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}^3$ . ....	27
<b>11 pav.</b> Erdvės krūvio tankis ir ilginis srovės tankis ant vainikinio išlydžio elektrodo prie skirtingų įtampų.....	29
<b>12 pav.</b> Potencialo pasiskirstymas erdvėje 5 kV – 10 kV.....	30
<b>13 pav.</b> Erdvės krūvio tankio pasiskirstymas erdvėje prie skirtingų įtampų .....	30
<b>14 pav.</b> Potencialo pasiskirstymas erdvėje esant 10 kV įtampai tarp elektrodų: kairėje be krūvio tankio, dešinėje su krūvio tankiu .....	31
<b>15 pav.</b> Elektrinis lauko stipris ant elektrodo paviršiaus prie 6 kV ir 10 kV įtampos.....	31
<b>16 pav.</b> Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje .....	32
<b>17 pav.</b> Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos priklausomybė nuo laidininko aukščio virš elektrodo .....	33
<b>18 pav.</b> Erdvinio krūvio tankio ir laidininko aukščio virš elektrodo priklausomybė esant 7 kV įtampai .....	34
<b>19 pav.</b> Erdvinio krūvio tankio ir įtampos priklausomybė esant laidininkui 12 mm virš elektrodo. 34	
<b>20 pav.</b> Ilginio srovės tankio ir laidininko aukščio virš elektrodo priklausomybė esant 7 kV įtampai .....	35
<b>21 pav.</b> Ilginio srovės tankio ir įtampos priklausomybė esant laidininkui 15 mm tarp elektrodų ....	36
<b>22 pav.</b> Erdvinio krūvio tankio pasiskirstymas prie skirtingų aukščių tarp elektrodų, kuomet $r_0=0,05 \text{ mm}$ , $V = 7 \text{ kV}$ .....	36
<b>23 pav.</b> Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio eksperimentinio tyrimo schema .....	37
<b>24 pav.</b> Aukštos įtampos šaltinis „HCP 35-20000“ .....	37
<b>25 pav.</b> Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio eksperimentinio tyrimo nuotrauka .....	38
<b>26 pav.</b> Ilginio srovės tankio esant laidininkui 12 mm aukštyje tarp elektrodų modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet $r_0 = 0,05 \text{ mm}$ .....	39



## Santrumpų sąrašas

### Santrumpos:

AE – elektrinis aptikimo metodas;

UHF – ultra aukšto dažnio aptikimo metodas;

OE – optinis aptikimo metodas;

AE – akustinis aptikimo metodas;

DGA – ištirpintų dujų analizė;

BEM – baigtinis elementų metodas;

BSM – baigtinis skirtumų metodas;

BTM – baigtinis tūrių metodas;

EHD – elektrohidrodinaminis;

PDIV – pradinė dalinio išlydžio įtampa.

## **Įvadas**

Elektros energetikos technologijų ir infrastruktūros tobulėjimas yra vienas iš svarbiausių aspektų lėmusių spartų žmonijos vystymąsi. Tačiau tobulėjant technologijoms ir standartams yra susiduriama su iššūkiais, kuriuos tenka įveikti norint efektyviai ir saugiai įdiegti šias technologijas žmonių aplinkoje. Norint sumažinti nuostolius perduodant elektros energiją dideliais atstumais yra aukštinama įtampa. Tačiau esant aukštai įtampai yra susiduriama su įvairiomis problemomis. Viena iš tokių problemų elektros energetikos sektoriuje yra dalinis išlydis. Vainikinis išlydis yra viena iš dalinio išlydžio rūšių. Vainikinis išlydis pasižymi melsvai violetiniu švytėjimu ir ūžimu. Jis stipriai kenkia izoliacijai, todėl būtina jį tai atsižvelgti elektros įrenginių projektavime ir eksploatacijoje.

Vainikinis išlydis gali ne tik kenkti, bet ir būti panaudojamas įvairiuose komerciniuose ir pramoniniuose procesuose. Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio savybės yra panaudojamos dalelių nusodinimui, atskyrimui, maišymui, o taip pat ir ozono gamyboje. Viena iš labiausiai paplitusių nuolatinės srovės vainikinio išlydžio panaudojimo geometrijų yra „laidas šalia plokštumos“. Tobulėjant technologijoms ir modeliavimo programoms atsiranda galimybės ir poreikis atlikti detalius vainikinio išlydžio charakteristikų atsiradimo ir aptikimo tyrimus.

### **Darbo tikslas:**

Sukurti matematinį modelį, pagrįstą baigtinių elementų metodu, nuolatinės srovės vainikinio išlydžio tyrimui ir patikrinti jo tikslumą su eksperimentiniu tyrimu.

### **Uždaviniai:**

1. Apžvelgti vainikinio išlydžio keliamas problemas, tipus, modeliavimo metodus bei panaudojimo būdus.
2. Sukurti nuolatinės srovės vainikinio išlydžio modelį naudojant baigtinių elementų programą.
3. Atlikti nuolatinės srovės vainikinio išlydžio eksperimentą.
4. Palyginti modeliavimo ir eksperimento rezultatus.

## 1. Literatūros apžvalga

### 1.1. Dalinis išlydis

#### 1.1.1. Bendrai apie dalinį išlydį

Dalinis išlydis, tai elektros energijos iškrova, kuri atsiranda lokalizuotoje vietoje tarp dviejų laidininkų, kuomet nėra iki galo pramušamas tarpas tarp jų [1]. Jį sukelia izoliacijos ir elektros komponentų sujungimų nevientisumas bei trūkumai. Dalinio išlydžio atsiradimas vidutinės arba aukštos įtampos izoliacijoje yra vienas iš pirmųjų indikatorių, jog izoliacijos sistema nusidevėjo arba yra sumontuota netinkamai [2]. Dalinis išlydis gali vykti iš fazės į fazę ir iš fazės į žemę, jis vyksta ten kur yra pažeista izoliacija. Net 85 % įvykusių gedimų vidutinėje ir aukštoje įtampoje yra susiję su daliniu išlydžiu [3]. Dalinio išlydžio prevencija prasideda nuo tinkamo sistemos suprojektavimo, kokybiškos įrenginių gamybos bei kvalifikuotų sistemos surinkimo specialistų, kadangi maža klaida gali privesti prie totalinės sistemos avarijos. Priklausomai nuo izoliacinės sistemos pažeidimo dėl dalinio išlydžio poveikio gedimas gali pasireikšti laikotarpyje nuo kelių valandų iki kelerių metų. Dalinis išlydis vyksta įvairiose terpėse [3]:

1. Tuštumose (angl. voids) ar tarpuose esančiuose vientisoje izoliacijoje;
2. Izoliacijos paviršiuje;
3. Dujų burbuliuokuose skystoje izoliacijoje;
4. Dujose aplink elektroda.

Dalinis išlydis gali būti penkių tipų [4]:

1. Tuštumos išlydis (angl. void discharge) – atsiranda dėl gamintojo broko vientisoje izoliacijoje. Dažniausiai pasireiškia kabeliuose ir izoliatoriuose. Šis išlydžio tipas yra labai kenksmingas izoliacijai ir vis intensyvėja, kol įvyksta gedimas, todėl jei izoliatoriuje pastebima tuštuma jį reikia iškart pakeisti;
2. Vainikinis išlydis – išlydis į orą, kuris dažniausiai įvyksta dėl aštraus kampo esančio laidininko paviršiuje;
3. Paviršinis išlydis – išlydis, kuris atsiranda išilgai izoliacijos paviršiuje. Šis išlydis įvyksta dėl paviršiaus užterštumo, netinkamos priežiūros ar aplinkos poveikio izoliatoriui. Dažniausiai paviršinis išlydis atsiranda, kai izoliacija yra veikiamą labai didelės drėgmės ir jiniai patenka į izoliacijos vidų;
4. Plūduriuojantis išlydis (angl. floating discharge) – atsiranda, kai laidininkas, kuriuo teka apkrova, yra neizoliuotas nuo šalia esančio laidininko, turinčio skirtingą potencialą. Plūduriuojantis išlydis yra kelių tipų: iš metalo į metalą ir iš metalo į izoliaciją;
5. Dalelių išlydis (angl. particle discharge) – atsiranda tepalu izoliuotuose transformatoriuose ir SF<sub>6</sub> dujose. Šis išlydis įvyksta, kai laidžios dalelės yra paliekamos izoliacijos sistemoje, tai leidžia išlydžiui persokti iš dalelės į dalelę. Norint išvengti dalelių išlydžio rekomenduojama apdoroti ir išvalyti tepalą ar SF<sub>6</sub> dujas nuo laidžių dalelių.

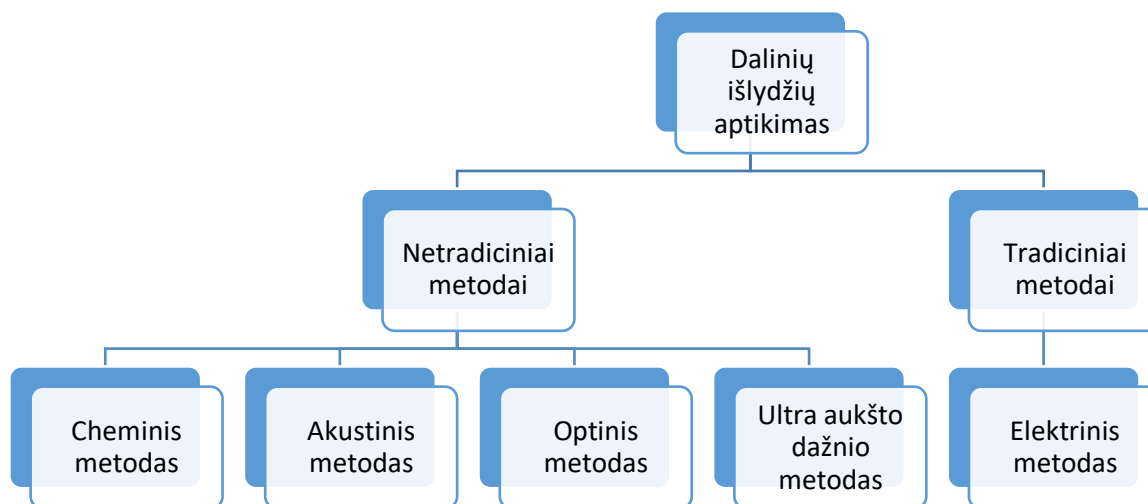
Dalinio išlydžio metu vyksta įvairūs cheminiai ir fizikiniai pokyčiai bei spinduliuojamas triukšmas, kuris identifikuoja apie dalinio išlydžio atsiradimą. Dalinio išlydžio metu išskiriamų produktų rūšys [4]:

1. Šviesos tarša – kartais matomas melsvai violetinis švytėjimas;
2. Šiluminė – infraraudonoji spinduliuotė;

3. Dujinė – ozonas, azoto oksidas ir kitos dujos;
4. Akustinė – girdimas ir negirdamas ultragarsas;
5. Elektromagnetinė – sukeliamas ultra aukštas dažnis 300 MHz – 1,5 Ghz ar indukuojami 3 MHz – 100 MHz ir 500 kHz – 500 MHz dažniai;
6. Cheminė – atsiranda žaliai arba žalsvai mėlynas nuodingas pigmentas (angl. verdigris), kuomet išskiriamos azoto oksido dujos drėgnoje aplinkoje ir susidaro azoto rūgštis.

### 1.1.2. Dalinio išlydžio aptikimo metodai

Atsiradus daliniam išlydžiui izoliacijoje situacija visada blogėja ir gali privesti prie izoliacijos pramušimo, kurio pasekmės gali kainuoti labai brangiai, todėl labai svarbu kuo anksčiau nustatyti dalinio išlydžio atsiradimą, jį lokalizuoti bei panaikinti. Dalinio išlydžio aptikimo metodai yra skirstomi į tradicinius ir netradicinius metodus [5]. Tradiciniai metodai, tai yra metodai, naudojantys įrangą, kuri fiksuoja dalinio išlydžio elektrinius impulsus ir juos registruoja. Netradiciniai metodai, tai metodai, kurie naudoja įvairius jutiklius aptikti daliniam išlydžiui, pavyzdžiui akustinius jutiklius, fiksuojančius garso bangas. Tam, kad aptikti tikslią dalinio išlydžio vietą, šie metodai yra kombinuojami. Dalinių išlydžių aptikimo metodai pateikti 1 paveikslėlyje.



1 pav. Dalinių išlydžių aptikimo metodai [5]

**Elektrinis aptikimo metodas (EE).** Prijungus įrangą yra registruojami impulsai, kurių santykinė vieta fazės cikle, forma bei signalo intensyvumas nusako dalinio išlydžio tipą ir izoliacijos degradacijos lygį. Elektrinis aptikimo metodas skirstomas į du tipus: tiesioginį ir radijo bangų dažnio matavimą. Tiesioginio metodo metu talpinė matavimo įranga prijungiama prie fazės, o radijo bangų dažnio matavimo metodu naudojamos antenos [5]. Šis metodas yra labai jautrus aptinkant dalinį išlydį, todėl dažniausiai yra pasirenkamas norint gyvai stebėti įrangos būklę. Tačiau didelio jautrumo problema yra ta, jog ypač trukdo aplinkiniai triukšmai, kurių veikiančioje pastotėje yra daug.

**Ultra aukšto dažnio aptikimo metodas (UHF).** Šio metodo pranašumas yra tas, jog jis turi didelį atsparumą triukšmams. Ultra aukšto dažnio aptikimo metodas daugiausiai buvo fokusuotas į dujinę izoliaciją turinčius įrenginius, tačiau pastaruoju metu tobulėjant technologijoms šį metodą galima pritaikyti ir skystą bei vientisą izoliaciją turintiems įrenginiams, tokiems kaip transformatoriai ar kabeliai [5]. Ultra aukšto dažnio bangos priklauso nuo įrenginio geometrijos, todėl kiekvienam įrenginiui ultra aukšto dažnio jutiklius reikia perkalibruoti [6].

**Optinis aptikimo metodas (OE).** Dalinio išlydžio optinis signalas yra aptinkamas optiniais sensoriais. Šis signalas yra priklausomas nuo įvairių faktorių, tokių kaip temperatūra, izoliacijos medžiaga, slėgis ir dalinio išlydžio stiprumas [5]. Optinis signalas yra fiksuojamas ribose nuo 430 THz iki 770 THz [7]. Optinis aptikimo metodas nėra plačiai naudojamas.

**Akustinis aptikimo metodas (AE).** Akustinis signalas, kurį sukelia mechaniniai virpesiai dalinio išlydžio metu gali būti aptikti pjezoelektriniais keitikliais, optinio pluošto akustiniais sensoriais, akcelerometrais, kondensatoriniu mikrafonu ar garso rezonanso jutikliais, kurie naudoja dažnius nuo 10 kHz iki 300 kHz [5]. Akustiniai jutikliai yra tvirtinami prie tiriamo objekto korpuso. Šio metodo pranašumas yra tas, jog jo neveikia elektromagnetinis triukšmas ir juo gana tiksliai galima lokalizuoti dalinio išlydžio vietą, tačiau jie turi būti labai jautrūs, nes akustiniai signalai tostant nuo šaltinio vietos greitai silpsta, taip pat akustinis signalas negali nustatyti dalinio išlydžio stiprumo [7].

**Dujų aptikimo metodas.** Vykstant daliniui išlydžiui kinta skysto dielektriko cheminė sudėtis ir gaminasi tam tikros dujos. Ištirpintų dujų analizė (DGA) yra metodas, kuris nustato dujų kompoziciją skystame dielektrike [7]. Vienos iš svarbiausių dujų, kurios indikuoja apie dalinio išlydžio atsiradimą, yra vandenilio dujos. Padidėjus vandenilio dujų koncentracijai skystame dielektrike galima daryti išvadą, jog vyksta dalinis išlydis. Šis metodas yra gana tikslus, bet jis buvo įmanomas tik atjungus įrenginį nuo elektros tinklo, o tai gali būti labai brangu ir nepraktiška. Tačiau tobulėjant technologijoms atsiranda naujų ištirpintų dujų analizės metodų, su kuriais galima dirbti prie veikiančių įrenginių.

**Kombinuotas aptikimo metodas.** Norint pagerinti dalinių išlydžių lokalizacijos tikslumą ir jų lygį yra kombinuojami keli aptikimo metodai. Dažniausiai akustinis aptikimo metodas yra kombinuojamas su kitais metodais, pavyzdžiui DGA-AE, UHF-AE, EE-AE, EE-AE-UHF, AE-OE [7].

## 1.2. Vainikinis išlydis

### 1.2.1. Bendrai apie vainikinį išlydį

Viena iš dalinio išlydžio rūšių yra vainikinis išlydis. Vainikinis išlydis yra elektros energijos iškrova, kuri įvyksta dujose aukšto elektrinio lauko terpėje, kai įtampa neviršija pramušimo kritinės įtampos [8]. Vainikinį išlydį sukelia stiprus elektrinis laukas, kurį indukuoja aukšta įtampa, kuomet elektrodas yra plono diametro arba turi aštrių kampų. Nevienalyčiame elektriniame lauke elektrinio lauko stipris yra stipriausias prie elektrodo, todėl vainikinis išlydis pirmiausia atsiranda šalia jo. Vainikinis išlydis susideda iš santykinai mažos galios iškrovų, jų metu srovė paprastai būna apie 1–100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  [9]. Vainikiniui išlydžiui atsirasti turi būti tenkinamos dvi pagrindinės sąlygos [9]:

1. Elektrinis laukas turi būti nevienalytis, o jo stipris didesnis nei vainikinio išlydžio atsiradimo elektrinio lauko.
2. Maksimalus elektrinis potencialo gradientas mažėja kuomet yra generuojamas vainikinis išlydis.

Melsvai violetinis švytėjimas matomas vainikinio išlydžio metu yra šalutinis efektas, kai laisvi elektronai rekombinuojasi su teigiamais jonais. Rekombinacijos proceso metu susidarius naujiems neutraliems atomams yra išskiriami fotonai, kuriuos žmonių akis mato kaip melsvai violetinį švytėjimą. Taip pat dėl jonizacijos proceso vainikinio išlydžio metu yra girdimas garsas – ūžimas.

Nors vainikinis išlydis – reiškinys, kuris atsiranda prie aukštos įtampos, tačiau jis buvo pastebėtas jau senovėje, kuomet dar buvo toli iki elektros energijos generatorių ir transformatorių išradimo, pavyzdžiui plaukiant buriniams laivams didelių audrų metu jūreiviai pastebėdavo, jog laivo stiebais švyti mėlyna spalva ir šis reiškinys buvo pramintas Švento Elmo ugnimi.

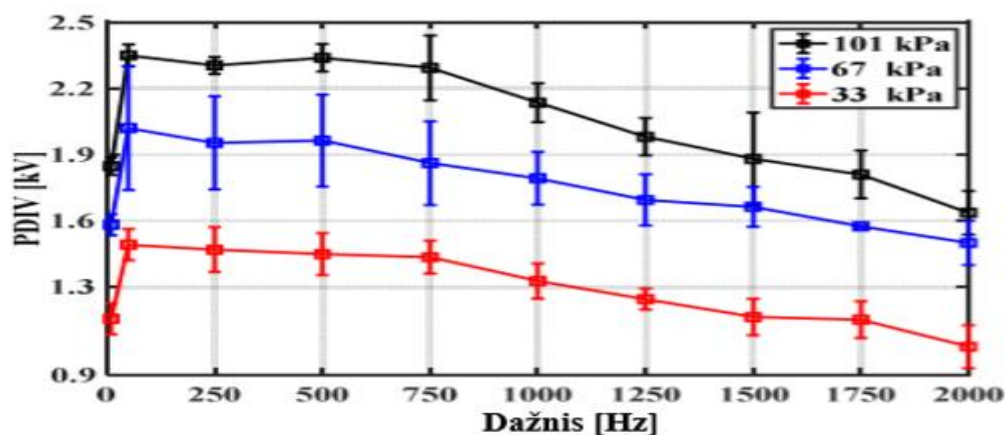
### 1.2.2. Vainikinio išlydžio keliamos problemos

Vainikinis išlydis kelia nemažai problemų elektros energetikos sektoriuje. Laiku nepastebėjus vainikinio išlydžio daromos žalos izoliacijai, tai gali brangiai kainuoti. Tačiau vainikinis išlydis kenkia ne tik izoliacijai, bet ir gamina kenksmingas dujas, o šviesos ir garso tarša gali kenkti gyvūnams. Vainikinio išlydžio keliamos problemos:

1. Energijos nuostoliai linijose;
2. Garso tarša;
3. Elektromagnetinė tarša;
4. Melsvai violetinis švytėjimas;
5. Dujinė tarša;
6. Poveikis izoliacijai.

### 1.2.3. Vainikinio išlydžio charakteristikų priklausomybės

Vainikinio išlydžio charakteristikos priklauso nuo oro slėgio ir įtampos dažnio. Pradinės dalinio išlydžio įtampos priklausomybė nuo dažnio ir oro slėgio pateikta 2 paveikslėlyje.



2 pav. Pradinės dalinio išlydžio įtampos (PDIV) priklausomybė nuo dažnio ir oro slėgio [10]

Pradinė dalinio išlydžio įtampa (PDIV) didėja didinant oro slėgį. Žemo dažnio ribose iki 50 Hz didinant dažnį PDIV didėja, tačiau prie didesnio dažnio nuo 50 Hz iki 2 kHz PDIV mažėja [10].

Vainikinis išlydis yra intensyviausias elektros sistemos vietose, kuriose yra aštrių kampų, pavyzdžiui, kai yra pažeistas laidininkas. Vainikinio išlydžio charakteristikų priklausomybė nuo skirtingų tipų elektrodų tiriama straipsnyje „Corona Discharges Under Various Types of Electrodes“ [11]. Šiame straipsnyje aprašomas atliktas tyrimas tekant 50 Hz kintamajai elektros srovei su trimis skirtingais nerūdijančio plieno elektrodais: aštriu, plokščiu ir sfera. Elektrodus iki įžemintos plokštės skyrė 4 cm ir buvo keliamas įtampa nuo 14 kV iki 43 kV. Analizuotas įvykusių dalinių išlydžių skaičius per pirmuosius 500 ciklų, didžiausias įkrovos dydis ir pradinė vainikinio išlydžio įtampa. Šie duomenys pateikti 1 lentelėje.

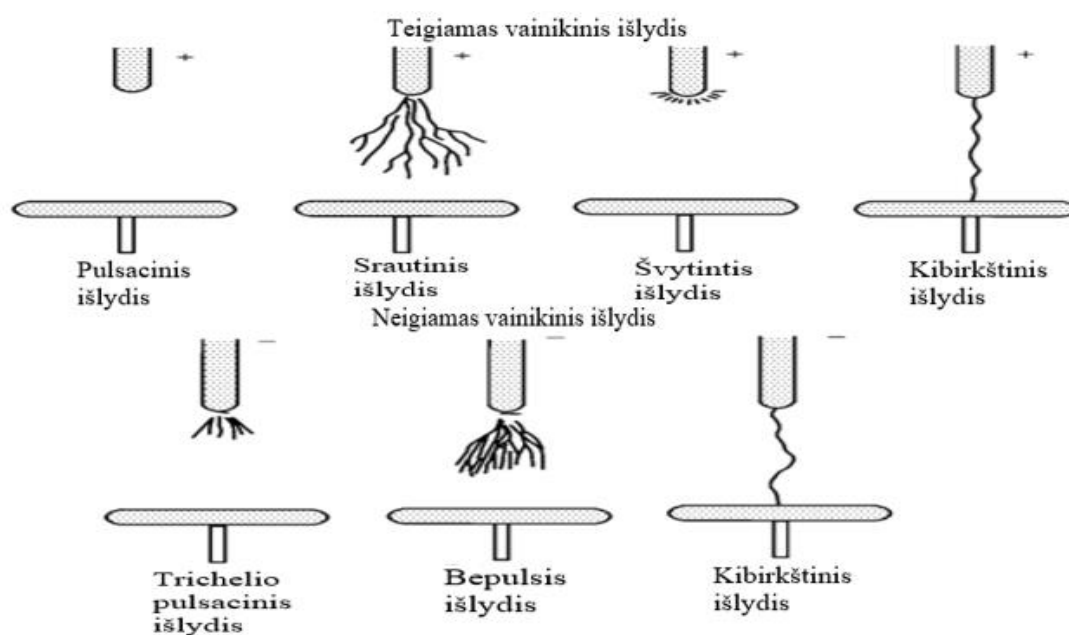
**1 lentelė.** Išlydžių charakteristikos esant skirtingų elektrodų tipams [11]

Elektrodo tipas	Plokščias	Sfera	Smailus
Dalinių išlydžių skaičius	16414	22916	14566
Pradinė vainikinio išlydžio įtampa, kV	20,2	42	13,5
Didžiausias įkrovos dydis, pC	250	32	500

Taip pat buvo atlika kompiuterinė simuliacija ir nustatytas elektrinio lauko pasiskirstymas esant skirtingiems elektrodų tipams ir buvo pastebėta, jog didžiausia elektrinio lauko vertė yra prie smailaus elektrodo galiuko, o mažiausia prie sferos. Didžiausias įkrovos dydis yra mažiausias prie sferos elektrodo, taip yra todėl, nes pasiekiamas mažiausias elektrinis laukas. Kuo didesnis elektrinio lauko dydis, tuo didesnis ir maksimalios įkrovos dydis, kadangi vyksta daugiau jonizacijos procesų. Taip pat, kuo didesnis elektrinis laukas, tuo mažesnės įtampos reikia, kad atsirastų vainikinis išlydis, dėl šios priežasties vainikinis išlydis ant smailaus elektrodo atsiranda prie mažiausios įtampos, lyginant su plokščiu ir sferos elektrodu. Didžiausias dalinių išlydžių skaičius buvo prie sferos elektrodo, kadangi jame buvo leidžiama didžiausia įtampa, o kuo didesnė įtampa, tuo daugiau gali įvykti dalinių išlydžių dėl didesnio elektrinio lauko supančio elektrodą [11].

#### 1.2.4. Vainikinio išlydžio skirstymas

Vainikinis išlydis gali būti kelių rūšių priklausomai nuo elektrodų geometrijos ir elektrinio lauko poliškumo. Vainikinis išlydis šalia katodo yra vadinamas neigiamu vainikiniu išlydžiu, o šalia anodo – teigiamu vainikiniu išlydžiu. Teigiamas ir neigiamas vainikinis išlydis yra panašūs, tačiau turi keletą esminių skirtumų. Teigiamas vainikinis išlydis turi daug mažesnę laisvųjų elektronų tankį negu neigiamas vainikinis išlydis, tačiau teigiamame išlydyje elektronai yra labiau sukonzentruoti ir juose yra daugiau energijos. Neigiamas vainikinis išlydis yra didesnis už teigiamą, kadangi neigiamame išlydyje laisvųjų elektronų yra daugiau ir jie pasiskirstę didesniame plote [9]. Teigiamo ir neigiamo vainikinio išlydžio stadijos esant „smailus elektrodas šalia plokštumos“ elektrodų konfigūracijai pavaizduoti 3 paveikslėlyje.



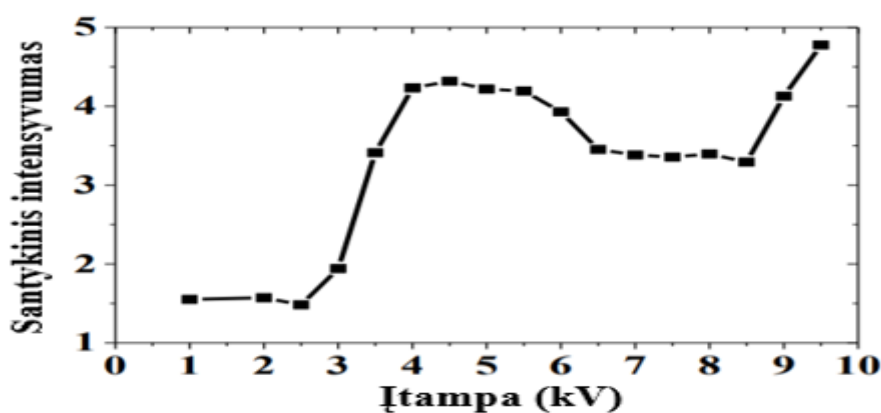
**3 pav.** Neigiamo ir teigiamo vainikinio išlydžio stadijos [9]

Prie kintamosios įtampos teigiami ir neigiami vainikiniai išlydžiai esant „smailus elektrodas šalia plokštumos“ elektrodų konfigūracijai prie kiekvieno elektrodo susidaro kas pusę ciklo, o esant abiem smailiems elektrodams jų poliariškumas keičiasi kas pusę ciklo [9].

Vainikinis išlydis pagal jo generavimo metodą yra skirstomas į dvi grupes [12]:

1. Aktyvus – kai smailus laidininkas prijungtas prie aukštos įtampos potencialo;
2. Pasyvus – kai smailus laidininkas yra įžeminamas ir patalpinamas į elektrinį lauką.

Didėjant kintamosios įtampos vainikiniam išlydžiui tuo pačiu didėja ir laisvųjų elektronų energija, kuri keičia šviesos spinduliuotės intensyvumą ir kolorimetriją. Kolorimetrijos informacija susideda iš trijų pagrindinių spalvų komponentų: raudonos, žalios ir mėlynos. Kintant šių spalvų komponentų intensyvumui ir koreliuojant jį su užsiduota įtampa galima spręsti apie vainikinio išlydžio stadiją [13]. Santykinio intensyvumo ir įtampos kitimas pateiktas 4 paveikslėlyje:



4 pav. Santykinio intensyvumo priklausomybė nuo įtampos [13]

Santykinio intensyvumo ir įtampos kreivė gali būti suskirstyta į keturias pakopas: pakilimo, nusileidimo, plokščia ir staigiai kylanti. Taigi, kintamosios srovės vainikinis išlydis „smailus elektrodas šalia plokštumos“ elektrodų konfigūracijoje pagal skaitmeninių nuotraukų kolorimetriją gali būti suskirstytas į keturias stadijas [13]:

1. Vystymosi stadija;
2. Slopimo stadija;
3. Stabili stadija;
4. Stadija prieš pramušimą.

### 1.2.5. Vainikinio išlydžio panaudojimas

Vainikinį išlydį galima panaudoti įvairiuose promoniniuose ir komerciniuose procesuose. Elektrostatinis vainikinio išlydžio panaudojimas [8]:

1. Jonų šaltiniai: statinės elektros pašalinimas, dezinfekavimas;
2. Dalelių transportavimas: nusodintuvai, elektrostatinis dažymas, elektrostatinis atskyrimas;
3. Izoliacinių medžiagų įkrovimas: teleskopija, kserografija; elektrostatinės įtampos šaltiniai, optinė komutacija.



Vainikinio išlydžio laidumo panaudojimas [8]:

1. Vientisų dielektrikų laidumo tyrimai ir testavimas;
2. Dujų analizė: taršos detektoriai, ugnies ir dūmų detektoriai, oro srauto matuokliai;
3. Apsauga nuo žaibo;
4. Dujinė izoliacija;
5. Jonizuojančių dalelių detektoriai (branduolinė fizika).

Elektrostatiniuose nusodintuvuose oro valymui naudojamas vainikinis išlydis. Taršios oro dalelės pratekėjusios pro aukštos įtampos zoną, kurioje vyksta vainikinis išlydis, įgauna krūvį ir prikimba prie įžeminto elektrodo.

Vainikinis išlydis naudojamas ir daugumoje šiuolaikinių kopijavimo aparatų, juose naudojama technologija – kserografija, tai procesas, kuomet naudojami elektrostatiniai krūviai ant šviesai jautraus fotoreceptoriaus, kad būtų pritraukti dažų milteliai ir suformuojamas spaudzinamas vaizdas.

Vienas iš labiausiai paplitusių ozono gamybos būdų yra vainikinio išlydžio metodas. Vainikinio išlydžio ozono generatoriai yra ekonomiškai efektyvūs, jiems gaminti ozono dujas nereikia papildomų produktų, o užtenka tik vainikinio išlydžio ir aplinkos oro. Taip pat vainikinis išlydis naudojamas oro jonizatoriuose, azoto lazeriuose, baseino vandens dezinfekavime, statinio krūvio neutralizavime, joninio vėjo įrenginiuose, dujų mėginių jonizavime atliekant masės spektrometriją ar jonų judrumo spektrometriją.

#### 1.2.6. Vainikinio išlydžio apribojimas

Vainikinio išlydžio žiedai (angl. corona rings) yra skirti siekiant išvengti vainikinio išlydžio, kuris atsiranda aukštos įtampos linijose, jungtuvuose ir kituose įrenginiuose. Dažniausiai jie yra spurgos formos ir pagaminti iš metalo. Vainikinio išlydžio žiedai yra sujungti su laidininku tose vietose, kuriose yra didžiausia tikimybė atsirasti vainikiniam išlydžiui ir jis galėtų padaryti didžiausią žalą, tai yra dažniausiai prie izoliatorių. Dėl savo apvalios formos vainikinio išlydžio žiedai paskirsto elektrinį lauką tolygiau erdvėje ir sumažina elektrinį stresą izoliatoriams iki normalios vertės. Vainikinio išlydžio žiedo įtaka potencialo pasiskirstymui tarp izoliatorių pateikta 2 lentelėje:

2 lentelė. Vainikinio išlydžio žiedo įtaka potencialo pasiskirstymui tarp izoliatorių [14]

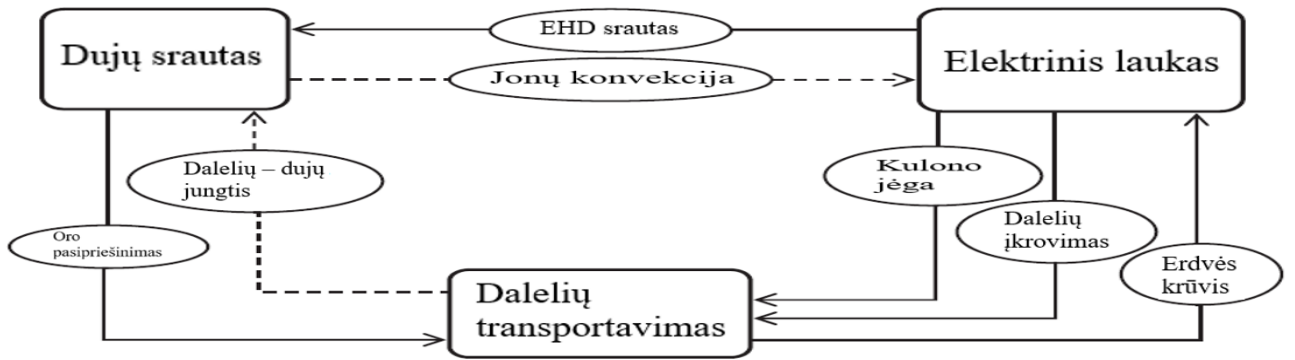
Izoliatoriaus eilė	Be vainikinio išlydžio žiedo, %	Su vainikinio išlydžio žiedu, %	
		R= 15 cm	R= 21 cm
1	4,11	6,63	7,41
2	3,58	5,54	6,11
3	3,60	5,33	5,78
4	4,02	5,70	6,06
5	4,90	6,60	6,86
6	6,30	8,08	8,23
7	8,57	10,34	10,21
8	12,17	13,51	12,85
9	18,49	17,40	15,88
10	34,26	21,13	20,62

Iš 2 lentelės galime matyti, jog linijos įtampa pasiskirsto tarp izoliatorių nevienodai. Izoliatoriai arčiausiai įtampos linijos patiria didžiausią elektrinį stresą, todėl yra didesnė izoliatoriaus gedimo tikimybė. Matome, jog su vainikinio išlydžio žiedu elektros potencialas pasiskirsto tolygiau. Paskutinių eilių izoliatoriams potencialo daroma žala sumažinama ir paskirstoma tolygiau likusioms izoliatorių eilėms. Taip pat, galima pastebėti, jog kuo didesnis vainikinio išlydžio žiedo diametras, tuo mažesnis potencialo paskirstymas ant paskutinės eilės izoliatoriaus, tačiau su diametro didėjimu, didėja ir apkrova aukštesnių eilių izoliatoriams [14].

### 1.3. Vainikinio išlydžio modeliavimas

Elektrostatiniuose nusodintuvuose lašeliai bei dalelės yra įkraunamos vainikinio išlydžio ir dėl elektrinių jėgų nukreipiamos į žemintas surinkimo plokštes. Dideles daleles, pavyzdžiui didesnės nei 1 mm, elektriniai nusodintuvai surenka gana lengvai. Tokių dalelių transportavimo, kuriose dominuoja elektrinės jėgos, surinkimo našumas yra labai didelis, o joninio vėjo ir srauto modelio įtaka nėra labai svarbi. Labai mažų, mažesnių už mikroną dalelių surinkimas yra sudėtingas procesas ir daugelis iš jų lieka nenusodintos. Dėl pavojaus žmogaus sveikatai į šias daleles yra kreipiamas vis didesnis dėmesys. Norint pagerinti elektrostatinių nusodintuvų veikimą reikia nuodugniai suprasti vainikinio išlydžio sukeltus reiškinius [15]. Pagrindinės jėgos, kurios veikia daleles, yra elektrinės, tačiau dujų srautas taip pat veikia dalelių trajektoriją, o antrinis elektrohodinaminis srautas modifikuoja šias trajektorijas ir dar labiau apsunkina dalelių judėjimo prognozavimą [16].

Elektrostatiniuose nusodintuvuose susideda trys pagrindiniai reiškiniai: jonizuotas elektrinis laukas, dujų srautas ir dalelių transportas. Visi šie reiškiniai yra tarpusavyje susieti ir jų tarpusavio sąryšio stiprumas skiriasi. Kai kurios tarpusavio sąsajos yra silpnos, todėl modeliuojant jas galima ignoruoti. Viena iš jungčių, į kurią galima nekreipti dėmesio, yra dalelių – dujų sąsaja (angl. particle – gas coupling). Ši mechaninė sąsaja tarp dalelių ir dujų mažoms dalelių koncentracijoms gali būti ignoruota nesukeliant didelės paklaidos. Vis dėlto yra netiesioginė jungtis tarp dalelių ir dujų: dalelės įgauna krūvį, tuomet šios krūvį turinčios dalelės sąveikauja su elektriniu lauku ir sukuria poveikį, kuris daro įtaką dalelių judėjimo modeliui. Kita sąveika, kurios dažniausiai nepaisoma, elektrostatiniuose nusodintuvuose yra krūvio konvekcija (angl. charge convection). Vainikinio išlydžio sukurtas elektrohodinaminis (EHD) srautas turi gana didelę įtaką dalelių tekėjimo modeliui, o atvirkštinės sąsajos, tai yra krūvio konvekcijos įtaka yra daug silpnesnė. Netoli vainikinio išlydžio vietos yra stiprus elektrinis laukas, todėl jonų greitis yra daug didesnis už dujų greitį ir krūvio konvekcija gali būti nepaisoma. Tačiau, elektrostatiniuose nusodintuvuose yra vietų, kurios gana nutolusios nuo vainikinio išlydžio ir yra arti žeminto elektrodo, šiose vietose elektrinis laukas yra daug silpnesnis, o jonų tėkmės greitis yra panašus su dujų, bet niekas dar nepatvirtino, jog tai galėtų turėti poveikį dalelių nusodinimui [15]. Elektrostatinių nusodintuvų pagrindinių reiškinų tarpusavio sąsajos pateiktos 5 paveikslėlyje.



5 pav. Ryšys tarp skirtingų reiškinų elektrostatiuose nusodintuvuose [15]

Daugiausia kompiuterinių resursų sunaudoja procesai, vykstantys šalia vainikinių išlydžių sukeliančio elektrodo, todėl dažniausiai pasirenkama modeliuoti tik vieną vainikinių išlydžių sukeltą elektrodą. Tačiau, begalinio vainikinio išlydžio elektrodų atvejis yra dar paprastesnis nei vieno elektrodo, kadangi problema tampa periodiškai pasikartojanti ir galima analizuoti tik vieną elektrodą su simetrinėmis ribinėmis sąlygomis [15]. Labiausiai paplitę vainikinio išlydžio modeliai yra 2 – D, kadangi 3 – D modeliai naudoja daug didesnius kompiuterinius resursus.

Dėl paprastumo dažniausiai pasitaikanti vainikinio išlydžio elektrodo geometrija yra cilindro formos laidininkas. Įžeminimo elektrodo geometrija dažniausiai būna standartinė, tai yra plokščia. Jo formos detalės nėra tokios svarbios ir ją lengvai galima pakeisti nesugadinant viso modelio [15].

### 1.3.1. Skaitinis modeliavimas

Elektrinį potencialą  $V$  nusako Puasono lygtis:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}; \quad (1.3.1)$$

čia  $\rho$  – erdvės krūvio tankis,  $C/m^3$ ;

$\epsilon_0$  – vakuumo dielektrinė skvarba,  $F/m$ ;

$\epsilon_r$  – santykinė dielektrinė skvarba;

$V$  – elektrinis potencialas,  $V$ .

Vakuomo dielektrinė skvarba  $\epsilon_0$  yra lygi  $8,85 \cdot 10^{-12} F/m$ . Santykinė dielektrinė skvarba  $\epsilon_r$  ore yra lygi 1,00054, tačiau formulėje mes naudosime suapvalintą dydį iki 1.

Elektrinis laukas  $\vec{E}$  yra potencialo gradientas ir nusakomas formule:

$$\vec{E} = -\nabla V; \quad (1.3.2)$$

čia  $\vec{E}$  – elektrinio lauko stipris,  $V/m$ .

Elektros srovės tankį  $\vec{J}$  galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$\vec{J} = \rho(\mu \vec{E} + \vec{u}) - D \nabla \rho; \quad (1.3.3)$$

čia  $\mu$  – jonų judris,  $m^2/Vs$ ;

$D$  – jonų difuzijos koeficientas,  $m^2/s$ ;

$\vec{J}$  – elektros srovės tankis,  $A/m^2$ ;

$\vec{u}$  – oro srauto greitis, m/s.

Jonų difuzijos koeficientas  $D$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D = \frac{\kappa_B T}{e_0}; \quad (1.3.4)$$

čia  $\kappa_B$  – Bolcmano konstanta, J/K;

$T$  – absoliuti temperatūra, K;

$e_0$  – elektrono krūvis, C.

Jonų judris  $\mu$  keičiasi esant skirtingui slėgiui. Prie 760 mmHg atmosferos slėgio ir kambario temperatūros jonų judris gali būti imamas kaip konstanta  $\mu = (1,8 \sim 2,3) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  [17]. Prie kitokio slėgio jonų judris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\mu_p = \frac{\mu}{p_{atm}}; \quad (1.3.5)$$

čia  $p_{atm}$  – atmosferos slėgio koeficientas. Jis lygus matuojamo slėgio ir atmosferos slėgio santykiui.

Konvekcinis elementas  $\vec{u}$  elektros srovės tankio  $\vec{j}$  formulėje gali būti nepaisytas [16], todėl  $\vec{j}$  apskaičiuojamas:

$$\vec{j} = \rho \mu \vec{E} - D \nabla \rho; \quad (1.3.6)$$

Kai sistema yra pastovios būsenos elektros srovės tankio  $\vec{j}$  laiko išvestinė yra lygi nuliui, tuomet:

$$\nabla \vec{j} = 0; \quad (1.3.7)$$

$$\nabla (\rho \mu \vec{E} - D \nabla \rho) = 0; \quad (1.3.8)$$

Vainikinio išlydžio elektrodui elektrinio lauko maksimaliai ribai  $E_p$  nustatyti naudojama Peek'o formulė:

$$E_p = E_0 \cdot \delta \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r_0}} \right); \quad (1.3.9)$$

čia  $r_0$  – vainikinio išlydžio elektrodo spindulys, cm;

$E_p$  – vainikinio išlydžio elektrodo elektrinio lauko maksimali riba, V/m;

$E_0$  – oro tarpo pramušimo elektrinis potencialas, V/m;

$\delta$  – oro tankio koeficientas.

Oro tarpo pramušimo elektrinis potencialas  $E_0$  yra pastovus dydis ir yra apie 30 kV/cm. Zona šalia vainikinio išlydžio elektrodo, kurioje vyksta aktyvus jonizacijos procesas, yra iki  $0,301 \sqrt{\delta \cdot r_0}$  cm nuo elektrodo. Kuomet oro tankio koeficientas  $\delta$  mažėja, ši zona didėja, kadangi molekulės nutolsta viena nuo kitos [18]. Oro tankio koeficientas  $\delta$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\delta = \frac{3,92 \cdot b}{273 + t}; \quad (1.3.10)$$

čia  $b$  – atmosferos slėgis, cmHg;  
 $t$  – oro temperatūra, °C.

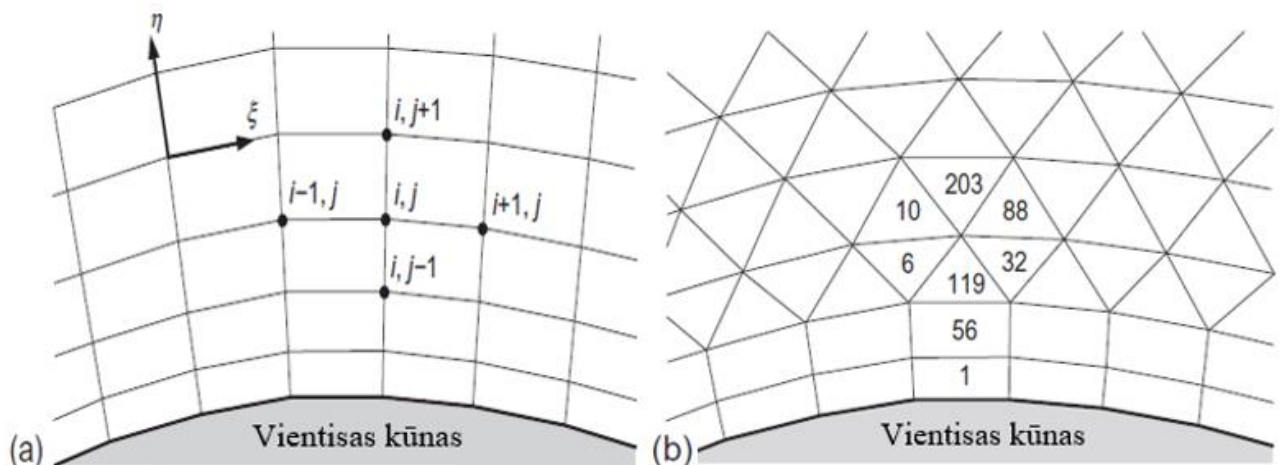
Krūvio vientisumo lygtis, kurios mums reikės modeliuojant krūvio tankį erdvėje:

$$\nabla \rho \cdot \nabla V = \frac{\rho^2}{\epsilon_r \epsilon_0}. \quad (1.3.11)$$

### 1.3.2. Modeliavimo metodai

Yra sukurta daug įvairių modeliavimo metodikų. Jų rūšiavimui pagrindinius metodus galime suskirstyti į tris erdvės aprašymo kategorijas: baigtinio skirtumo, baigtinio tūrio ir baigtinių elementų schemas. Šie metodai remiasi tam tikru erdvės tinkleliu (angl. grid), kad būtų aprašytos pagrindinės (angl. governing) lygtys. Egzistuoja dviejų skirtingų tipų tinkleliai:

1. **Struktūrizuoti tinkleliai.** Tai toks tinkelis, kuriame naudojama dekartio kordinačių sistema. Kiekvienas tinklelio taškas yra pažymėtas  $i, j$ , ir  $k$  indeksais. Šie indeksai žymi taškų buvimo vietą dekartio kordinačių sistemoje, kuomet koordinatės yra žymimos  $x_{i,j,k}$ ,  $y_{i,j,k}$ , ir  $z_{i,j,k}$ . Tinklelis 2 – D modelyje yra sudarytas iš keturkampių, 3 – D modelyje iš šešiakampių. Pagrindinis struktūrizuotų tinklelių pranašumas, jog indeksai  $i, j, k$  leidžia labai greitai ir lengvai surasti tinklelio mazgo kaimynus, reikia tiesiog pridėti arba atimti sveikąją vertę iš atitinkamo indekso. Ši savybė labai supaprastina gradientų ir srautų analizę bei ribinių sąlygų vertinimą. Šio tipo trūkumas, jog sunku sugeneruoti tinklelį sudėtingoms geometrijoms [19].
2. **Nestruktūrizuoti tinkeliai.** Tinklelio elementai ir taškai neturi įprasto skirstymo, greta esantys elementai negali būti tiesiogiai identifikuoti pagal jų indeksą, pavyzdžiui kaip matome 6 paveikslėlio (b) dalyje, 88 elementas yra šalia 203 elemento. Tinklelis 2 – D modelyje yra sudarytas iš keturkampių ir trikampių, o 3 – D modelyje iš šešiakampių, tetraedų, prizmių ir piramidžių. Šio tipo pagrindinis pranašumas, jog jis turi didelį lankstumą sprendžiant sudėtingas geometrijas. Nepriklausomai nuo geometrijos sudėtingumo nestruktūrizuotą tinklelį galima sugeneruoti automatiškai. Dar vienas pranašumas, jog laikas reikalingas sukurti tinklelį sudėtingam modeliui yra žymiai trumpesnis nei su struktūrizuotu tinkleliu. Taip pat, nestruktūrizuotas tinkelis gali būti lengvai tobulinamas ir ribojimas, tačiau kompiuterio atminties reikalavimai yra didesni nei struktūrizuoto tinklelio [19].



6 pav. Tinklelio tipai: (a) struktūrizuotas, (b) nestruktūrizuotas [19]

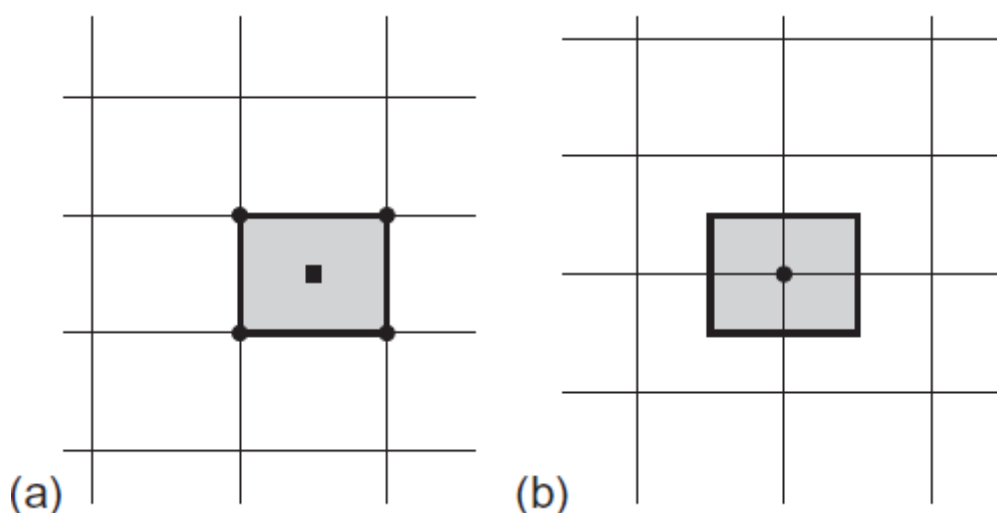
Tinklelio tipo naudojimas priklauso nuo metodo, kuriuo aprašinėsime pagrindines lygtis, ir geometrijos sudėtingumo.

**Baigtinių skirtumų metodas (BSM)** (angl. finite difference method). Pirmą kartą šį metodą panaudojo Euleris apie 1768 metus. Baigtinių skirtumų metodas buvo vienas iš pirmųjų taikytų skaitiniam diferencialinių lygčių sprendimui. Šis metodas yra taikomas teisiogiai diferencialinės formos pagrindinėms lygtims. Dalinės išvestinės išreiškiamos skirtumų formulėmis tinklelyje, o algebrinių lygčių sistema yra gaunama įrašius jų reikšmes į pradinę diferencialinę lygtį [20].

BSM privalumai ir trūkumai. Baigtinių skirtumų metodikos vienas iš pranašumų yra jos paprastumas. Su BSM galima lengvai išgauti aukštą erdvės modelio aprašymo tikslumą. Šio modelio trūkumas yra tas, jog jam reikia struktūrizuoto erdvės tinklelio, todėl BSM taikymo sritis yra apribota ir šis metodas tiesiogiai taikomas tik gana paprastoms geometrijoms. Dar vienas trūkumas, jog BSM negalima tiesiogiai pritaikyti objekto fizinėje erdvėje, būtina pagrindines lygtis transformuoti į dekartio koordinatų sistemą [19] Taip pat, būtina tinkamai parinkti tinklelį, nes nuo jo labai priklauso sprendinio tikslumas [20].

**Baigtinių tūrių metodas (BTM)** (angl. finite volume method). Šiame metode yra tiesiogiai panaudojamas tvermės dėsnis (angl. conservation law), tai yra integralinės Navier – Stoke / Euler lygtys. Pagrindinė metodo idėja, jog skaičiavimo sritis yra padalinama į baigtinį skaičių valdymo tūrių, tuomet sprendžiamos diferencialinės lygtys kiekviename valdymo tūryje ir sudaroma lygčių sistema. Erdvės aprašymo tikslumas priklauso nuo schemos, pagal kurią yra vertinami srautai. Galima išskirti dvi pagrindines tūrio valdymo schemas [19]:

1. Į elementą orientuota schema. Šioje schemoje srauto kiekiai kaupiami tinklelio elementų centroiduose. Valdymo tūriai yra identiški tinklelio elementams.
2. Į elemento mazgą orientuota schema. Šioje schemoje tūrio kintamieji yra saugojami tinklelio mazguose. Valdymo tūrio centras yra tinklelio mazge. Šis metodas dar skirstomas į sutampančius (angl. overlapping) valdymo tūrius ir dvigubo valdymo tūrius.



**7 pav.** Tūrio valdymo schemas: (a) Orientuota į elementą, (b) Orientuota į mazgą (dvigubo valdymo) [19]

Lyginant šias dvi tūrio valdymo schemas galima teigti, jog šios schemas aprašant stacionarius laukus yra panašios. Pagrindiniai skirtumai išryškėja aprašant dinaminis laukus ir objektų ribas. Abiem

atvejais į elementą orientuota schema turi pranašumą prieš į mazgą orientuotą schemą ir pasižymi daug paprastesniu sprendimu.

BTM privalumai ir trūkumai. Pagrindinis baigtinių tūrių metodo privalumas, jog erdvės aprašyme jį galima pritaikyti tiesiogiai fizinėje erdvėje, taip pat nėra jokių problemų transformuojant į dekartą koordinatų sistemą. BTM dar vienas privalumas – jis yra labai lankstus ir gali būti pritaikytas struktūrizuotuose ir nestructūrizuotuose tinkleliuose, todėl šis metodas gali būt taikomas sudėtingoms geometrijoms [19].

**Baigtinių elementų metodas (BEM)** (angl. finite element method). Pirmą kartą šį metodą panaudojo Tuneris 1956 metais, tačiau tik apie 1990 metus baigtinių elementų metodas įgijo populiarumą sprendžiant Navier – Stoke / Euler lygtis. Šiame metode erdvė pavaizduojama nestructūrizuotu tinkleliu baigtiniu elementų skaičiumi. Visų elementų zonose diferencinės lygtys dalinėmis išvestinėmis yra apytikriai pakeičiamos į algebrinių lygčių sistemą. Šios elementų algebrinės lygtys yra jungiamos į vieną išsprendžiamą lygčių sistemą. Kiekvienas baigtinis elementas, kuomet yra aprašomas, laikomas maža sritimi su nežinomomis pradinėmis sąlygomis [20].

BEM privalumai ir trūkumai. Baigtinių elemento metodo pranašumas, jog jame naudojamos algebrinės formuluotės ir nestructūrizuoti tinkleliai, kurie abu leidžia lengviau apibrėžti sudėtingas geometrijas. Taip pat, BEM metodas turi labai didelį tikslumą esant sudėtingoms geometrijoms [19]. Vienas iš pagrindinių BEM privalumų, jog net esant stambiam tinkleliui gauti rezultatai leidžia bent jau apytiksliai įvertinti būsimą sprendinį [20].

**Kiti modeliavimo metodai.** Dažnai modeliavimo metodai yra kombinuojami. Tinkamai sukombinuoti metodai papildo vienas kito trūkumus taip padidindami modeliavimo tikslumą. Vienas iš populiariausių kombinavimo metodų yra charakteristikų metodas (CM) (angl. Method of Characteristics). CM dažniausiai kombinuojamas su BEM, BTM, BSM ir kraštinių elementų metodu (angl. boundary element method). Taip pat, elektros laukų modeliavime dažnai naudojama BEM ir krūvių simuliacijos metodo (angl. charge simulation method) kombinacija [15].

### **1.3.3. Modeliavimo programos.**

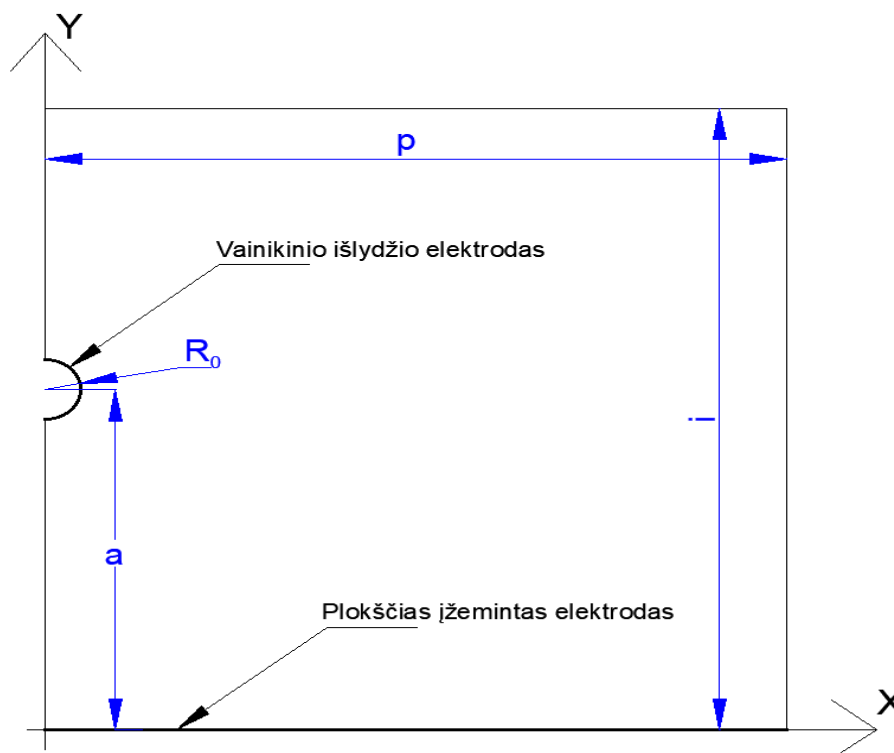
Elektrinio lauko modeliavime dėl savo privalumų dažniausiai naudojamas baigtinių elementų metodas. Populiariausios BEM paremtos programos yra ANSYS, ABAQUS ir COMSOL. Oro srauto tekėjimui modeliuoti naudojama programa FLUENT, kuri paremta baigtinių tūrių metodu.

## 2. Modeliavimas

Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio modeliavimui pasirinkta „Comsol Multiphysics“ programa, kuri turi daug privalumų. Šioje programoje yra naudojamas vienas iš populiariausių modeliavimo metodų, tai yra baiginių elementų metodas. Programoje galime susieti elektrostatiką, magnetinius laukus bei matematinės lygtis, kurių sąsaja leis tiksliau apibrėžti nuolatinės srovės vainikinį išlydį. Taip pat, skaičiavimo ir modeliavimo patogumui šią programą galima susieti su „Excel“ ir „MATLAB“ programomis. Su „Comsol Multiphysics“ programa yra gausu atliktų tyrimų ir straipsnių vainikinio išlydžio tema.

### 2.1. Modelio geometrija

Vainikinio išlydžio modeliavimui naudosime „laidas šalia plokštumos“ elektrodų geometriją. Modelio geometrija pavaizduota 8 paveikslėlyje. Modelis bus dviejų dimensijų, kuriame naudojama dekartio koordinatų sistema. Šioje sistemoje modeliuojamas potencialas, krūvio tankis ir elektrinis lauko stipris  $k_x$  ir  $k_y$  ašimis. Kadangi sistema yra simetriška  $y$  ašimi modeliuojama tik pusė vainikinio išlydžio elektrodo sistemos, tam, kad sutaupyti kompiuterinius resursus ir skaičiavimo laiką.



8 pav. Vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ modelio geometrija

Modeliuojama geometrija yra kvadrato formos, kurios matmenys  $p = i = 100 \text{ mm}$ , vainikinio išlydžio elektrodo aukštis virš plokščio įžeminto elektrodo yra  $a = 12 \text{ mm}$ , o vainikinio išlydžio elektrodo spindulys  $r_0$  yra  $0,05 \text{ mm}$ .

### 2.2. Matematinis skaičiavimų modelis

„Comsol Multiphysics“ programoje naudosime dalinių diferencialinių lygčių (angl. partial differential equation) sistemos paketą.



Skaičiavimo metodo esmė: prie vainikinio išlydžio elektrodo krūvio tankis yra vertinamas taip, jog elektrinio lauko vertė neviršytų nustatytos maksimalios vertės  $E_p$  pagal Peek'o formulę (1.3.9), kadangi padidinus krūvio tankį ties elektrodu sumažėja elektrinis laukas. Taip yra didinamas krūvio tankis iki susilygina apskaičiuoto ir modeliuojamo elektrinio lauko vertės. Krūvio tankis dirbtinai didinimas tik ties vainikinio išlydžio elektrodu, o elektrinio lauko ir krūvio tankio pasiskirstymas visoje erdvėje modeliuojamas lygčių sistema, kuri susideda iš Puasono ir krūvio vientisumo lygčių:

$$\begin{cases} \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}; \\ \nabla \rho \cdot \nabla V = \frac{\rho^2}{\epsilon_r \epsilon_0}. \end{cases} \quad (2.2.1)$$

Šios lygčių sistemos sprendimas priklauso nuo pasirinkto skaičiavimo metodo (BEM, BSM ar BTM), nuo kraštinių sąlygų ir priimtų pradinių prielaidų [21]. Pasirinktas modeliavimo metodas yra BEM dvimatėje erdvėje.

Elektrinį potencialą  $V$  erdvėje modeliuosime pagal Puasono lygtį (1.3.1). Ši lygtis dviejų dimensijų sistemoje atrodo taip:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}; \quad (2.2.2)$$

čia  $x, y$  – dekartio koordinatės.

Krūvio vientisumo lygtį (1.3.11) programoje taip pat turime perdaryti į dviejų dimensijų lygtį: Šią lygtį išskaidome į atskirus kintamuosius, tam, kad būtų paprasčiau suprastinti.

$$\nabla \rho = \frac{\partial \rho}{\partial x} a_x + \frac{\partial \rho}{\partial y} a_y; \quad (2.2.3)$$

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial x} a_x + \frac{\partial V}{\partial y} a_y; \quad (2.2.4)$$

$$\nabla V \cdot \nabla \rho = \left( \frac{\partial V}{\partial x} a_x + \frac{\partial V}{\partial y} a_y \right) \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} a_x + \frac{\partial \rho}{\partial y} a_y \right); \quad (2.2.5)$$

$$\nabla V \cdot \nabla \rho = \frac{\partial V}{\partial x} a_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} a_x + \frac{\partial V}{\partial y} a_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} a_x + \frac{\partial V}{\partial x} a_x \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} a_y + \frac{\partial V}{\partial y} a_y \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} a_y; \quad (2.2.6)$$

$$a_x \cdot a_y = 0; \quad (2.2.7)$$

$$a_x \cdot a_x = 1; \quad (2.2.7)$$

$$a_y \cdot a_y = 1; \quad (2.2.7)$$

$$\nabla V \cdot \nabla \rho = \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y}; \quad (2.2.8)$$

Atlikus suprastinimus gauname dviejų dimensijų krūvio vientisumo lygtį:

$$\frac{\partial V}{\partial x} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\rho^2}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (2.2.9)$$

Iš Puasono (2.2.2) ir krūvio vientisumo (2.2.9) lygčių gauname dviejų dimensijų sistemą, pagal kurią „Comsol Multiphysics“ programoje modeliuosime elektrinio lauko ir krūvio pasiskirstymą erdvėje:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0}; \\ \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\rho^2}{\varepsilon_r \varepsilon_0}. \end{cases} \quad (2.2.10)$$

Apskaičiuojame oro tankio koeficientą  $\delta$  (1.3.10), kurio mums reikės Peek'o formulėje. Priimame, jog modeliavimą atliekame standartinėmis eksperimentinėmis sąlygomis, tai yra prie 25 °C ir 1 atm. slėgio, kuris lygus 76 cmHg.

$$\delta = \frac{3,92 \cdot 76}{273 + 25} = 0,999 \approx 1; \quad (2.2.11)$$

Gavome, jog oro tankio koeficientas  $\delta$  standartinėmis eksperimentinėmis sąlygomis yra lygus 1, todėl į jį Peek'o formulėje galime neatsižvelgti. Apskaičiuojame maksimalią elektrinio lauko vertę pagal Peek'o formulę (1.3.9), kuomet  $r_0 = 0,05 \text{ mm}$ .

$$E_p = 3 \cdot 10^6 \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{0,005}} \right) = 1,577 \cdot 10^7 \text{ V/m}; \quad (2.2.12)$$

Elektrinis lauko stipris modelyje apskaičiuojamas pagal (1.3.2) formulę dvimatėje erdvėje:

$$E = \sqrt{\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}}; \quad (2.2.13)$$

Ilginį elektros srovės tankį apskaičiuojame kaip srovės tankio integralą per elektrodo paviršių:

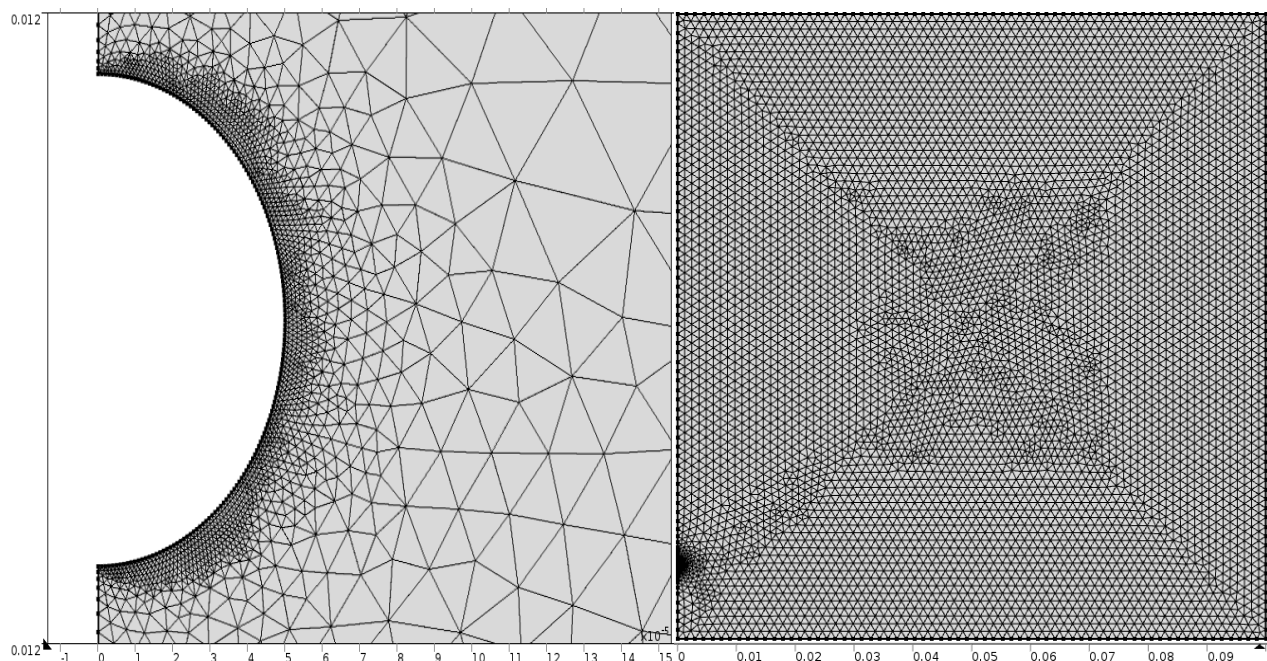
$$I = \int \mathbf{J} dS = \int \rho \mu \mathbf{E} dS; \quad (2.2.14)$$

čia  $I$  – ilginis elektros srovės tankis, A/m.

Šioje formulėje jonų judrį imame kaip konstantą  $\mu = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  neigiamam vainikiniam išlydžiui. Tačiau programoje skaičiuojant ilginį elektros srovės tankį reikia jį padauginti iš 2, kadangi mes modeliuojame tik pusę vainikinio išlydžio elektrodo paviršiaus, tuomet gauname formulę:

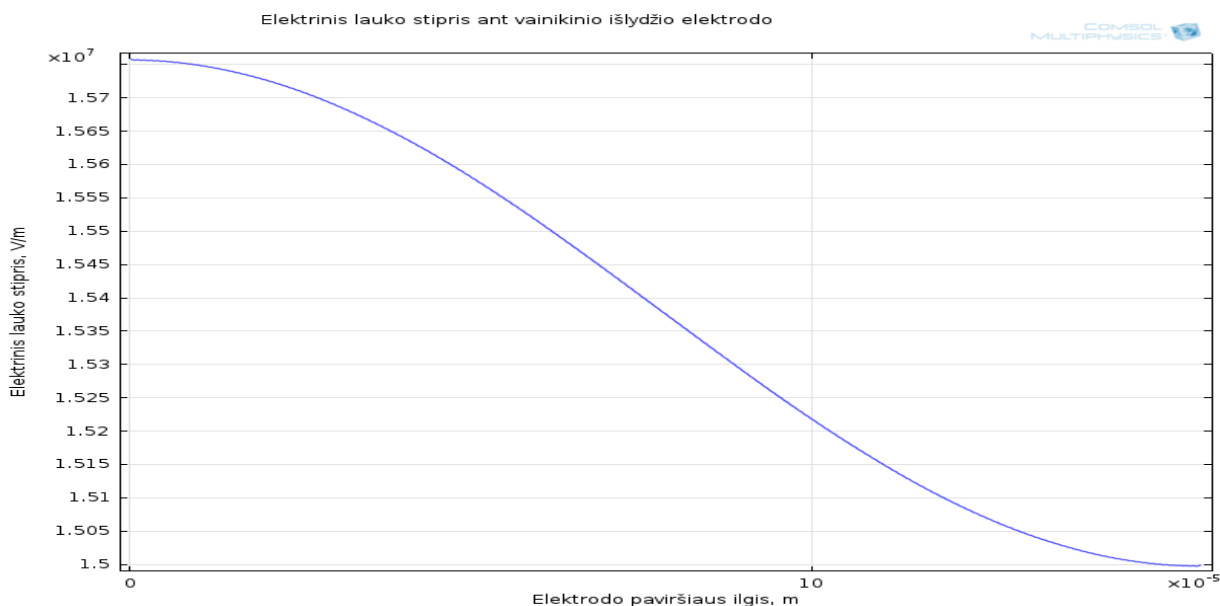
$$I = 2 \int \mathbf{J} dS; \quad (2.2.15)$$

Labai svarbu programoje tinkamai nustatyti kraštines sąlygas, kadangi tai stipriai įtakoja skaičiavimo rezultatus. Plokštumos elektrodas yra įžeminamas ir jo potencialas  $V$  lygus 0. Vainikinio išlydžio elektrodo potencialo  $V$  sąlygą pasirenkame pagal skaičiuojamą įtampą. Visų likusių kraštinių kraštines sąlygos yra atviros krūvio tankiui ir įtampai, t.y elektrinis srautas jų nekerta bei nedaro didelės įtakos skaičiavimams.



**9 pav.** Baigtinių elementų tinkelis geometrijoje: kairėje – priartintas vainikinio išlydžio elektrodas, dešinėje – visa geometrija.

Vienas iš svarbiausių veiksnių įtakančių rezultato tikslumą yra baigtinių elementų skaičiavimo tinkelis. Modelyje yra naudojamas laisvųjų trikampių struktūrizuotas tinkelis. Aplink vainikinio išlydžio elektrodą tinkelis turi būti ypatingai smulkus, kadangi ten kitimas erdvėje yra labai didelis. Modelyje aplink vainikinio išlydžio elektrodą tinkelio vieno elemento dydis yra  $10^{-6} m$ , o likusioje geometrijoje tinkelio vieno elemento dydis yra ne didesnis nei  $1,5 \cdot 10^{-3} m$ . Modelyje naudojamas baigtinių elementų tinkelis pavaizduodas 9 paveikslėlyje.



**10 pav.** Elektrinio lauko stipris ant vainikinio išlydžio elektrodo, kuomet  $V = 10 \text{ kV}$ ,  $\rho = 1,11 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}^3$ .

Vainikinio išlydžio elektrodo krūvio tankį pasirenkame tokį, jog stebint elektrinio lauko stiprio maksimalią vertę ji būtų arti pagal Peek'o formulę apskaičiuotos reikšmės  $E_p = 1,577 \cdot 10^7 \text{ V/m}$  (2.2.12), tačiau jos neviršytų. 10 paveikslėlyje pavaizduodas elektrinio lauko stiprio kitimas ant

vainikinio išlydžio elektrodo paviršiaus. Iš šio grafiko sprendžiame, kokį krūvio tankį parinkti prie užsiduotos įtampos. Krūvio tankiui didėjant elektrinis lauko stipris aplink vainikinio išlydžio elektrodą mažėja ir atvirkščiai, krūvio tankiui mažėjant – elektrinis lauko stipris didėja. 10 paveikslėlio grafikas pateiktas prie 10 kV įtampos ir  $1,11 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}^3$  krūvio tankio. Kaip matome krūvio tankis parinktas teisingai, kadangi elektrinio lauko stiprio vertė ant elektrodo yra mažesnė už apskaičiuotą (2.2.12) formulėje, tai yra  $1,576 \cdot 10^7 \text{ V/m} < E_p$ .

### 3. Modeliavimo rezultatai

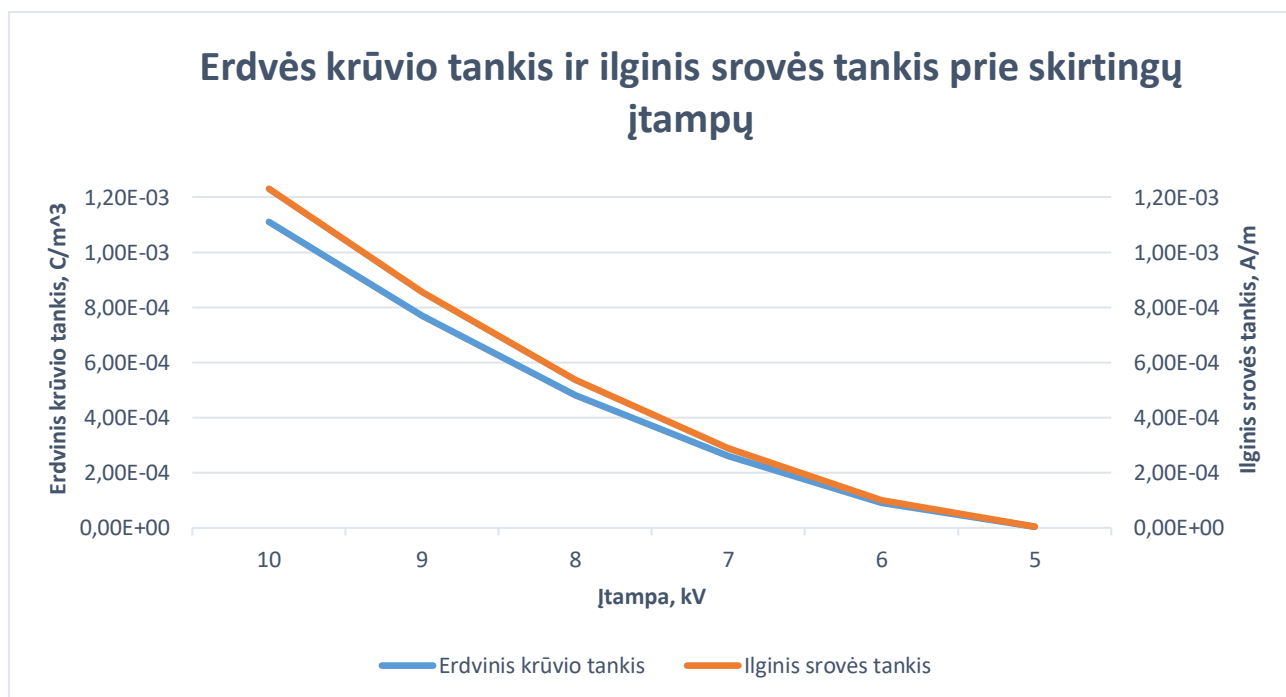
#### 3.1. Vainikinio išlydžio charakteristikų analizė esant 12 mm tarp elektrodų

„Comsol Multiphysics“ programoje nustatome kokiai įtampai esant tarp elektrodų prasideda vainikinis išlydis. Tai padarome krūvio tankį modelyje nustatydami lygų 0 ir didindami įtampą ties vainikinio išlydžio elektrodo paviršiumi stebime, kuomet elektrinio lauko stipris viršys apskaičiuotą vertę (2.2.12) pagal Peek'o formulę. Programos modelyje nustatėme, jog prie  $r_0 = 0,05 \text{ mm}$  laido, vainikinis išlydis atsiranda ties 4870 V įtampa.

Programos modelyje, kuomet vainikinio išlydžio elektrodo spindulys  $r_0$  yra 0,05 mm keičiame potencialą nuo 5 kV iki 10 kV. Tuomet modelyje nustatome krūvio tankį bei apskaičiuojame ilginį elektros srovės tankį. Vainikinio išlydžio modeliavimo rezultatai pateikti 3 lentelėje.

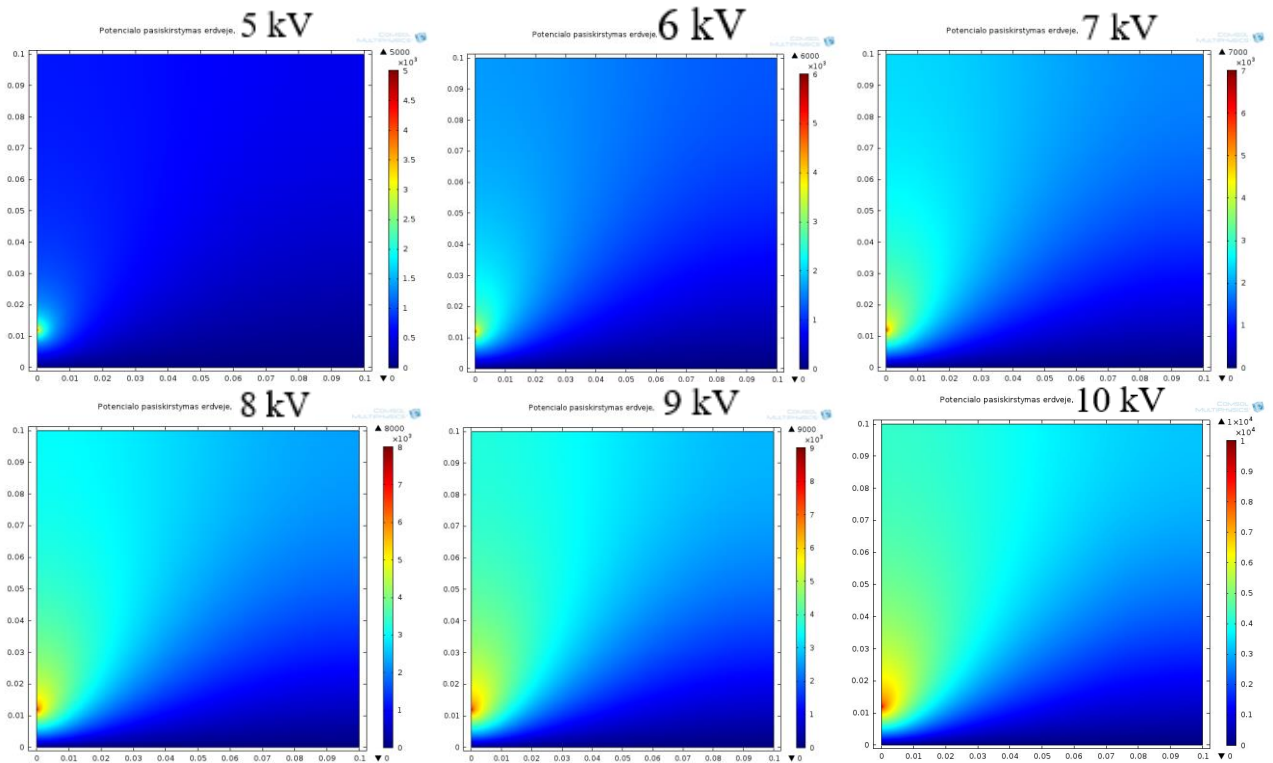
**3 lentelė.** Vainikinio išlydžio modeliavimo rezultatai esant 12 mm tarp elektrodų

Duomenys			Modeliavimo rezultatai	
$r_0$ , mm	$E_p$ , V/m	Potencialas, kV	Erdvinis krūvio tankis, C/m <sup>3</sup>	Ilginis srovės tankis, A/m
0,05	$1,58 \cdot 10^7$	10	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$
		9	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$
		8	$4,80 \cdot 10^{-4}$	$5,36 \cdot 10^{-4}$
		7	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$
		6	$9,00 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$
		5	$4,00 \cdot 10^{-6}$	$4,51 \cdot 10^{-6}$



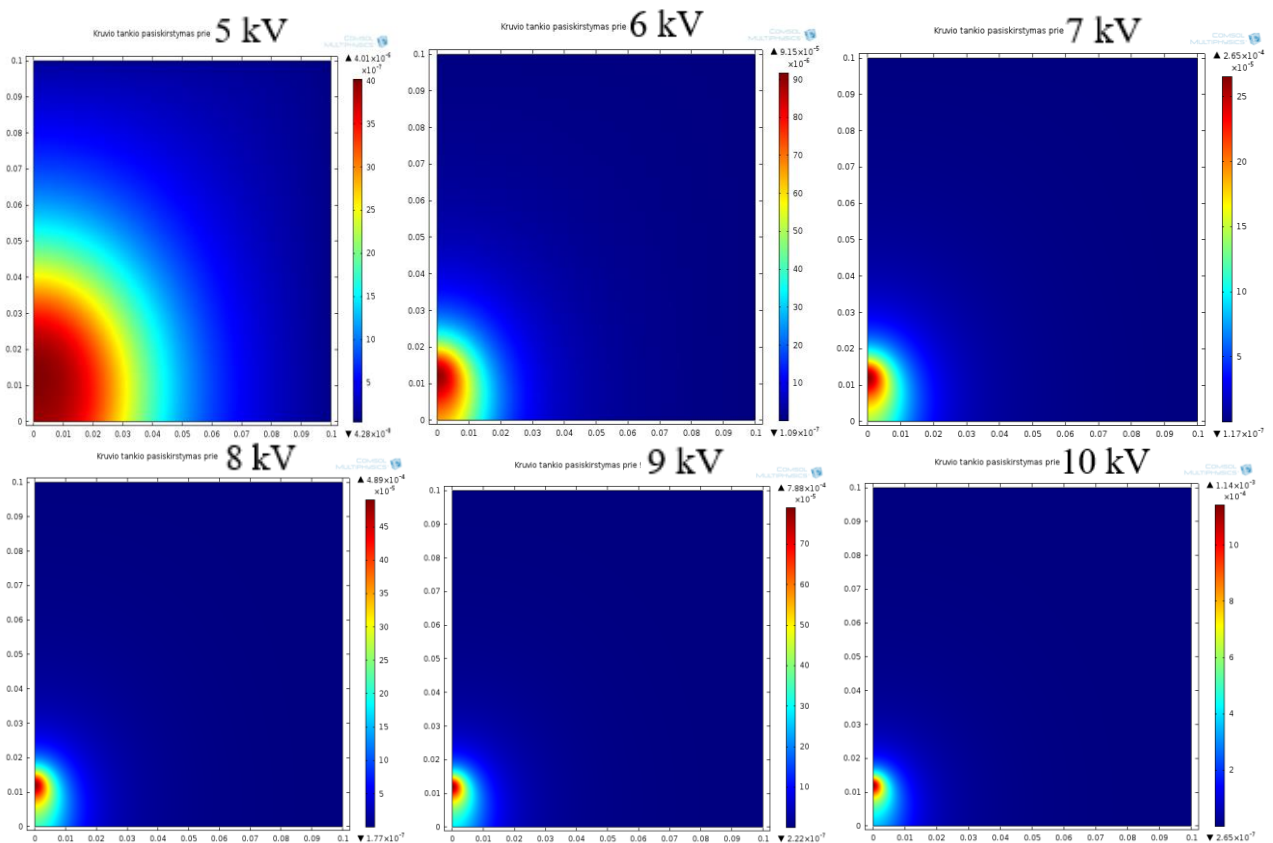
**11 pav.** Erdvės krūvio tankis ir ilginis srovės tankis ant vainikinio išlydžio elektrodo prie skirtingų įtampų.

Erdvės krūvio tankis ir srovė prie skirtingų potencialų pavaizduota 11 paveikslėlyje. Erdvės krūvio tankis ir srovė mažinant potencialą laipsniškai mažėja.



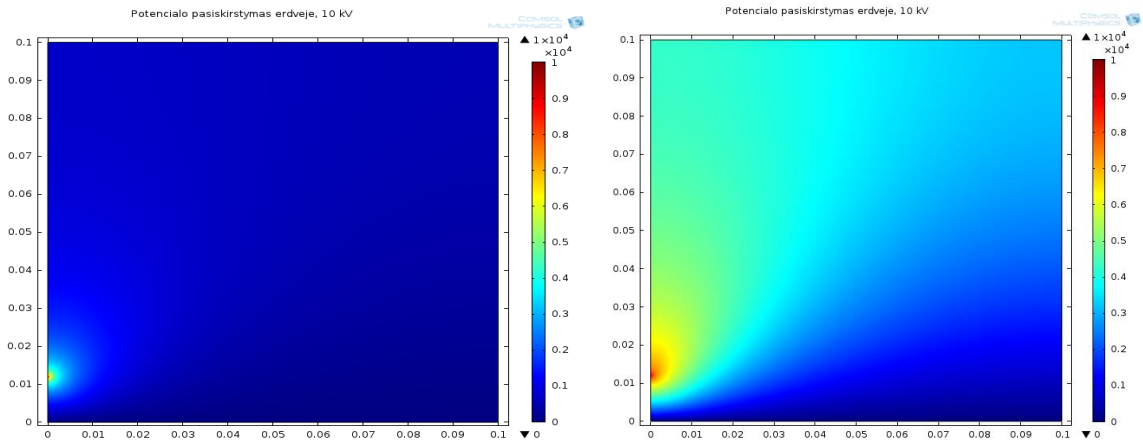
12 pav. Potencialo pasiskirstymas erdvėje 5 kV – 10 kV

Potencialo pasiskirstymas erdvėje prie skirtingų įtampų pavaizduotas 12 paveikslėlyje. Matome, jog prie 5 kV stipriausias potencialas yra aplink elektrodą, o likusioje erdvėje potencialas yra silpnas, tačiau didinant įtampą pastebime, kad potencialas visoje erdvėje virš elektrodo stiprėja dėl krūvio tankio esančio erdvėje. Kuo didesnė įtampa, tuo potencialo pasiskirstymas yra tolydesnis.



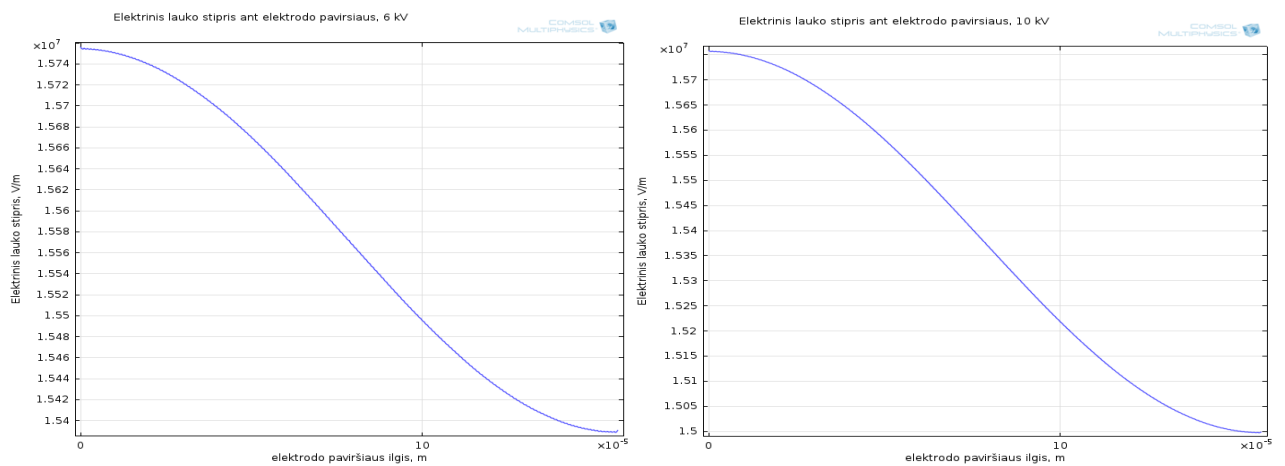
13 pav. Erdvės krūvio tankio pasiskirstymas erdvėje prie skirtingų įtampų

Erdvės krūvio tankio pasiskirstymas prie skirtingų įtampų pateiktas 13 paveikslėlyje. Galima pastebėti, jog esant 5 kV įtampai erdvės krūvio tankis yra plačiau pasiskirstęs erdvėje aplink elektroda. Tačiau kylant įtampai erdvės krūvio tankis vis tankiau pasiskirsto aplink vainikinio išlydžio elektroda ir erdvės krūvio tankio vertės, palyginti su vertėmis prie vainikinio išlydžio elektrodo paviršiaus, likusioje erdvėje yra gerokai mažesnės.



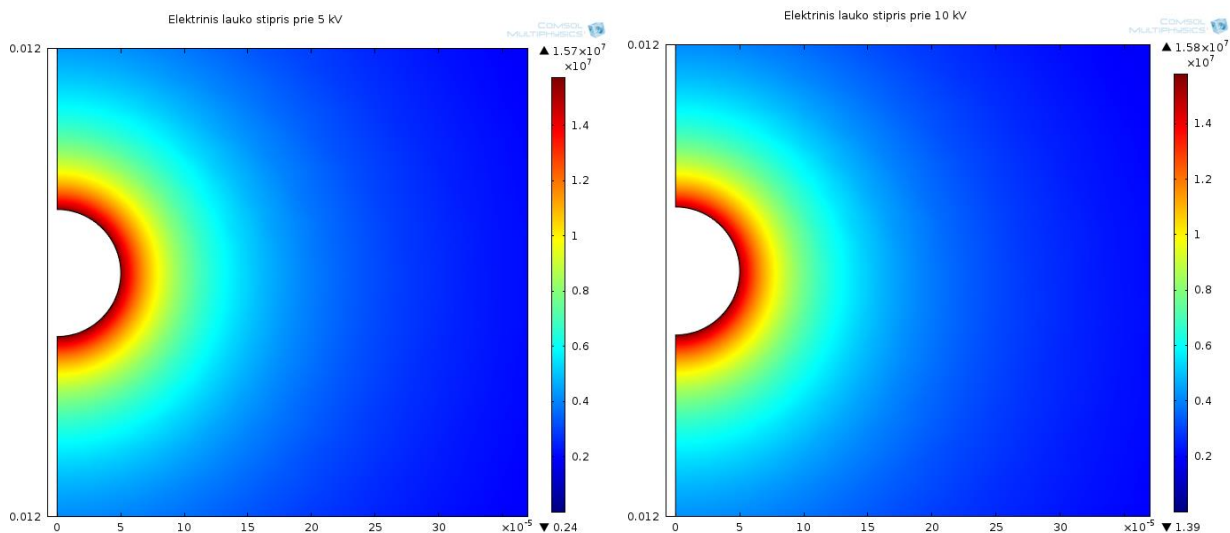
**14 pav.** Potencialo pasiskirstymas erdvėje esant 10 kV įtampai tarp elektrodų: kairėje be krūvio tankio, dešinėje su krūvio tankiu

Potencialo pasiskirstymo erdvėje palyginimas su ir be erdvinio krūvio tankiu yra pateiktas 14 paveikslėlyje. Galime matyti, jog kai erdvinio krūvio tankio nėra, potencialas turi dideles vertes tik erdvėje aplink elektroda, o toliau potencialo vertės staigiai mažėja. Tačiau, kai atsiranda erdvinis krūvio tankis potencialo vertės yra tolygiau pasiskirsčiusios visoje erdvėje ir potencialo vertės erdvėje krenta palaipsniui.



**15 pav.** Elektrinis lauko stipris ant elektrodo paviršiaus prie 6 kV ir 10 kV įtampos

Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas ant elektrodo paviršiaus pavaizduotas 15 paveikslėlyje. Teoriškai aplink vainikinio išlydžio elektroda elektrinio lauko stiprio vertė turėtų nekisti ir būti vienoda. Kaip matome elektrinis lauko stipris tolygiai mažėja aplink vainikinio išlydžio elektroda. Didžiausia elektrinio lauko stiprio vertė yra elektrodo taške, kuris yra arčiausiai žemės. Tai rodo, jog modelį dar galima tobulinti ir dar labiau priartėti prie tikslesnių rezultatų, kadangi elektrinis lauko stipris turi būti vienodas aplink visą vainikinio išlydžio elektroda. Tam reikia pasirinkti tinkamą krūvio tankio pasiskirstymą aplink elektroda.



**16 pav.** Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje

Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje prie skirtingų potencialų pavaizduotas 16 paveikslėlyje. Galime pastebėti, jog elektrinis lauko stipris labai didelis aplink vainikinio išlydžio elektrodą ir tolstant sparčiai mažėja, o didėjant įtampai elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje išlieka toks pats.

### 3.2. Vainikinio išlydžio charakteristikų priklausomybė nuo laidininko spindulio, įtampos ir aukščio tarp elektrodų

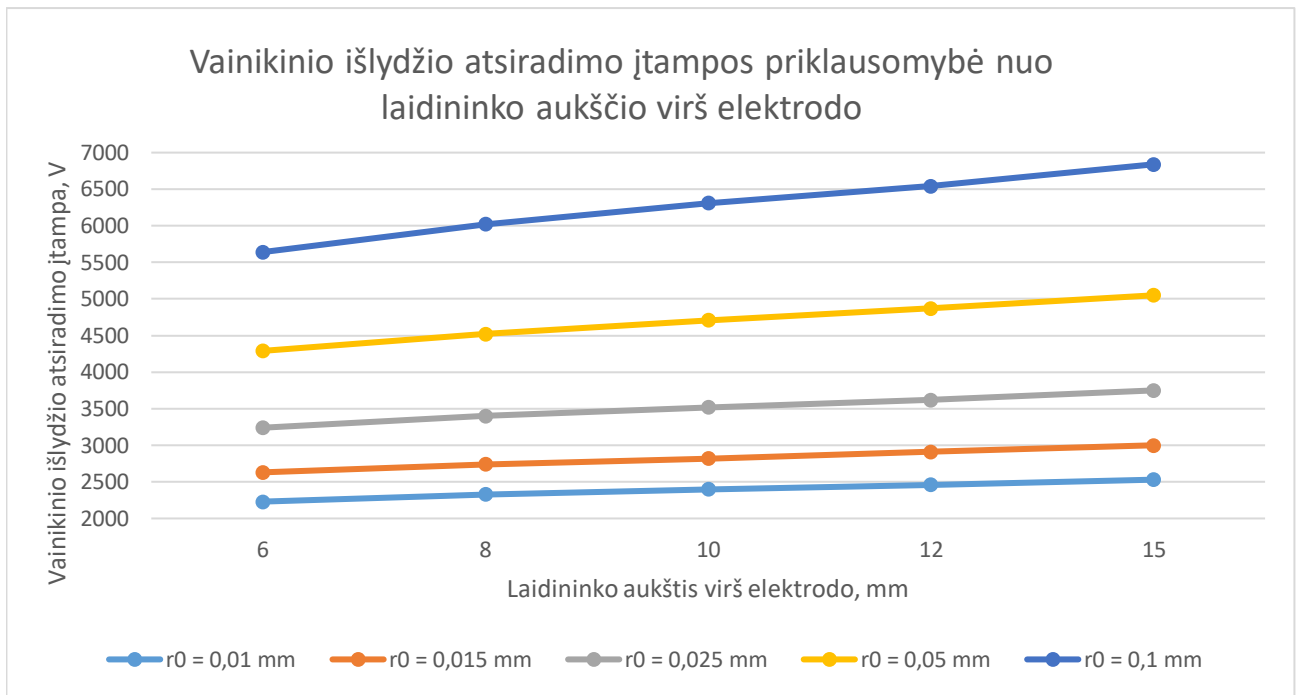
Modelio pagalba nustatome vainikinio išlydžio atsiradimo įtampą prie skirtingo laidininko spindulio ir aukščio virš elektrodo. Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos priklausomybė nuo laidininko aukščio tarp elektrodų pavaizduota 4 lentelėje.

**4 lentelė.** Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos priklausomybė nuo laidininko aukščio tarp elektrodų

Modeliavimo duomenys	Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa, V				
Laidininko spindulys $r_0$ , mm \ / \ Aukštis tarp elektrodų, mm	6	8	10	12	15
0,01	2230	2330	2400	2460	2530
0,015	2630	2740	2820	2910	3000
0,025	3240	3400	3520	3620	3750
0,05	4290	4520	4710	4870	5050
0,1	5640	6020	6310	6540	6840

Iš 17 paveikslėlio matome, jog kuo didesnis laidininko spindulys, tuo vainikinis išlydis atsiranda prie didesnės įtampos. Esant 0,01 mm laidininkui 6 mm virš elektrodo vainikinis išlydis atsiranda prie 2230 V, palyginimui su 0,1 mm spindulio laidininku tame pačiame aukštyje virš elektrodo vainikinis išlydis atsiranda prie 3410 V didesnės įtampos, tai yra prie 5640 V. Taip pat, pastebime, kad didėjant aukščiui tarp laidininko ir elektrodo vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa tiesiškai didėja. Prie 0,025 mm spindulio laidininko, kuris yra 6 mm virš elektrodo, vainikinis išlydis atsiranda ties 3240 V įtampa, o padidinus laidininko aukštį virš elektrodo iki 15 mm vainikinis išlydis atsiranda prie 510 V didesnės įtampos, tai yra prie 3750 V.





**17 pav.** Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos priklausomybė nuo laidininko aukščio virš elektrodo

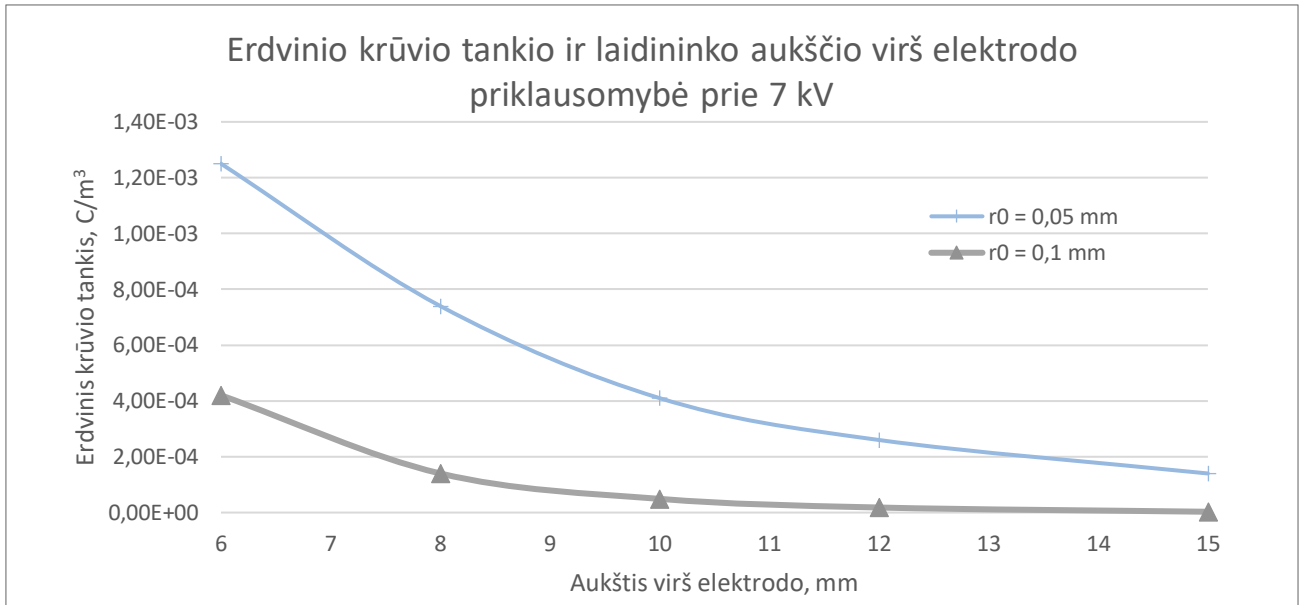
Sukurtame modelyje ištyrėme laidininko spindulio, įtampos ir aukščio virš elektrodo įtaką erdviniam krūvio tankiui ant laidininko paviršiaus vykstant vainikiniam išlydžiui. Šie duomenys pateikti 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Erdvinio krūvio tankio priklausomybė nuo laidininko įtampos ir aukščio virš elektrodo

Modeliavimo duomenys			Erdvinis krūvio tankis, C/m <sup>3</sup>				
r <sub>0</sub> , mm	E <sub>p</sub> , V/m	Įtampa, kV	a = 6 mm	a = 8 mm	a = 10 mm	a = 12 mm	a = 15 mm
0,05	1,58·10 <sup>7</sup>	10	-	-	-	1,11·10 <sup>-3</sup>	6,60·10 <sup>-4</sup>
		9	-	-	1,19·10 <sup>-3</sup>	7,70·10 <sup>-4</sup>	4,50·10 <sup>-4</sup>
		8	-	1,29·10 <sup>-3</sup>	7,60·10 <sup>-4</sup>	4,80·10 <sup>-4</sup>	2,80·10 <sup>-4</sup>
		7	1,25·10 <sup>-3</sup>	7,40·10 <sup>-4</sup>	4,10·10 <sup>-4</sup>	2,60·10 <sup>-4</sup>	1,40·10 <sup>-4</sup>
		6	7,30·10 <sup>-4</sup>	3,20·10 <sup>-4</sup>	1,60·10 <sup>-4</sup>	9,00·10 <sup>-5</sup>	4,40·10 <sup>-5</sup>
		5	1,80·10 <sup>-4</sup>	5,00·10 <sup>-5</sup>	1,50·10 <sup>-5</sup>	4,00·10 <sup>-6</sup>	0
0,1	1,20·10 <sup>7</sup>	10	-	1,30·10 <sup>-3</sup>	7,30·10 <sup>-4</sup>	4,50·10 <sup>-4</sup>	2,50·10 <sup>-4</sup>
		9	-	8,20·10 <sup>-4</sup>	4,30·10 <sup>-4</sup>	2,60·10 <sup>-4</sup>	1,30·10 <sup>-4</sup>
		8	1,00·10 <sup>-3</sup>	4,30·10 <sup>-4</sup>	2,10·10 <sup>-4</sup>	1,10·10 <sup>-4</sup>	4,90·10 <sup>-5</sup>
		7	4,20·10 <sup>-4</sup>	1,40·10 <sup>-4</sup>	4,90·10 <sup>-5</sup>	1,80·10 <sup>-5</sup>	2,80·10 <sup>-6</sup>
		6	5,40·10 <sup>-5</sup>	0	0	0	0
		5	0	0	0	0	0

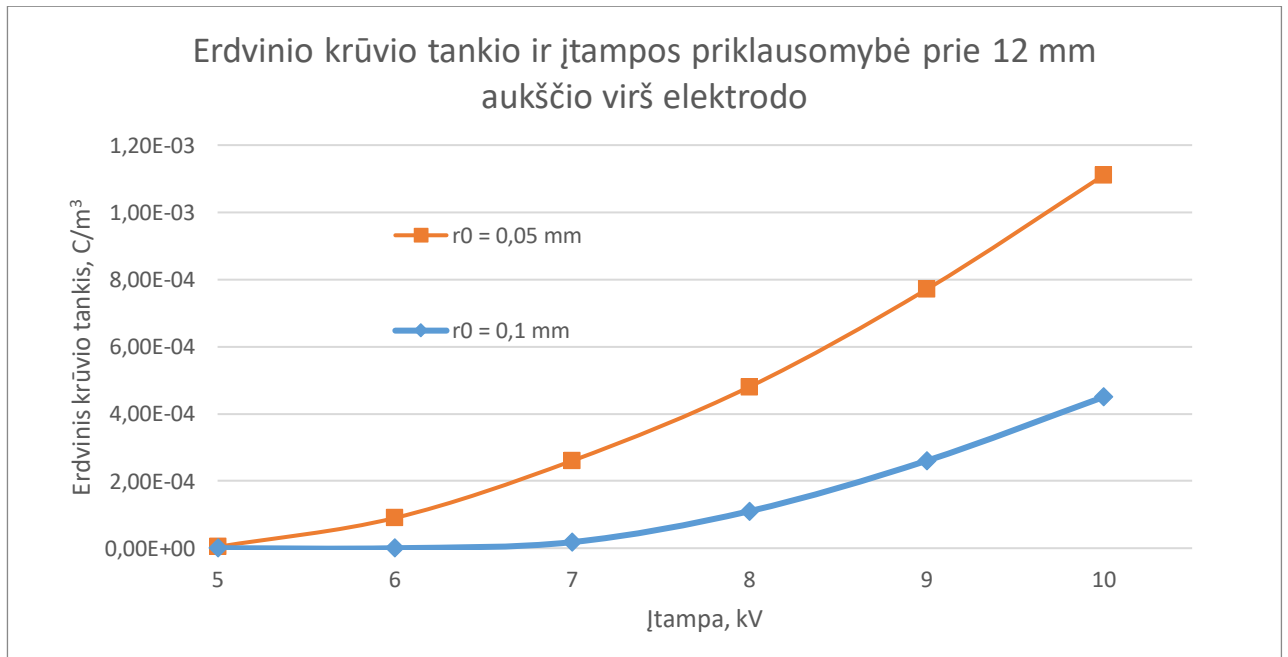
Erdvinio krūvio tankio ir laidininko aukščio virš elektrodo priklausomybė esant 7 kV įtampai pateikta 18 paveikslėlyje. Iš šios priklausomybės matome, jog didėjant laidininko aukščiui virš elektrodo erdvinis krūvio tankis sparčiai mažėja, todėl galime spręsti, kad vainikinio išlydžio procesas silpnėja tolstant laidininkui nuo elektrodo. Taip pat matome, jog 0,05 mm spindulio laidininkui esant 6 mm

virš elektrodo erdvinis krūvio tankis yra tris kartus didesnis už 0,1 mm spindulio laidininko, tai reiškia, kad kuo mažesnis laidininko spindulys, tuo erdvinis krūvio tankis didesnis ir vyksta intensyvesnis vainikinio išlydžio procesas.



**18 pav.** Erdvinio krūvio tankio ir laidininko aukščio virš elektrodo priklausomybė esant 7 kV įtampai

Erdvinio krūvio tankio ir įtampos priklausomybė esant laidininkui 12 mm virš elektrodo pavaizduota 19 paveikslėlyje. Didėjant įtampai matome, jog erdvinis krūvio tankis didėja, tačiau jis didėja daug sparčiau esant plonesniam laidininko spinduliui. Taip pat, verta pastebėti, kad esant 0,1 mm spindulio laidininkui ties 5 ir 6 kV erdvinis krūvio tankis yra lygus 0, kadangi nėra pasiekta vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa, kuri yra 6540 V.



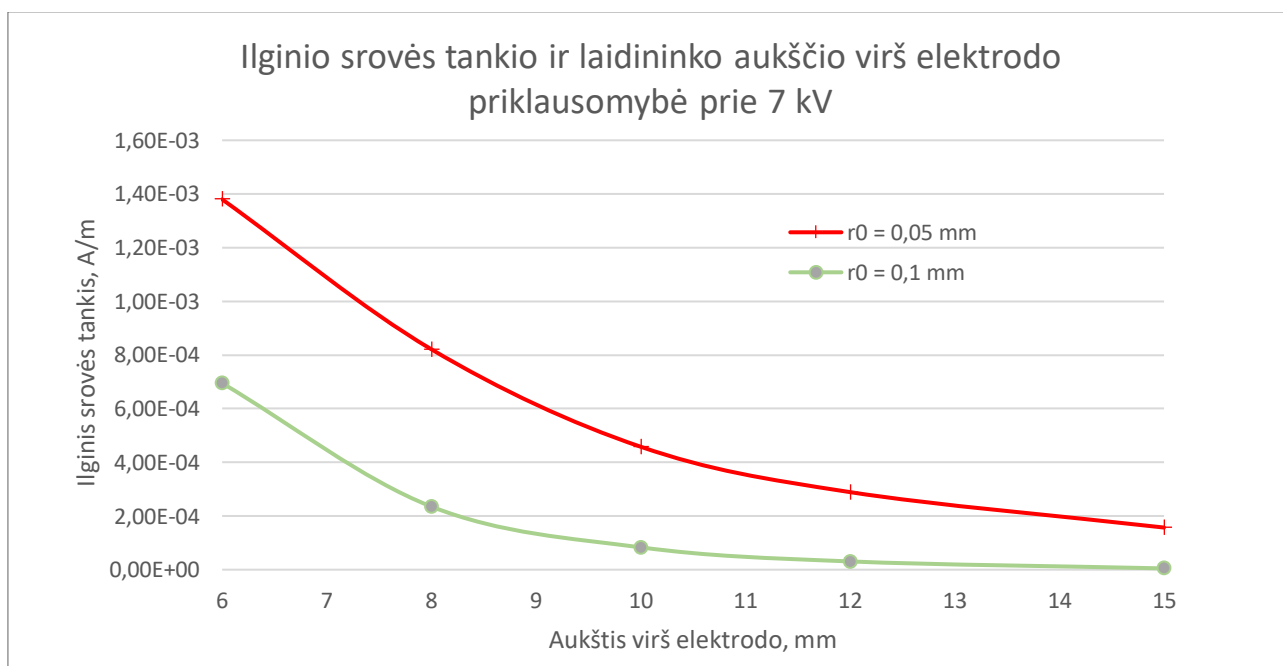
**19 pav.** Erdvinio krūvio tankio ir įtampos priklausomybė esant laidininkui 12 mm virš elektrodo

Iš erdvinio krūvio apskaičiuojame ilginį srovės tankį pagal (2.2.15) formulę. Ilginio srovės tankio priklausomybė nuo laidininko įtampos ir aukščio virš elektrodo pateikta 6 lentelėje.

**6 lentelė.** Ilginio srovės tankio priklausomybė nuo laidininko įtampos ir aukščio virš elektrodo

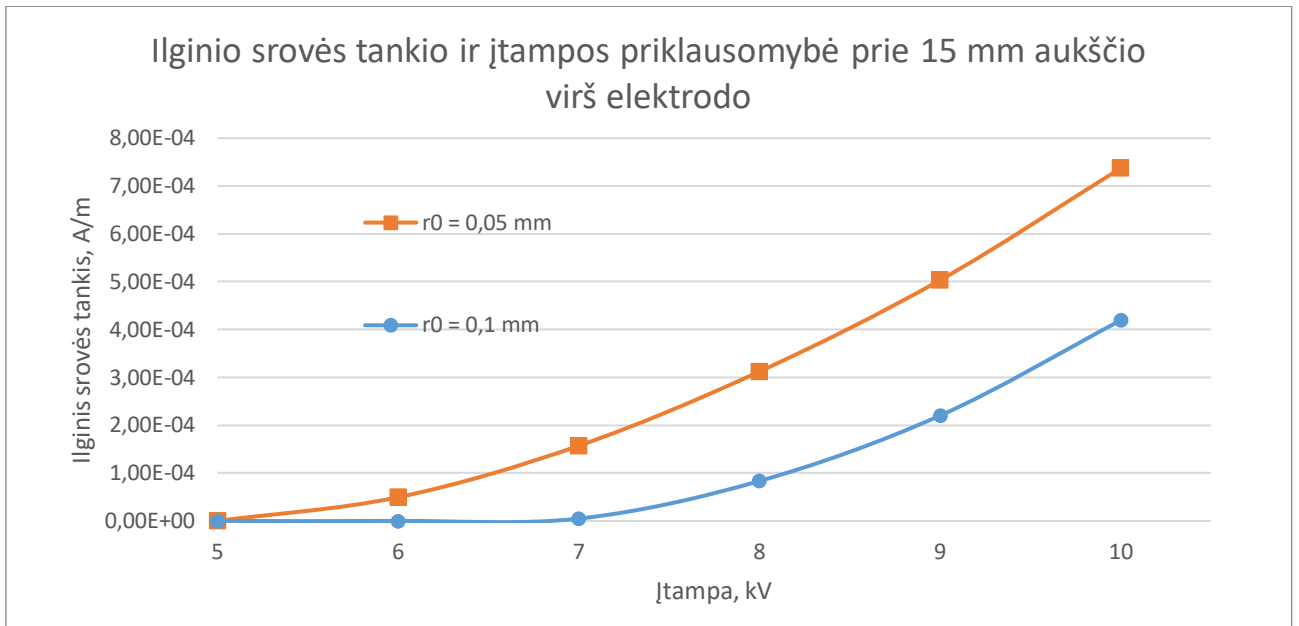
Modeliavimo duomenys			Ilginis srovės tankis, A/m				
$r_0$ , mm	$E_p$ , V/m	Įtampa, kV	$a = 6$ mm	$a = 8$ mm	$a = 10$ mm	$a = 12$ mm	$a = 15$ mm
0,05	$1,58 \cdot 10^7$	10	-	-	-	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$7,37 \cdot 10^{-4}$
		9	-	-	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$8,56 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-4}$
		8	-	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$8,43 \cdot 10^{-4}$	$5,36 \cdot 10^{-4}$	$3,12 \cdot 10^{-4}$
		7	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$8,21 \cdot 10^{-4}$	$4,58 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$
		6	$8,07 \cdot 10^{-4}$	$3,56 \cdot 10^{-4}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$4,95 \cdot 10^{-5}$
		5	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$5,63 \cdot 10^{-5}$	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$4,51 \cdot 10^{-6}$	0
0,1	$1,20 \cdot 10^7$	10	-	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$7,51 \cdot 10^{-4}$	$4,19 \cdot 10^{-4}$
		9	-	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$7,19 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$
		8	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$7,12 \cdot 10^{-4}$	$3,51 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	$8,33 \cdot 10^{-5}$
		7	$6,95 \cdot 10^{-4}$	$2,35 \cdot 10^{-4}$	$8,32 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$	$4,78 \cdot 10^{-6}$
		6	$9,08 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	0
		5	0	0	0	0	0

Ilginio srovės tankio ir laidininko aukščio virš elektrodo priklausomybė esant 7 kV įtampai pateikta 20 paveikslėlyje. Iš šio grafiko matome, kad ilginis srovės tankis mažėja didėjant laidininko aukščiui virš elektrodo ir didėja mažėjant laidininko spinduliui.



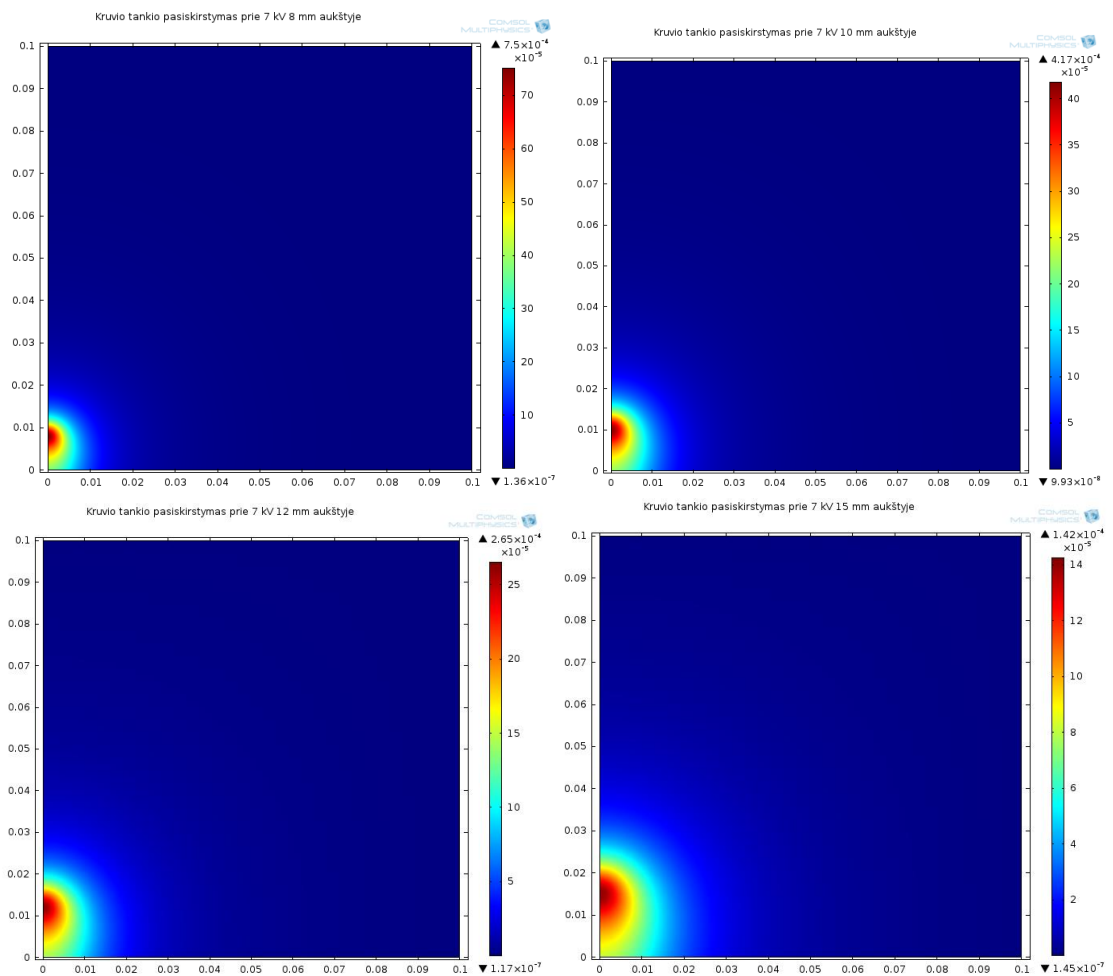
**20 pav.** Ilginio srovės tankio ir laidininko aukščio virš elektrodo priklausomybė esant 7 kV įtampai

Ilginio srovės tankio ir įtampos priklausomybė esant laidininkui 15 mm virš elektrodo pavaizduota 21 paveikslėlyje. Iš šio grafiko galime pastebėti, kuo didesnė įtampa ir mažesnis laidininko spindulys, tuo ilginis srovės tankis yra didesnis. Taip pat, kadangi aukštis virš elektrodo yra 15 mm, todėl matome esant 0,1 mm spindulio laidininkui ilginis srovės tankis lygus 0 ties 5 ir 6 kV, nes nėra pasiekta vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa, o ties 7 kV ilginis srovės tankis yra labai mažas, kadangi vyksta neintensyvus vainikinio išlydžio procesas.



**21 pav.** Ilginio srovės tankio ir įtampos priklausomybė esant laidininkui 15 mm tarp elektrodų

Erdvinio krūvio tankio pasiskirstymas erdvėje prie skirtingų aukščių tarp elektrodų pavaizduotas 22 paveikslėlyje.

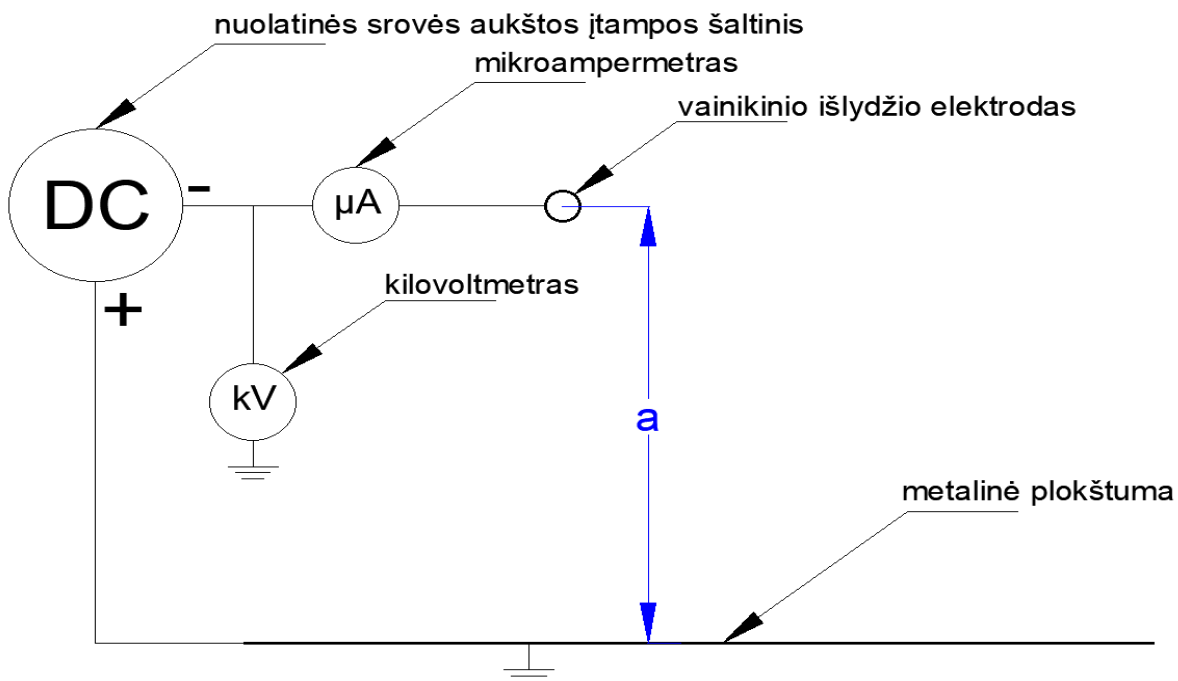


**22 pav.** Erdvinio krūvio tankio pasiskirstymas prie skirtingų aukščių tarp elektrodų, kuomet  $r_0=0,05$  mm,  $V = 7$  kV

Iš 22 paveikslėlio matome, jog kuo vainikinio išlydžio elektrodas arčiau įžeminto plokštumos elektrodo, tuo erdvinio krūvio tankio vertės didesnės ir vyksta intensyvesnis vainikinio išlydžio procesas. Didėjant aukščiui virš įžeminto plokštumos elektrodo erdvinio krūvio tankio vertės silpnėja ir pasiskirsto plačiau erdvėje.

### 3.3. Eksperimentinis tyrimas

Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ elektrodų geometrijos eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas Kauno technologijos universitete. Eksperimentinio tyrimo schema pateikia 23 paveikslėlyje.



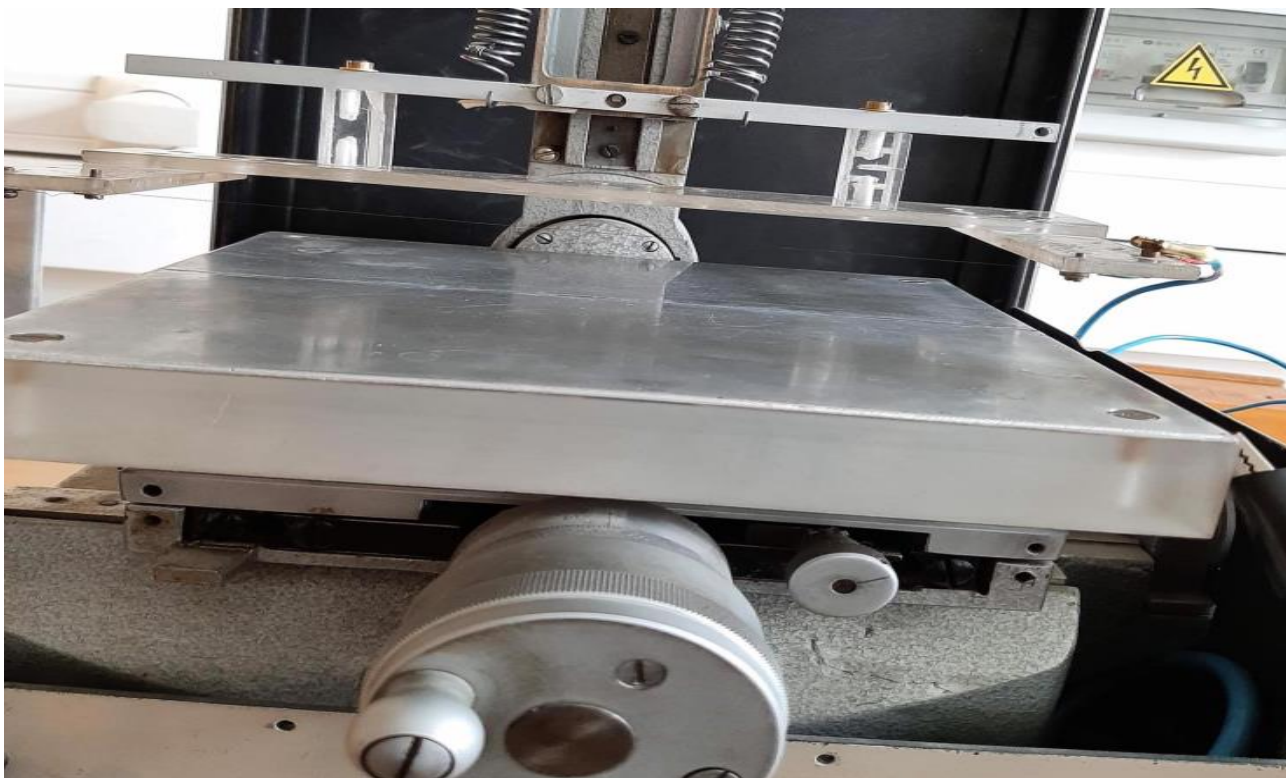
23 pav. Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio eksperimentinio tyrimo schema

Eksperimentinio tyrimo metu buvo naudojamas aukštos įtampos šaltinis „HCP 35-20000“, kuris turi integruotą mikroampermetrą ir kilovoltmetrą. Tyrimo metu naudotas aukštos įtampos šaltinis pateiktas 24 paveikslėlyje.



24 pav. Aukštos įtampos šaltinis „HCP 35-20000“

Eksperimento tyrimo metu buvo naudojamas 20 cm ilgio,  $r_0 = 0,05 \text{ mm}$  laidininkas bei 20 cm kvadrato formos metalinė plokštuma. Nuotrauka iš eksperimentinio tyrimo pateikta 25 paveikslėlyje.



**25 pav.** Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio eksperimentinio tyrimo nuotrauka

Tyrimo metu buvo stebima vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa ir tekanti srovė tarp elektrodų kintant įtampai bei aukščiui tarp elektrodų. Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa užfiksuojama tuo momentu, kai srovė pradeda tekėti tarp elektrodų.

### 3.4. Modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas

Norint įvertinti sukurto vainikinio išlydžio modelio sistemos tikslumą duomenys buvo patikrinti su realiais eksperimentiniais duomenimis. Tyrime fiksuojama srovė 20 cm laidininkui, o tam, jog gautume ilginį srovės tankį ir galėtume palyginti duomenis su modeliavimo, reikia srovę padauginti iš 5, taip gauname srovę vienam metrui laidininko. 7 lentelėje pateikta ilginio srovės tankio 0,05 mm spindulio laidininko modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas.

**7 lentelė.** Ilginio srovės tankio modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet  $r_0 = 0,05 \text{ mm}$

Aukštis tarp elektrodų, mm	Įtampa, kV	Modeliavimo, I, A/m	Eksperimento, I, A/m	Santykinė paklaida, %	Absoliutinė paklaida, I, A/m
10	10	-	$1,96 \cdot 10^{-3}$	-	-
	9	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	10,51	$1,55 \cdot 10^{-4}$
	8	$8,43 \cdot 10^{-4}$	$8,85 \cdot 10^{-4}$	4,75	$4,20 \cdot 10^{-5}$
	7	$4,58 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-4}$	5,29	$2,30 \cdot 10^{-5}$
	6	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$	16,23	$2,50 \cdot 10^{-5}$
	5	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-5}$	8,65	$1,60 \cdot 10^{-5}$

Aukštis tarp elektrodų, mm	Įtampa, kV	Modeliavimo, I, A/m	Eksperimento, I, A/m	Santykinė paklaida, %	Absoliutinė paklaida, I, A/m
12	10	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	9,56	$1,30 \cdot 10^{-4}$
	9	$8,56 \cdot 10^{-4}$	$9,50 \cdot 10^{-4}$	9,89	$9,40 \cdot 10^{-5}$
	8	$5,36 \cdot 10^{-4}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$	7,20	$3,60 \cdot 10^{-5}$
	7	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$	9,06	$2,40 \cdot 10^{-5}$
	6	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$9,10 \cdot 10^{-5}$	10,99	$1,00 \cdot 10^{-5}$
	5	$4,51 \cdot 10^{-6}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	62,42	$7,49 \cdot 10^{-6}$
15	10	$7,37 \cdot 10^{-4}$	$9,20 \cdot 10^{-4}$	19,89	$1,83 \cdot 10^{-4}$
	9	$5,03 \cdot 10^{-4}$	$5,90 \cdot 10^{-4}$	14,75	$8,70 \cdot 10^{-5}$
	8	$3,12 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	6,31	$2,10 \cdot 10^{-5}$
	7	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$1,60 \cdot 10^{-4}$	1,88	$3,00 \cdot 10^{-6}$
	6	$4,95 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-5}$	7,61	$3,50 \cdot 10^{-6}$
	5	0	$8,50 \cdot 10^{-6}$	-	-

Santykinė paklaida apskaičiuota pagal (3.3.1) formulę:

$$\delta = \frac{|e-m|}{e} \cdot 100 \quad (3.3.1)$$

čia  $\delta$  – santykinė paklaida, %;

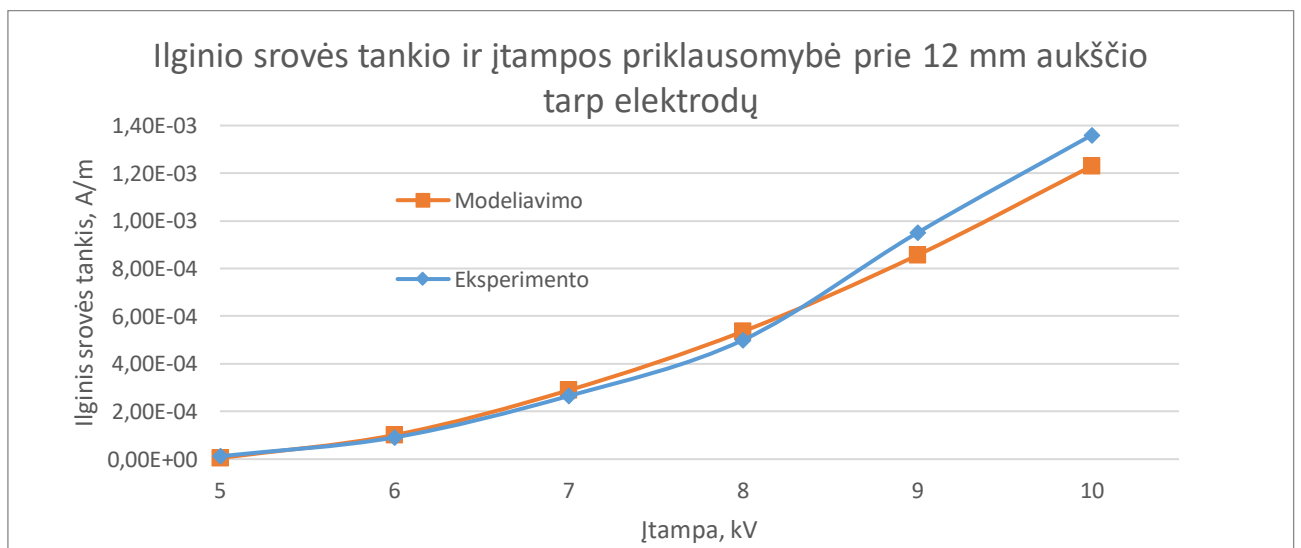
$e$  – eksperimentinė vertė;

$m$  – modeliavimo vertė.

Absoliutinė paklaida apskaičiuota pagal (3.3.2) formulę:

$$\Delta = |e - m| \quad (3.3.2)$$

čia  $\Delta$  – absoliutinė paklaida.



**26 pav.** Ilginio srovės tankio esant laidininkui 12 mm aukštyje tarp elektrodų modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet  $r_0 = 0,05 \text{ mm}$

Iš 26 paveikslėlio grafiko, kuriame pateiktas ilginio srovės tankio esant 0,05 mm spindulio laidininkui 12 mm aukštyje tarp elektrodų modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, matome, jog modeliavimo ir eksperimento kreivės yra panašios formos. 7 lentelėje pateikti duomenys rodo, kad modeliavimo ir eksperimento 12 mm aukštyje tarp elektrodų santykinė paklaida neviršija 10,99 %, išskyrus esant 5 kV įtampai santykinė paklaida yra 62,42 %, tačiau esant šiai įtampai vyksta neintensyvus vainikinio išlydžio procesas, todėl ilginio srovės tankio vertė yra labai maža, o absoliutinė paklaida prie 5 kV yra tokia pati ar net mažesnė palyginus su aukštesnėmis įtampomis. Eksperimentinių ir modeliavimo duomenų esant 10 mm ir 15 mm aukščiui tarp elektrodų grafiškas palyginimas pateiktas 1 ir 2 prieduose (psl. 44).

Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas esant 0,05 mm spindulio laidininkui pateiktas 8 lentelėje. Kaip matome vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos modeliavimo ir eksperimento santykinė paklaida esant skirtingiems aukščiams tarp elektrodų yra tarp 10 ir 13 %.

**8 lentelė.** Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet  $r_0 = 0,05$  mm

Aukštis tarp elektrodų, mm	Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa, V		Santykinė paklaida, %	Absoliutinė paklaida, V
	Modeliavimo	Eksperimento		
10	4710	4280	10,04	430
12	4870	4300	13,25	570
15	5050	4500	12,22	550

Modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo rezultatų paklaidos galėjo atsirasti dėl to, jog eksperimentas atliktas ne idealiomis sąlygomis: laidininkas nebuvo idealiai tiesus, metalinė elektrodo plokštuma turėjo nedidelių nelygumų bei ne idealiai švarūs elektrodų paviršiai taip pat galėjo turėti įtakos. Taip pat, galima toliau tobulinti nuolatinės srovės vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ elektrodų geometrijos matematinį modelį, tai yra elektrinis lauko stipris aplink laidininką turi būti vienodas ir nekisti, taip būtų galima priartėti prie dar tikslesnių modeliavimo rezultatų.



## Išvados

1. Vainikinis išlydis pasižymi melsvai violetiniu švytėjimu ir užimu. Jis stipriai kenkia izoliacijai, gamina kenksmingas dujas, o šviesos ir garso tarša gali kenkti gyvūnams. Vainikinis išlydis šalia katodo yra vadinamas neigiamu vainikiniu išlydžiu, o šalia anodo – teigiamu vainikiniu išlydžiu. Nuolatinės srovės vainikinio išlydžio savybės yra panaudojamos dalelių nusodinimui, atskyrimui, maišymui, o taip pat ir ozono gamyboje. Vainikinio išlydžio modeliavime dėl savo privalumų dažniausiai naudojamas baigtinių elementų metodas.
2. Baigtinių elementų metodo programa buvo sukurtas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ elektrodų geometrijos matematinis modelis. Iš Puasono ir krūvio vientisumo lygčių sudaryta lygčių sistema spręsta dviejų dimensijų stačiakampėje geometrijos sistemoje, pagal kurią programoje buvo apskaičiuotas elektrinio lauko ir krūvio pasiskirstymas erdvėje. Ištirta neigiamo vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos, erdvinio krūvio tankio ir ilginio srovės tankio priklausomybė nuo laidininko spindulio, aukščio tarp elektrodų ir įtampos.
3. Atliktas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ elektrodų geometrijos eksperimentinis tyrimas. Eksperimente naudotas 0,05 mm spindulio laidininkas. Tyrimo metu buvo stebima vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa ir tekanti srovė tarp elektrodų kintant įtampai bei aukščiui tarp elektrodų.
4. Vainikinio išlydžio atsiradimo įtampos modeliavimo ir eksperimento santykinė paklaida esant skirtingiems aukščiams tarp elektrodų gauta tarp 10 ir 13 %. Ilginio srovės tankio modeliavimo ir eksperimento vidutinė santykinė paklaida esant 10 mm tarp elektrodų gauta 9,08 %, esant 12 mm – 18,18 % (9,34 % – atmetus didžiausią paklaidą), o 15 mm – 10,08 %. Bendra santykinė paklaida gauta 12,81 %, tačiau atmetus vieną didžiausią pamatuotą santykinę paklaidą ties 12 mm aukščiu tarp elektrodų gaunama – 9,5 %. Modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo rezultatų paklaidos galėjo atsirasti dėl to, jog eksperimentas atliktas ne idealiomis sąlygomis. Taip pat, galima toliau tobulinti nuolatinės srovės vainikinio išlydžio „laidas šalia plokštumos“ elektrodų geometrijos matematinį modelį, taip būtų galima priartėti prie dar tikslesnių modeliavimo rezultatų.

## Literatūros sąrašas

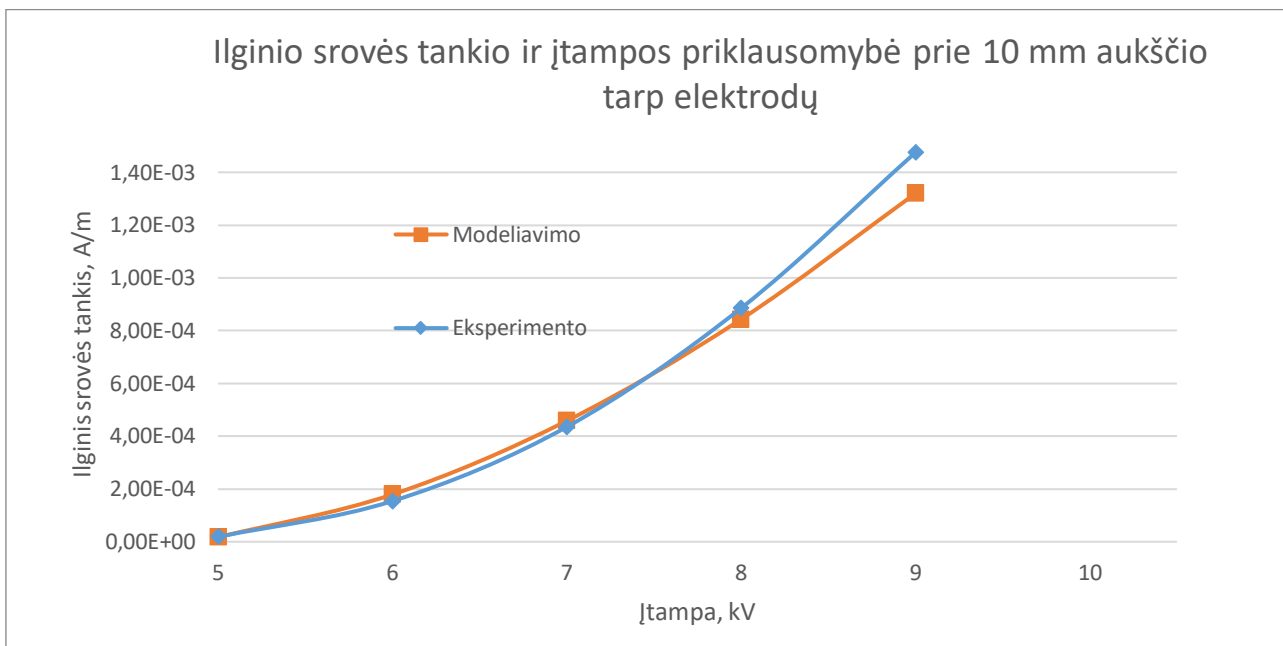
1. IS/IEC, "IS/IEC 60270 (2000): High-Voltage Techniques Measurements [ETD 19: High Voltage Engineering]." Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2000.
2. HVPD. „An introduction to partial discharge PD“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://www.hvpd.co.uk/about-us/what-is-partial-discharge/>
3. Powerpoint Engineering Ltd. „Partial discharge testing (PD testing)“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://www.substation-safety.com/case-studies/partial-discharge-testing-pd-testing/>
4. Power Monitoring & Diagnostic Technology Ltd. „Partial discharge“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://www.powermdt.com/partial-discharge>
5. Irfan Ali Soomro, Md Nor Ramdon. „Study on different techniques of partial discharge (PD) detection in power transformers winding: Simulation between paper and EPOXY resin using UHF method“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://pdfs.semanticscholar.org/03e7/4d139b750704e35278de146aeff619ea5717.pdf>
6. Guan-Jun Zhang, Yuan Li, Jun-Bo Deng, Yan-Bo Wang, Hai-Bao Mu, Xian-Jun Shao, Ming-Xiao Zhu. „Detection and Localization of Partial Discharge in Air-Insulated Substations Using UHF Antenna Array“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7904875>
7. Azharudin Mukhtaruddin, Muzamir Isa, Mohd Rafi Adzman, Syed Idris Syed Hasan, Muhamad Nur Khairul Hafizi Rohani, Chai Chang Yii. „Techniques on Partial Discharge Detection and Location Determination in Power Transformer“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7804703>
8. M. Goldman. „Corona discharges and their applications“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4645031>
9. Toshiaki Yamamoto, Masaaki Okubo. „Nonthermal Plasma Technology“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-59745-173-4\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-59745-173-4_4)
10. Ali Nasr Esfahani, Saeed Shahabi, Greg Stone, Behzad Kordi. „Investigation of Corona Partial Discharge Characteristics Under Variable Frequency and Air Pressure“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8481047>
11. H.A. Illias, N. Mokhtar, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, G. Altamimi. „Corona Discharges Under Various Types of Electrodes“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7062403>
12. Günter Lüttgens, Sylvia Lüttgens, Wolfgang Schubert. „Static Electricity – Understanding, Controlling, Applying“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: [https://books.google.lt/books?vid=ISBN9783527341283&redir\\_esc=y&hl=lt](https://books.google.lt/books?vid=ISBN9783527341283&redir_esc=y&hl=lt)
13. Ziqing GUO, Qizheng YE, Feixing LI, Yuwei WANG. „Study on Corona Discharge Spatial Structure and Stages Division Based on Visible Digital Image Colorimetry Information“ [žiūrėta 2020-02-14]. Prieiga internetu: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8858111>
14. S. Ilhan, A. Ozdemir. „EFFECTS OF CORONA RING DESIGN ON ELECTRIC FIELD INTENSITY AND POTENTIAL DISTRIBUTION ALONG AN INSULATOR STRING“ [žiūrėta 2020-03-17]. Prieiga internetu: [https://www.researchgate.net/publication/229007785\\_EFFECTS\\_OF\\_CORONA\\_RING\\_DESI](https://www.researchgate.net/publication/229007785_EFFECTS_OF_CORONA_RING_DESI)

GN ON ELECTRIC FIELD INTENSITY AND POTENTIAL DISTRIBUTION ALONG AN INSULATOR STRING

15. K. Adamiak. „Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review” [žiurėta 2020-03-10]. Prieiga internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388613000284>
16. N. Farnoosh, K. Adamiak, G.S.P. Castle. „3-D numerical analysis of EHD turbulent flow and mono-disperse charged particle transport and collection in a wire-plate ESP” [žiurėta 2020-03-10]. Prieiga internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388610001051>
17. L. Zhao, K. Adamiak. „EHD flow produced by electric corona discharge in gases: From fundamental studies to applications (a review)” [žiurėta 2020-03-17]. Prieiga internetu: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02726351.2015.1043677>
18. F. W. Peek, Jr. „Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering“ [žiurėta 2020-03-16]. Prieiga internetu: <https://archive.org/details/dielectricpheno00peekgoog>
19. J. Blazek. „Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications (Third Edition)“ [žiurėta 2020-03-20]. Prieiga internetu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999951000038>
20. R. Barauskas „Skaitiniai inžinerijos metodai“ [žiurėta 2020-03-23]. Prieiga internetu: [https://www.ebooks.ktu.lt/eb/357/skaitiniai-inzinerijos-metodai/?fbclid=IwAR2FV7EvjRLYFagc2vCME0eGqxX\\_Wrr6p6WYwcCPQZXGExCd\\_hkR5K\\_RvXw](https://www.ebooks.ktu.lt/eb/357/skaitiniai-inzinerijos-metodai/?fbclid=IwAR2FV7EvjRLYFagc2vCME0eGqxX_Wrr6p6WYwcCPQZXGExCd_hkR5K_RvXw)
21. S. Pačinskas, S. Žebrauskas „Difference Approximation of DC Corona Equations“ [žiurėta 2020-05-19]. Prieiga internetu: [https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=ELABAPDB6085438&vid=KTU&lang=en\\_US](https://vb.ktu.edu/primo-explore/fulldisplay?docid=ELABAPDB6085438&vid=KTU&lang=en_US)

## Priedai

### 1 priedas. Ilginio srovės tankio esant laidininkui 10 mm aukštyje tarp elektrodų modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet $r_0 = 0,05$ mm



### 2 priedas. Ilginio srovės tankio esant laidininkui 15 mm aukštyje tarp elektrodų modeliavimo ir eksperimentinių duomenų palyginimas, kuomet $r_0 = 0,05$ mm

