



Kauno technologijos universitetas
Elektros ir elektronikos fakultetas

Vainikinio išlydžio ir jo sukuriamo elektrinio vėjo tyrimas
Baigiamasis magistro projektas

Robertas Paulikas
Projekto autorius

Doc. Povilas Marčiulionis
Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vainikinio išlydžio ir jo sukuriamo elektrinio vėjo tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Robertas Paulikas

Projekto autorius

Doc. Povilas Marčiulionis

Vadovas

Prof. Robertas Lukočius

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Robertas Paulikas

Vainikinio išlydžio ir jo sukuriamo elektrinio vėjo 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.

Robertas Paulikas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Paulikas, Robertas. Vainikinio išlydžio ir jo sukuriamo elektrinio vėjo 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 vėjas, elektrinis laukas, elektrinis lauko stipris.

Kaunas, 2025. 41 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro darbe atliekamas vainikinio išlydžio ir jo sukuriamo elektrinio vėjo tyrimas. Literatūros analizėje apžvelgiami pagrindiniai elektrinio lauko modeliavimo metodai, vainikinio išlydžio taikymo sritys, tipai, galimos elektrodų konfigūracijos, bei vainikinio išlydžio susidarymo principai. Taip pat, literatūros analizėje apžvelgiama vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo atsiradimo istorija, elektrinio vėjo susidarymo mechanizmo priklausomybė nuo poliarizacijos bei apžvelgiamas vainikinio išlydžio elektrinio vėjo generavimas.

Vainikinio išlydžio ir jo sukuriamo elektrinio vėjo tyrimui pasirinkta naudoti laido – plokštumos elektrodų konfigūracija dėl plataus panaudojimo praktikoje bei dėl didesnio sukuriamo elektrinio vėjo greičio, lyginant su kitomis konfigūracijomis. Vainikinio išlydžio ir elektrinio vėjo modeliavimui naudojama „COMSOL Multiphysics 6.2“ programinė įranga. Baigtinių elementų modeliavimo metodu sukuriamas matematinis vainikinio išlydžio modelis, randama pradinė vainikinio išlydžio atsiradimo įtampa, randamas elektrinis lauko stipris. Analizuojamos vainikinio išlydžio srovės, elektrinio vėjo greičio charakteristikų priklausomybės nuo įtampos. Tiriamas elektrinio potencialo, erdvės krūvio tankio pasiskirstymas erdvėje, elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas ant elektrodo paviršiaus.

Atliktas vainikinio išlydžio ir jo sukuriamo elektrinio vėjo eksperimentinis tyrimas. Eksperimentinio tyrimo metu naudojama laido – plokštumos elektrodų konfigūracija. Atlikta eksperimentinio tyrimo metu gautų rezultatų analizė bei atliekamas rezultatų palyginimas su sukurto matematinio modelio rezultatais.

Paulikas, Robertas. Research of Corona Discharge and Its Generated Electric Wind. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. 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 wind, Electric field, Electric field strength.

Kaunas, 2025. 41 p.

Summary

The final master's thesis investigates the corona discharge and the electric wind it generates. The literature review covers the main methods for modeling the electric field, the applications and types of corona discharge, possible electrode configurations, and the principles of corona discharge formation. Additionally, the review examines the historical development of the electric wind generated by corona discharge, the dependence of the electric wind formation mechanism on polarization, and the generation of electric wind by corona discharge.

A wire-to-plate electrode configuration was chosen for the study due to its wide practical application and the higher EHD wind velocity it produces compared to other configurations. The modeling uses the "COMSOL Multiphysics 6.2" software, applying the finite element method. A mathematical model of corona discharge is developed, the onset voltage for the discharge is determined, and the electric field strength is calculated. The dependencies of corona current and EHD wind velocity on applied voltage are analyzed, along with the spatial distributions of electric potential, space charge density, and electric field intensity on the electrode surface.

An experimental investigation of corona discharge and generated EHD wind is also carried out using the same wire-to-plate electrode configuration. The experimental results are analyzed and compared with those obtained from the mathematical model to assess the model's accuracy and reliability.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros analizė	11
1.1. Elektrinis laukas	11
1.1.1. Elektrinio lauko modeliavimas.....	11
1.1.2. Elektrinio lauko stipris	11
1.2. Vainikinis išlydis	12
1.2.1. Vainikinio išlydžio taikymo sritys.....	13
1.2.2. Vainikinių išlydžių tipai	14
1.2.3. Elektrodo konfigūracijos	15
1.2.4. Vainikinio išlydžio susidarymas.....	16
1.3. Vainikinio išlydžio sukuriamas elektrinis vėjas	17
1.3.1. Vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo priešistorė.....	17
1.3.2. Vainikinio išlydžio elektrinio vėjo generavimas	18
1.3.3. Elektrinio vėjo susidarymo mechanizmo priklausomybė nuo poliarizacijos	18
2. Matematinis modeliavimas	20
2.1. Modelio geometrija	20
2.2. Tinklelio generavimas	21
2.3. Elektrinio lauko skaičiavimas.....	22
2.3.1. Kraštinės (ribinės) sąlygos	23
2.3.2. Elektrinio lauko skaičiavimo rezultatai	23
2.4. Elektrinio vėjo srauto skaičiavimas.....	26
2.4.1. Kraštinės (ribinės) sąlygos	27
2.4.2. Elektrinio vėjo srauto skaičiavimo rezultatai	27
3. Eksperimentinis tyrimas ir matematinio modeliavimo palyginimas	30
3.1.1. Matavimo įranga.....	30
3.1.2. Matavimo rezultatai.....	32
3.1.3. Eksperimentinio matavimo palyginimas su matematiniu modeliu	37
Išvados	39
Literatūros sąrašas	40

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Krūvio tankio prie elektrodo paviršiaus priklausomybė nuo įtampos.....	24
2 lentelė. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matematinio tyrimo rezultatai	28
3 lentelė. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai	32
4 lentelė. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai	34

Paveikslų sąrašas

1 pav. Deguonies molekulių jonizacija [4]	13
2 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio stadijos didėjant taikomai įtampai [13]	15
3 pav. Neigiamo vainikinio išlydžio stadijos didėjant taikomai įtampai [13].....	15
4 pav. Elektrodo konfigūracijos, naudojamos vainikiniame išlydyje [13].....	16
5 pav. Neigiamo vainikinio išlydžio elektrinio vėjo susidarymas [27].....	18
6 pav. Elektrinio vėjo generavimas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio metu esant skirtingiems poliarumams [28].....	19
7 pav. Vainikinio išlydžio modeliavimo geometrija	20
8 pav. „COMSOL Multiphysics 6.2“ sukurta vainikinio išlydžio modelio geometrija	21
9 pav. Baigtinių elementų tinkelis geometrijoje: kairėje – visa geometrija, dešinėje – priartintas vainikinio išlydžio elektrodas	21
10 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas erdvėje 5 kV - 10kV	23
11 pav. Erdvinio krūvio tankio pasiskirstymas erdvėje 5 kV – 10 kV	24
12 pav. Erdvės krūvio tankis prie vainikinio išlydžio elektrodo esant skirtingoms įtampoms.....	25
13 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje esant įtampai 5 – 10 kV	25
14 pav. Elektrinio lauko stiprio kitimas ant vainikinio išlydžio elektrodo paviršiaus 5 – 10 kV	26
15 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriama elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio tyrimo rezultatai.....	28
16 pav. Elektrinis vėjo srauto greitis 5 – 10 kV	29
17 pav. Reguliuojamas aukštos įtampos nuolatinės srovės šaltinis „HCP 35-20000“.....	30
18 pav. Eksperimentinis stendas, skirtas elektriniams išlydžiams tirti	30
19 pav. Priartintas eksperimentinio stendo vaizdas	31
20 pav. Multifunkcinis matavimo prietaisas termo – anemometras	31
21 pav. Eksperimentinė schema EHD oro srauto greičiui matuoti	32
22 pav. Eksperimentinis stendas EHD oro srauto greičiui matuoti	32
23 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai	33
24 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų santykinės paklaidos	33
25 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų absoliutinės paklaidos.....	34
26 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriama elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai	35
27 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriama elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų santykinės paklaidos.....	35
28 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriama elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų absoliutinės paklaidos	36

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

BEM – baigtinių elementų metodas, angl. *Finite Element Method*.

BSM – baigtinių skirtumų metodas, angl. *Finite Difference Method*

BTM – baigtinių tūrių metodas, angl. *Finite Volume Method*

EHD – elektrohidrodinaminis, angl. *Electro hydrodynamic*.

JJS – jonų judrumo spektrometrija, angl. *Ion Mobility Spectrometry*.

.

Įvadas

Vainikinis išlydis yra elektrinis reiškinys, pasireiškiantis stipriame nevienalyčiame elektriniame lauke, kai oro jonizacija vyksta aplink laidininko paviršių. Oro jonizacija yra fizikinis procesas, kurio metu neutralios oro molekulės arba atomai, paveikti stipraus elektrinio lauko ar kitokios išorinės energijos (pvz.: aukštos temperatūros, ultravioletinės spinduliuotės ar radiacijos), praranda arba prisijungia elektronus ir tampa elektringomis dalelėmis – jonais. Šio proceso metu susidaro teigiami jonai (oro molekulės praradusios elektronus) ir neigiami jonai (oro molekulės prisijungę papildomus elektronus). Jonizacijos metu susidariusi jonizuota aplinka pasižymi padidintu elektros laidumu ir gali sukurti įvairius elektrinius reiškinius, tokius kaip vainikinis išlydis ar kibirkštinis išlydis. Oro jonizacija yra esminis procesas, vykstantis daugelyje gamtinių reiškinių, pavyzdžiui žaibo išlydžio metu. Jonizacijos proceso metu susidaro teigiami ir neigiami jonai, kurie, veikiami elektrinio lauko, pradeda judėti link priešingo krūvio elektrodo. Šis jonų judėjimas sukuria reiškinį, žinomą kaip elektrinis vėjas. Elektrinis vėjas gali būti panaudotas įvairiose technologijose: aušinimo sistemose, dulkių valyme, elektrostatiniame nusodinime ir kt. Atlikti tyrimai patvirtina, kad elektrinio vėjo intensyvumas priklauso potencialų skirtumo tarp elektrodų, elektrodo geometrijos, atstumo tarp elektrodų bei aplinkos sąlygų (oro drėgnumo, slėgio). Atlikti tyrimai taip pat patvirtina, kad elektrinis vėjas yra efektyvesnis esant aukštesnei įtampai ir smulkesnei elektrodo struktūrai. Mokslininkų atlikti eksperimentai parodė, kad vainikinis išlydis ir jo sukuriamas elektrinis vėjas gali reikšmingai paveikti aplinkinius objektus, sukeldamas paviršių elektrostatinį įelektrinimą. Šių tyrimų išvados leidžia tobulinti esamus technologinius procesus ir skatinti naujas inovacijas įvairiose pramonės šakose, taikant vainikinį išlydį. Taigi, vainikinis išlydis ir jo sukeliamas elektrinis vėjas yra svarbūs reiškiniai, turintys potencialą įvairiose praktinėse srityse, tolimesni tyrimai gali padėti geriau suprasti šių procesų mechanizmus ir efektyviai juos panaudoti technologiniuose sprendimuose.

Darbo tikslas – sukurti matematinį modelį vainikinio išlydžio ir jo sukeliamo elektrinio vėjo apskaičiavimui, įvertinti išlydžių formavimosi galimybę matematiniais metodais bei įvertinti vainikinio išlydžio ir elektrinio vėjo matematinį modelių tikslumą eksperimentiškai.

Darbo uždaviniai:

- Atlikti literatūros analizę;
- Sukurti vainikinio išlydžio matematinį modelį;
- Sukurti vainikinio išlydžio sukeliamo elektrinio vėjo matematinį modelį;
- Įvertinti vainikinio išlydžio ir elektrinio vėjo matematinį modelių tikslumą eksperimentiškai.

1. Literatūros analizė

1.1. Elektrinis laukas

1.1.1. Elektrinio lauko modeliavimas

Elektrinis laukas gali būti modeliuojamas keliais būdais, priklausomai nuo norimo detalumo lygio, taikymo srities ir turimų skaičiavimo išteklių. Pagrindiniai metodai, kuriuos galima naudoti:

- **Baigtinių elementų metodas (BEM, angl. *Finite Element Method*)** – baigtinių elementų metodas, dažniausiai naudojamas metodas programiniuose paketuose. Skaičiavimas pradedamas nuo fizinės erdvės padalijimo į atskirus elementus (dažniausiai trikampio ar keturkampio formos 2D atveju ir tetraedro ar heksaedro formos 3D atveju). Tokiu būdu sukuriama nestruktūrizuota tinklė. Priklausomai nuo elemento tipo ir reikalaujamo tikslumo, kiekviename elemento krašte ir viduje turi būti išdėstyti tam tikras taškų skaičius, kuriuose ieškoma uždavinio sprendinio. Kiekviename elemente sprendžiamos diferencialinės lygtys, aprašančios elektrinį lauką. Sprendžiama didelė lygčių sistema, iš kurios gaunamas apytikslis visos erdvės elektrinio lauko pasiskirstymas [1].
- **Baigtinių skirtumų metodas (BSM, angl. *Finite Difference Method*)** – yra vienas iš pagrindinių skaitinių metodų, naudojamų diferencialinių lygčių sprendimui, kai analitinis sprendimas yra sudėtingas arba neįmanomas. FDM esmė – diferencialinių išvestinių pakeitimas baigtiniais skirtumais diskrečiame taškų tinklelyje. Tokiu būdu diferencialinės lygties uždavinys transformuojamas į algebrinių lygčių sistemą, kurią galima spręsti skaitmeniniu būdu. Tiriamoji sritis suskaidoma į diskrečius taškus, vadinamus tinkleliu. Išvestinės aproksimuojamos taikant formules, pagrįstas Teiloro eilutės skleidiniais. Gautos aproksimacijos įrašomos į pradinę lygtį kiekviename diskretiniame taške, taip gaunama tiesinių arba netiesinių algebrinių lygčių sistema. [1].
- **Baigtinių tūrių metodas (BTM, angl. *Finite Volume Method*)** – yra vienas iš skaitinių metodų, skirtų dalinėms diferencialinėms lygtims spręsti. Skaičiavimo sritis suskaidoma į mažus tūrius (vadinamus kontroliniais arba baigtiniais tūriais), ir integralinė dalinės diferencialinės lygties forma taikoma kiekvienam tūriui atskirai [1].

Analizuojant elektrinio lauko pasiskirstymą ir savybes įvairiose aplinkose ar sistemose, dažniausiai naudojamas BEM, dėl savo universalumo, tikslumo ir praktinio pritaikymo.

1.1.2. Elektrinio lauko stipris

Peek'o formulė (dar vadinama Peek'o kritinė įtampa) yra empirinė lygtis, kuri nusako, kokia yra kritinė įtampa (arba lauko stipris), nuo kurios pradeda formotis vainikinis išlydis aplink laidininką. Elektrinio lauko stipris vainikinio elektrodo paviršiuje apskaičiuojamas pagal Peek'o lygtį, taikomą tiek teigiamiems, tiek neigiamiems vainikiniais išlydžiams [2]:

$$E_{Peek} = 3,1 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{0,0308}{\sqrt{\delta \cdot a}} \right), V/m \quad (1)$$

kur E_{peek} – elektrinio lauko stipris, V/m

a – vainikinio išlydžio elektrodo spindulys, cm

δ – santykinis oro tankis

Santykinis oro tankis, apskaičiuojamas taip:

$$\delta = \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} \quad (2)$$

kur T_0 ir P_0 yra standartinė temperatūra ir slėgis,
 T ir P – išlydžio metu esanti temperatūra ir slėgis.

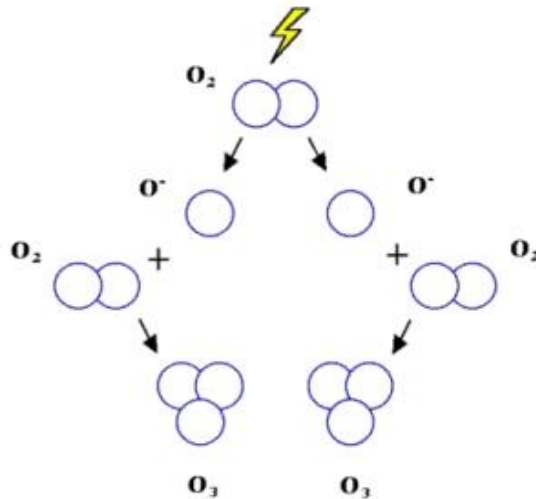
$\delta = 1$, esant standartinėms sąlygoms: temperatūra $T = 298 \text{ K}$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), slėgis $P = 1013.25 \text{ hPa}$ (1 atmosfera).

„Peek‘o“ formulė apibrėžia jonizacijos ir dreifo sritis:

- **Jonizacijos sritis** – tai erdvė tarp vainikinio elektrodo paviršiaus ir $0,0301\sqrt{a/\delta}$ atstumo nuo jo, kur elektrinio lauko stipris viršija 30 kV/cm .
- **Dreifo sritis** – tai likusi sritis be jonizacijos, kur jonai keliauja link įžeminto elektrodo [3].

1.2. Vainikinis išlydis

Vainikinis išlydis yra mažos srovės iškrova, kurią sukelia dalinis arba vietinis dujų skilimas su stipriu elektriniu lauku tarp mažiausiai dviejų elektrodų: aštraus elektrodo, vadinamo vainikiniu elektrodu arba emiterio elektrodu, ir buko elektrodo, kuris yra įžemintas. Šis procesas sukelia oro jonizaciją ir silpną švytėjimą. Vainikinis išlydis gali būti teigiamas arba neigiamas, priklausomai nuo to, kokia įtampa taikoma elektrodui. Vainikinis išlydis prasideda, kai stiprus elektrinis laukas susidaro netoli laidininko paviršiaus. Šis laukas sukelia oro molekulių jonizaciją, kai lauko intensyvumas viršija tam tikrą kritinę vertę. Elektronai, kurie yra atskirti nuo oro molekulių, pagreitėja elektriniame lauke ir susiduria su kitomis molekulėmis, sukeldami tolesnę jonizaciją. Šis procesas sukuria daugiau elektronų ir teigiamų jonų. Dėl jonizacijos susidaro plazmos debesėlis aplink elektrodą. Šis procesas sukelia silpną švytėjimą, kuris matomas kaip melsvai violetinis švytėjimas aplink elektrodą. Vainikinis išlydis stabilizuojasi, kai susidariusi plazma sumažina elektrinio lauko intensyvumą aplink elektrodą. Tai lemia, kad tolimesnė jonizacija nebevyksta arba vyksta labai lėtai. Vainikiniai išlydžiai taip pat pasižymi žemo dažnio garsų skleidimu. Esant silpnam vainikiniam išlydžiui, jie beveik nepastebimi vizualiai, o įprastas traškėjimo garsas beveik negirdimas, tačiau tokius išlydžius galima nustatyti registruojant jų skleidžiamą ultravioletinę spinduliuotę arba ultragarsą. Šie išlydžiai atsiranda tuomet, kai stipraus elektrinio lauko poveikyje įvyksta dujų (oro), esančių arti laidininko, jonizacija, ir taip susidariusios elektringos dalelės ima pernešti elektros krūvį. Įprastinėmis atmosferos sąlygomis vainikinio išlydžio metu jonizuojamos deguonies molekulės, o neigiamieji deguonies jonai, veikiami elektrinio lauko, tolsta nuo elektrodo iki tol, kol elektrinio lauko poveikis susilpnėja. Nutolę nuo elektrinio lauko poveikio deguonies jonai jungiasi su neutraliomis deguonies molekulėmis ir sudaro ozono (O_3) molekules. (žr. 1 pav.) [4].



1 pav. Deguonies molekulių jonizacija [4]

1.2.1. Vainikinio išlydžio taikymo sritys

Pagrindinės vainikinio išlydžio taikymo sritys:

1. **Elektrostatinis dulkių valymas ir filtravimas** – elektrostatinis dulkių valymas ir filtravimas yra technologija, plačiai naudojama pramonėje oro valymui nuo kietųjų dalelių. Elektrostatinis nusodintuvas pašalina dulkes naudodamas elektrostatinę (Kulono) jėgą. Įrenginį sudaro teigiamo poliaus surinkimo elektrodas (plokščias įžemintas elektrodas) ir neigiamo poliaus elektrodas (vainikinis, emituojantis elektrodas), prijungtas prie aukštos įtampos šaltinio. Ši technologija pagrįsta vainikiniu išlydžiu, kuris sukuria elektros lauką, įkraunantį ore esančias dulkių daleles. Įkrautos dalelės vėliau pritraukiamos prie priešingo krūvio elektrodų ir taip pašalinamos iš oro srauto [5].
2. **Oro jonizavimas** – vainikinis išlydis naudojamas oro valytuvuose orui valyti, jonizuojant orą. Ozonas yra šalutinis vainikinio išlydžio produktas ir jis naudojamas mikrobams naikinti ir ore esantiems teršalams neutralizuoti [6].
3. **Ozono generavimas** – vainikinis išlydis generuoja ozono dujas, kurios plačiai naudojamos įvairiose pramonės srityse, tačiau energetikos sistemose jos gali būti naudojamos kaip veiksminga priemonė aptikti ir stebėti įrangos gedimus [7].
4. **Elektrostatinis dažymas ir paviršių padengimas** – dažų dalelių elektrostatinis nusodinimas ant paviršių, siekiant tolygesnio ir ekonomiškesnio dažymo. Vainikinis išlydis plačiai naudojamas polimerinių medžiagų paviršiaus savybių gerinimui, siekiant pagerinti dažų, klijų ir kitų dangų sukibimą. Šis procesas ypač svarbus fleksografinėje spaudoje, kur būtina užtikrinti aukštą spausdinimo kokybę ant polimerinių paviršių [8].
5. **Spausdinimo ir kopijavimo technologijos** – elektrofotografiniuose įrenginiuose, tokiuose kaip lazeriniai spausdintuvai ir kopijavimo aparatai, vainikinis išlydis naudojamas būgno arba juostos paviršiaus įkrovimui. Šis įkrovimas yra būtinas tam, kad vėliau elektrostatiniu būdu būtų pritrauktos dažomųjų miltelių dalelės tik prie tam tikrų paviršiaus sričių, atitinkančių spausdinamą vaizdą ar tekstą [9].
6. **Analizinė chemija ir jutikliai** – dujų analizatorių gamyba, taip pat vainikinis išlydis naudojamas jonų judrumo spektrometrijoje (JJS, angl. *Ion Mobility Spectrometry*), kuri naudojama sprogmenų ir narkotinių medžiagų aptikimui. Vainikinis išlydis yra efektyvus jonų

šaltinis IMS sistemose, kuris nereikalauja radioaktyviųjų medžiagų ir yra patrauklus dėl gebėjimo generuoti intensyvią jonizaciją mažame tūryje [10].

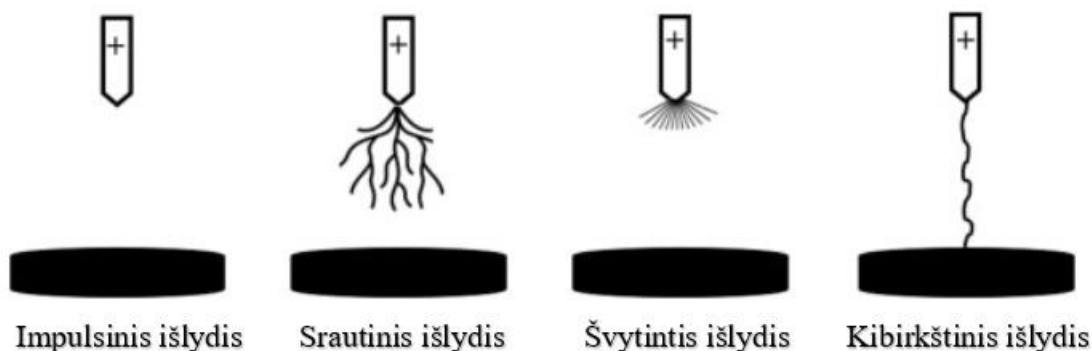
7. **Augalų ir žemės ūkio produktų apdorojimas** – kai kurie tyrimai rodo, kad vainikinio išlydžio panaudojimas gali pagerinti sėklų dygimo greitį ir vienodumą [11,12]. Vainikinis išlydis gali būti naudojamas sėklų ir augalų paviršių dezinfekcijai, pašalinant patogeninius mikroorganizmus ir taip sumažinant ligų plitimo riziką. Apdorojant grūdus ar kitus sandėliuojamus produktus vainikiniu išlydžiu, galima sumažinti pelėsių ir kitų mikroorganizmų augimą, taip prailginant produktų galiojimo laiką. Vainikinis išlydis yra efektyvus patogeninių mikroorganizmų naikinimui dėl reaktyviųjų deguonies formų (O_3 , H_2O_2 , $OH\cdot$), kurios ardo mikroorganizmų ląstelių sienelės ir naikina patogenus. Produktų galiojimo laiko prailginimas yra pagrįstas mikrobinės taršos sumažėjimu, kuris užtikrina ilgalaikę produktų kokybę. Ši technologija yra ypač aktuali jautrių produktų, tokių kaip sėklos, grūdai ar švieži augaliniai produktai, dezinfekcijai be šiluminių apdorojimo metodų, kurie gali neigiamai paveikti jų kokybę [13].
8. **Medicininės technologijos** – medicininių prietaisų sterilizacija, paviršių dezinfekcija, mikroorganizmų šalinimas. Vainikinis išlydis medicinos srityje naudojamas dėl savo gebėjimo generuoti aktyvias chemines medžiagas, tokias kaip ozonas ir laisvieji radikalai, kurie pasižymi stipriomis dezinfekcinėmis savybėmis. Šios savybės leidžia efektyviai sterilizuoti medicininius instrumentus ir paviršius, užtikrinant aukštą higienos lygį sveikatos priežiūros įstaigose [12].

1.2.2. Vainikinių išlydžių tipai

Vainikiniai išlydžiai gali būti klasifikuojami į kelis tipus, remiantis jų savybėmis ir sąlygomis, kuriomis jie susidaro. Pagrindiniai vainikinio išlydžio tipai yra šie [14]:

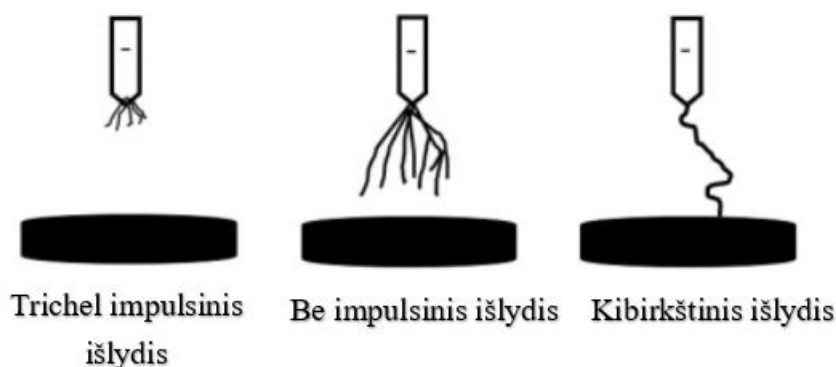
- **Vienpoliškas vainikinis išlydis** – išlydis vyksta tik vieno poliškumo įtampoje: arba teigiamoje, arba neigiamoje. Tokiu atveju elektrodas su aštresniu paviršiumi sukelia vainikinį išlydį, o kitas elektrodas yra neutralus [15]:
 - **Teigiamas vainikinis išlydis** – susidaro, kai teigiama įtampa yra taikoma elektrodams. Šiuo atveju, teigiami jonai formuojasi ir judėdami link neigiamo elektrodo, sukuria vainikinį išlydį. Šio tipo išlydžiui būdingas mažesnis švytėjimas ir stabilumas, palyginti su neigiamu vainikiniu išlydžiu [16].
 - **Neigiamas vainikinis išlydis** – susidaro, kai neigiama įtampa taikoma elektrodams. Neigiamu vainikiniu išlydžiu elektronai judėdami nuo neigiamo elektrodo link teigiamo, sukuria stipresnį švytėjimą ir išlydis paprastai būna stabilesnis nei teigiamas vainikinis išlydis [17].
- **Dvipoliškas vainikinis išlydis** – vyksta tarp dviejų elektrodų su priešingomis įtampomis. Abu elektrodai gali dalyvauti išlydžio formavime, todėl švytėjimas gali būti pastebimas abiejose elektrodų pusėse [18].
- **Pulsuojantis vainikinis išlydis** – yra charakterizuojamas periodiškais išlydžio impulsais. Šis tipas gali susidaryti, kai kintamos įtampos elektros laukas sukelia periodinius išlydžius. Pulsuojantys vainikiniai išlydžiai yra dažnai naudojami tam tikrose pramonės šakose dėl savo unikalių savybių [19].
- **Trumpasis vainikinis išlydis** – šis išlydžio tipas yra trumpalaikis ir paprastai įvyksta trumpuose aukštos įtampos impulsuose. Tokie išlydžiai gali būti naudojami tam tikrose diagnostikos ar analizės technologijose [20].

Teigiamo vainikinio išlydžio atveju aštraus smaigalio ir plokštumos elektrodo konfigūracijoje išlydžiai prasideda nuo impulsinio vainikinio išlydžio ir progresuoja į srautinį vainikinį išlydį, švytintį vainikinį išlydį ir kibirkštinį išlydį, didėjant taikomai įtampai kaip pavaizduota 2 paveiksle [13].



2 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio stadijos didėjant taikomai įtampai [13]

Neigiamos vainikinio išlydžio atveju toje pačioje geometrijoje pradinė forma yra Trichel impulsinis vainikinis išlydis, po kurios seka vainikinis išlydis be impulsų ir kibirkštinis išlydis, didėjant taikomai įtampai kaip pavaizduota 3 paveiksle [13].

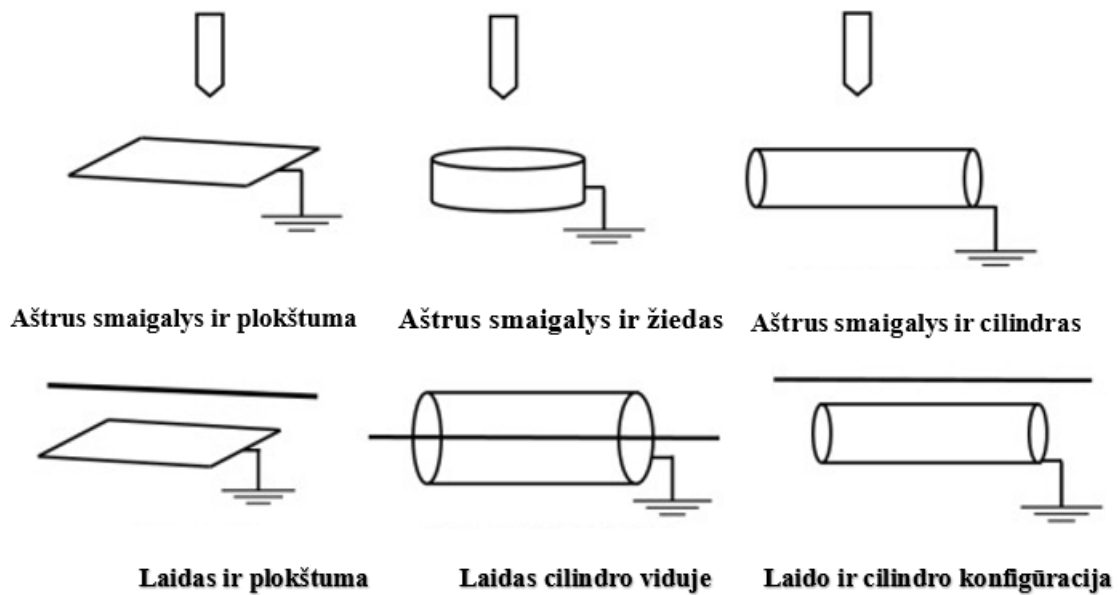


3 pav. Neigiamo vainikinio išlydžio stadijos didėjant taikomai įtampai [13]

Neigiamo vainikinio išlydžio pradinė startinė įtampa, kada prasideda vainikinis išlydis, yra mažesnė nei teigiamos, o įtampa, prie kurios vainikinis išlydis pereina į kibirkštinę iškrovą, yra didesnė neigiamo vainikinio išlydžio metu nei teigiamo vainikinio išlydžio atveju. Kitaip tariant, neigiamas vainikinis išlydis turi platesnį darbinį intervalą tarp pradžios startinės įtampos ir kibirkštinio išlydžio įtampų [13].

1.2.3. Elektrodo konfigūracijos

Vainikinio išlydžio elektrodo konfigūracija turi didelę įtaką išlydžio intensyvumui, vienodumui ir efektyvumui. Paprastai vainikinis išlydis atsiranda, kai vienas elektrodas turi mažą kreivumo spindulį (pvz.: viela, smaigalys), o kitas yra platus arba tolygiai paskirstytas (pvz.: plokštuma, cilindras). Įvairių rūšių elektrodo konfigūracijos, naudojamos vainikiniame išlydyje, pavaizduotos 4 paveiksle [13].



4 pav. Elektrodo konfigūracijos, naudojamos vainikiniame išlydyje [13]

- **Aštrus smaigalys ir plokštuma** – vienas elektrodas yra aštrus smaigalys arba adata, o kitas yra plokščias elektrodas. Ši konfigūracija naudojama jonizatoriuose ir įvairiose laboratorinėse aplikacijose, kur reikia sukurti koncentruotą elektrinį lauką mažame plote [21].
- **Aštrus smaigalys ir žiedas** – vienas elektrodas yra aštrus smaigalys, adata arba labai siauras ir smailus laidininkas, o kitas elektrodas yra žiedo formos laidininkas, kuris apsupa smaigalį. Aštraus smaigalio ir žiedo konfigūracija naudojama elektrostatiuose purkštuvuose, kur vainikinis išlydis padeda įkrauti purškiamas daleles, kurios tolygiai pasiskirsto dėl elektrostatiškų jėgų. Ši konfigūracija taip pat naudojama oro valymo sistemose, kur vainikinis išlydis padeda jonizuoti ir pašalinti ore esančias daleles. Aštraus smaigalio ir žiedo konfigūracija taip pat, gali būti naudojama įvairiuose jutikliuose ir matavimo prietaisuose, kur reikia tiksliai valdyti ir stebėti elektros lauką bei išlydžio charakteristikas [22].
- **Aštrus smaigalys ir cilindras** – vienas elektrodas yra aštrus smaigalys, adata arba labai siauras ir smailus laidininkas, o kitas cilindro formos elektrodas [23].
- **Laidas ir plokštuma** – vienas elektrodas yra laidas (laidininkas), o kitas yra plokščios formos elektrodas. Šios dvi formos elektrodai yra arti vienas kito ir sukuria elektrinį lauką tarp jų, kuris gali sukelti oro jonizaciją ir vainikinio išlydžio susidarymą. Ši konfigūracija gali būti naudojama oro valymo sistemose, kurios naudoja elektrinį lauką jonizacijai ir išvalymui. Laidas gali būti pajungtas prie oro tiekimo linijos, o plokštuma naudojama kaip neutralus elektrodas [24].
- **Laidas cilindro viduje** – vienas elektrodas yra laidas (laidininkas), kuris yra patalpintas cilindro viduje. Šis elektrodo santykis sukuria elektrinį lauką tarp jų, kuris gali sukelti oro jonizaciją ir vainikinio išlydžio susidarymą [25].

1.2.4. Vainikinio išlydžio susidarymas

Vainikinio išlydžio susidarymui reikalinga įtampa priklauso nuo įvairių veiksnių, įskaitant elektrodo formą, atstumą tarp elektrodo, aplinkos sąlygas ir dujų savybes. Tačiau yra tam tikri bendrieji principai ir įtampos dydžiai, kuriuos galima naudoti kaip orientyrus:

- **Elektrodų forma ir atstumas** – aštrūs elektrodai arba elektrodai su mažais kreivumo spinduliais leidžia susidaryti vainikiniam išlydžiui esant mažesnėms įtampoms, nes elektrinis laukas šiose vietose yra labiau koncentruotas. Pavyzdžiui, plonas adatos formos elektrodas gali sukurti vainikinį išlydį esant žemesnei įtampai nei lygiagretūs plokštieji elektrodai.
- **Aplinkos sąlygos** – atmosferos slėgis, temperatūra ir drėgmė taip pat turi įtakos vainikinio išlydžio susidarymui. Esant aukštesniam slėgiui, vainikinio išlydžio susidarymui reikalinga didesnė įtampa.
- **Dujų savybės** – vainikinio išlydžio įtampa taip pat priklauso nuo dujų tipo, kurios yra jonizuojamos. Pavyzdžiui, ore vainikinis išlydis paprastai susidaro esant žemesnei įtampai nei kitose dujose.

Bendroju atveju vainikinis išlydis ore gali susidaryti, kai įtampa yra nuo kelių iki keliolikos kV priklausomai nuo anksčiau minėtų veiksnių. Tikslus vainikinio išlydžio susidarymui reikalingos įtampos dydis gali skirtis. Jei norima tiksliau nustatyti vainikinio išlydžio susidarymui reikalingą įtampą konkrečiu atveju, reikia atsižvelgti į tikslus elektrodų parametrus ir aplinkos sąlygas, naudojant empirinį arba skaitmeninį modeliavimą [26].

1.3. Vainikinio išlydžio sukuriamas elektrinis vėjas

Vainikinis išlydis yra dažnas gamtos reiškinys, kuris dažnai atsiranda griaustinio proceso metu arba aukštos įtampos perdavimo linijose. Vainikinį išlydį paprastai lydi silpna alyvinė aureolė, šnypščiantis triukšmas ir ozono susidarymas. Be šių suvokiamai atpažįstamų reiškinių, oro srovė taip pat gali būti sukelta netoli vietos, kur įvyksta vainikinis išlydis, tačiau oro judėjimo greitis yra mažas, todėl jis nėra lengvai pastebimas ar juntamas. Oro srovė, kurią sukelia vainikinis išlydis, paprastai vadinama joniniu vėju, vainikinio išlydžio elektriniu vėju arba elektrohodinaminiu (EHD, angl. *Electro hydrodynamic*) oro srauto judėjimu [27].

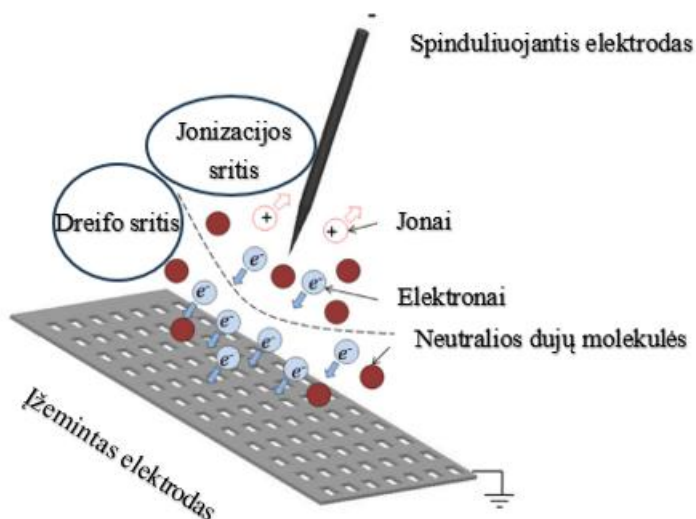
1.3.1. Vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo priešistorė

Ankstyviausi oficialūs vainikinio išlydžio elektrinio vėjo įrašai gali būti datuojami 1706 m., po to I. Niutonas ir W. Wilsonas tyrinėjo šį reiškinį ir bandė praktiškai panaudoti elektrinį vėją. Tačiau tuo metu jiems tiesiog trūko žinių ir technologijų, kad galėtų tai visiškai suprasti. 1959 m. G. Stuetzeris atliko teorinę elektrinės kūno jėgos analizę vainikinio išlydžio elektrinio vėjo generavimo metu. Tik 1961 m. Robinsonas atliko išsamų akademinį tyrimą ir preliminarų eksperimentinį vainikinio išlydžio elektrinio vėjo generavimo ir įtakos veiksnių tyrimą. Pastaraisiais dešimtmečiais mokslo institucijoms ir inžinerinėms bendruomenėms atlikus daugybę tyrimų, jos paslaptis pamažu atsiskleidė. Šiuo metu paprastai manoma, kad vainikinio išlydžio sukulto joninio vėjo reiškinys yra EHD efektas, kurį sukelia vainikinio išlydžio sukeltų įkrautų dalelių ir oro molekulių susidūrimas veikiant elektriniam laukui. Šio proceso esmė ir dėmesys yra elektros energijos ir skysčio mechaninės energijos konversija. Vainikinio išlydžio sukuriamas elektrinis vėjas buvo plačiai ištirtas daugelyje sričių. Pavyzdžiui, aviacijos srityje vainikinio išlydžio sukuriamas elektrinis vėjas vaidina svarbų vaidmenį slopinant oro srauto atskyrimą, didinant atakos stabdymo kampą ir orlaivio jėgos pakėlimą, skysčių valdymo aspektu. Vainikinio išlydžio sukuriamas elektrinis vėjas gali būti naudojamas elektroninių prietaisų ir komponentų konvekciniame oro šilumos išsklaidymui pagerinti. Aplinkos apsaugos srityje vainikinio išlydžio elektrinis vėjas gali būti naudojamas oro valymui, pvz.: dulkių šalinimui, sunkiųjų metalų šalinimui ir kt. Vainikinio išlydžio elektrinio vėjo pritaikymas maisto džiovinimui, gali pagreitinti vandens ir lakiųjų organinių junginių migraciją nuo maisto paviršių.

Vainikinio išlydžio elektrinio vėjo technologija taip pat naudojama degimo spartinimui ir išmetamųjų teršalų kiekio mažinimui, kurie yra susiję su didėjančiu susirūpinimu dėl taršos ir klimato kaitos [27].

1.3.2. Vainikinio išlydžio elektrinio vėjo generavimas

Vainikinio išlydžio elektrinio lauko erdvę galima suskirstyti į dvi sritis - jonizacijos sritį ir dreifo sritį, kaip parodyta 5 paveiksle [27].

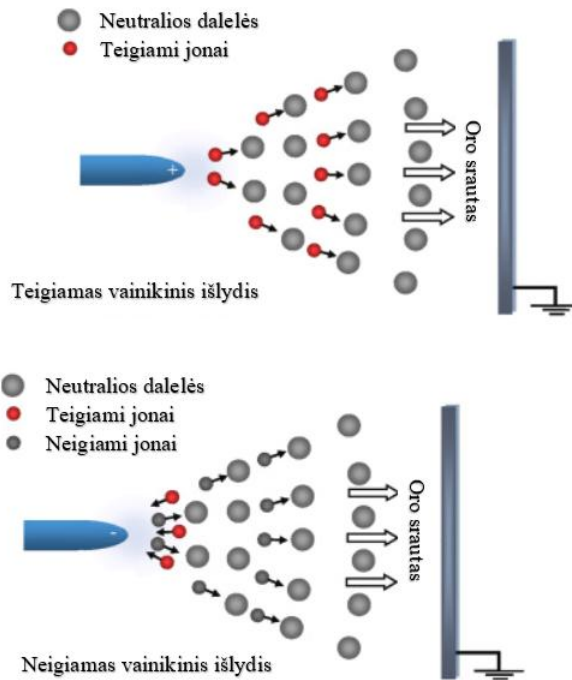


5 pav. Neigiamo vainikinio išlydžio elektrinio vėjo susidarymas [27]

Elektrinis laukas jonizacijos srityje yra stiprus, tačiau jis užima tik nedidelę erdvę ir greitai susilpnėja nuo spinduliuojančio elektrodo. Dėl neigiamos vainikinio išlydžio iškrovos, stipraus elektrinio lauko veikimo jonizacijos srityje, elektronai, iš spinduliuojančio elektrodo, greitai juda link žeminto elektrodo. Kai elektronai juda, jie susiduria su dujų atomais (arba molekulėmis), suskaidydami juos į teigiamus jonus ir elektronus. Šis procesas kartojamas nuosekliai, laisvos dalelės išleidimo erdvėje greitai padidėja, susidaro atomų lavina, o jonai ir elektronai sudaro papildomą skysčio (šiuo atveju – oro) judėjimą veikiant elektrinio lauko jėgai. Išlydis ir jonizacija įvyksta tik kelių milimetrų atstumu aplink spinduliuojantį elektrodą. Elektronų energija dreifo srityje yra per maža, kad jonizuotų oro molekules. Elektronai prisijungia prie dujų molekulių, sudarydami neigiamas jonų grupes ir veikiant elektrinio lauko jėgai, juda link žeminto elektrodo, kuris sukuria elektrinio vėjo šaltinį jonizacijos ir dreifo srities sandūroje. Teigiamo vainikinio išlydžio atveju elektronai kaupiasi prie anodo esant stipriam elektriniam laukui, susidaro neigiamas srautas, kuris juda link anodo. Fotonų judėjimas lenkia elektronų laviną, nes fotonų greitis yra daug didesnis nei elektronų, todėl judėjimo kryptimi vyksta stipri jonizacija ir sužadinimas, susidaro antrinė elektronų lavina. Teigiami jonai praeina per vainikinį sluoksnį ir juda į katodą, sukuriama teigiamas vainikinio išlydžio elektrinis vėjas.

1.3.3. Elektrinio vėjo susidarymo mechanizmo priklausomybė nuo poliarizacijos

Elektrinis vėjas gali būti generuojamas tiek teigiamajame tiek neigiamajame vainikiniame išlydyje, tačiau susidarymo mechanizmas kiekvienu atveju šiek tiek skiriasi. Elektrinio vėjo generavimas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio metu esant skirtingiems poliarumams pavaizduotas 6 pav. Taip pat, svarbu paminėti, kad tarp skirtingų elektrodų konfigūracijų, skirtų elektriniam vėjui generuoti, aštraus smaigalio ir plokštumos bei laido ir plokštumos konfigūracijos yra dažniausiai naudojamos dėl didesnio vėjo greičio, palyginti su kitomis konfigūracijomis [28].



6 pav. Elektrinio vėjo generavimas nuolatinės srovės vainikinio išlydžio metu esant skirtingiems poliarumams [28]

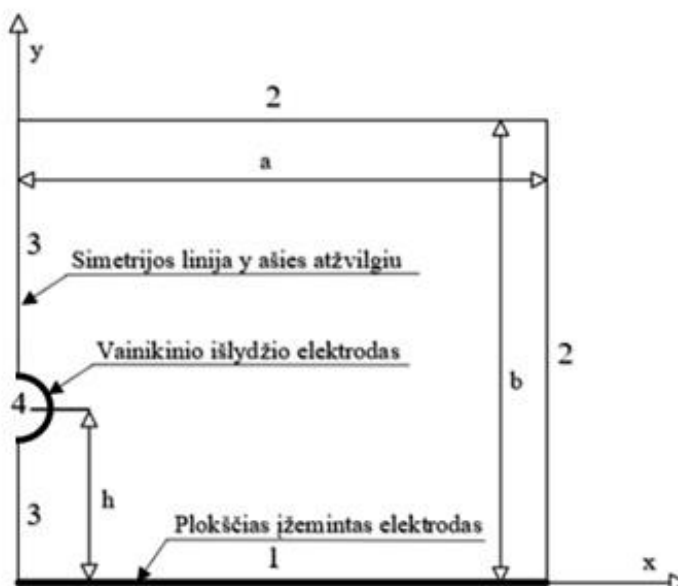
Teigiamo vainikinio išlydžio atveju elektrinis vėjas daugiausia generuojamas teigiamų jonų judėjimu. Intensyvus elektrinis laukas prie aštraus elektrodo jonizuoja oro molekules, sukeldamas teigiamų jonų susidarymą, kurie yra pagreitinami link neigiamai įkrauto elektrodo. Susidūrimai su neutraliais oro molekulėmis perduoda impulsą, sukurdami elektrinį vėją. Neigiamo vainikinio išlydžio atveju elektrinis vėjas daugiausia generuojamas neigiamų jonų judėjimu. Elektronai prie aštraus elektrodo yra pagreitinami, sukeldami jonizaciją ir neigiamų jonų susidarymą prisijungimo būdu. Šie jonai yra atstumti neigiamai įkrauto elektrodo ir pagreitinti link teigiamai įkrauto elektrodo. Susidūrimai su oro molekulėmis perduoda impulsą ir sukuria elektrinį vėją [28].

2. Matematinis modeliavimas

Vainikinio išlydžio ir elektrinio vėjo modeliavimui pasirinkau naudoti „COMSOL Multiphysics 6.2“ programinę įrangą. COMSOL Multiphysics yra pažangi modeliavimo ir simuliacijos programinė įranga, kuri leidžia spręsti įvairius inžinerinius ir mokslinius uždavinius, remiantis fizikiniais dėsniais. Comsol Multiphysics programa puikiai tinka modeliuoti vainikinį išlydį bei elektrinį vėją, dėl jos galimybės apjungti skirtingus fizikinius reiškinius: elektrostatiką, plazmos fiziką, skysčių dinamiką bei dalelių judėjimą.

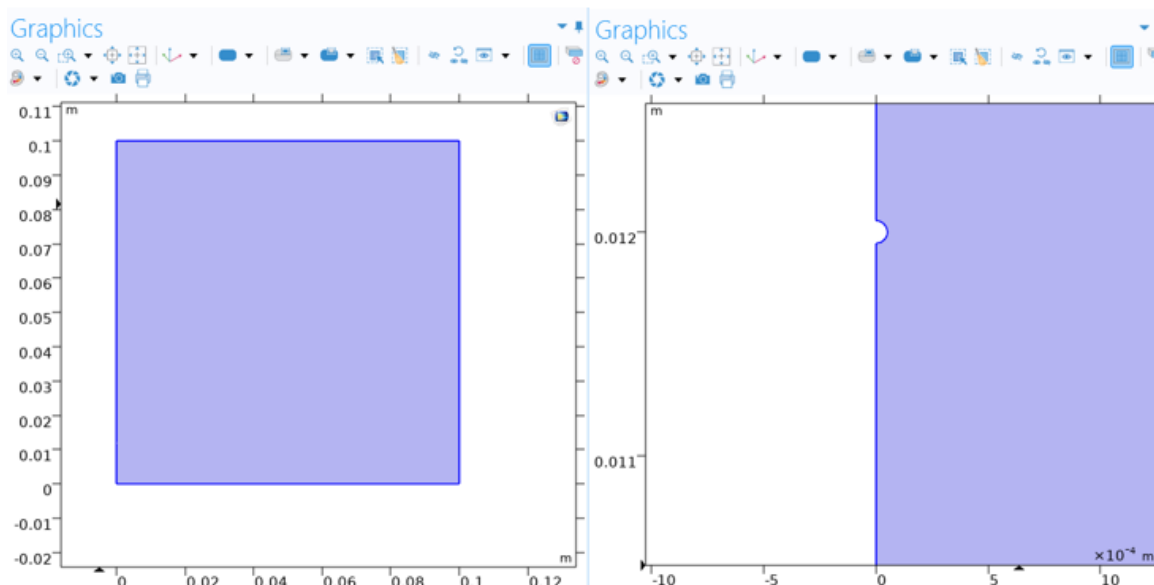
2.1. Modelio geometrija

Modeliavimui naudojama dvimatė (2D) geometrija, sudaryta iš dviejų pagrindinių elektrodų: vainikinio išlydžio elektrodo (aukštos įtampos elektrodas) ir plokščio įžeminto elektrodo. Kitaip tariant, pasirinkta naudoti laido – plokštumos (1.2.3 skyrelis) elektrodo konfigūracija. Modelio geometrija pavaizduota 7 pav. Modeliuojant vainikinio išlydžio elektrodą, dėl geometrinės simetrijos y ašies atžvilgiu yra pasirenkama atvaizduoti tik pusę elektrodo. Tai leidžia sumažinti skaičiavimo apimtį ir padidina modeliavimo efektyvumą, tuo pačiu neprarandant rezultatų tikslumo, nes elektrinio lauko pasiskirstymas ir kiti susiję fizikiniai reiškiniai išlieka simetriški kitos pusės atžvilgiu.



7 pav. Vainikinio išlydžio modeliavimo geometrija

Modelio geometriją sudaro kvadrato formos sritis, kurios matmenys yra $a = b = 100$ mm, ši sritis apibrėžia bendrą modelio darbinę erdvę, kurioje analizuojamas vainikinis išlydis. Vainikinio išlydžio spindulys $r_0 = 0,05$ mm, elektrodo aukštis virš plokščio įžeminto elektrodo $h = 12$ mm. Kvadrato formos sritis, kurios matmenys yra $a = b = 100$ mm suteikia pakankamai erdvės, kad būtų tinkamos ribinės sąlygos. Toli nuo elektrodo dažniausiai taikoma nulinio potencialo sąlyga, tačiau jei geometrija būtų per maža, ši sąlyga būtų per arti elektrodo ir iškraipytų rezultatą. 100×100 mm atstumas yra dažnai pakankamas, kad elektrinis laukas sumažėtų iki nereikšmingų verčių bei būtų užtikrinamas kompromisas tarp tikslumo ir skaičiavimo išteklių.

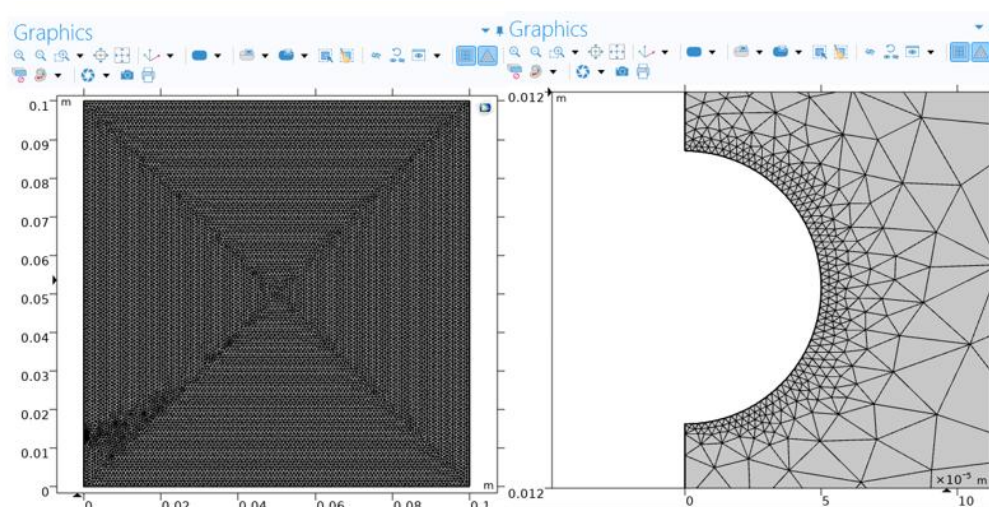


8 pav. „COMSOL Multiphysics 6.2“ sukurta vainikinio išlydžio modelio geometrija

8 pav. kairėje pusėje pavaizduota bendra vainikinio išlydžio modelio geometrinė erdvė, kuri yra kvadrato formos. Dešinėje paveikslėlio pusėje pavaizduotas išdidintas modelio fragmentas, kuriame matoma detalesnė vainikinio išlydžio elektrodo simetrinė kraštinė su smulkesne geometrine struktūra.

2.2. Tinklelio generavimas

Tinklelio (angl. mesh) generavimas yra labai svarbus etapas, tiesiogiai lemiantis skaičiavimo tikslumą ir efektyvumą. Sprendžiant vainikinio išlydžio uždavinius „COMSOL Multiphysics 6.2“ programoje dažniausiai reikia spręsti elektrostatinis ir jonų pernašos uždavinius, kurių sprendinių gradientai būna ypač dideli prie elektrodo paviršių (adatų, laidų, aštrių kampų). Todėl tinklelio tankumas ir kokybė turi tiesioginę įtaką rezultatų tikslumui, konvergavimo greičiui, skaičiavimo trukmei ir stabilumui. Ypač tankus tinklelis formuojamas aplink vainikinio išlydžio elektrodą, kur vyksta intensyviausias vainikinis išlydis ir didžiausias elektrinio lauko gradientas. Tolstant nuo vainikinio išlydžio elektrodo tinklelis gali būti retesnis, taip sumažinant skaičiavimo apimtį. Modelyje naudojamas baigtinių elementų tinklelis pavaizduotas 9 paveikslėlyje.



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

2.3. Elektrinio lauko skaičiavimas

„COMSOL Multiphysics 6.2“ programinėje įrangoje vainikinio išlydžio modeliavimas pradedamas sprendžiant elektrostatikos lygtis. Naudojamas elektrostatikos sąsaja (angl. *Electrostatics*). Elektrostatikos fizikinėje sąsajoje sprendžiama Poissono lygties forma, užrašyta per elektrinį poslinkio vektorių D :

$$\nabla D = \rho_v \quad (3)$$

kur $D = \varepsilon E$;

ε – medžiagos elektrinė svarba;

E – elektrinis lauko stipris;

ρ_v – erdvinis krūvio tankis.

Medžiagos elektrinė skvarba lygi:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (4)$$

kur ε_r – santykinė skvarba;

ε_0 – elektrinė skvarba vakuume $\approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Oro santykinė skvarba $\varepsilon_r \approx 1,0006$, todėl darome prielaidą, kad $\varepsilon_r = 1$, tuomet elektrinis poslinkio vektorius D lygus:

$$D = \varepsilon_0 E \quad (5)$$

Elektrinio lauko vektorių E lygus:

$$E = -\nabla V \quad (6)$$

kur V – elektrinis potencialas, V;

∇ – potencialo gradientas.

Elektrinio lauko vektorius E yra neigiamas elektrinio potencialo V gradientas. Elektrinis laukas E nukreiptas link mažėjančio potencialo t. y. iš teigiamo potencialo zonos į neigiamą, todėl į formulę įtraukiamas neigiamas ženklas. Toliau „COMSOL Multiphysics 6.2“ programinėje įrangoje vainikinio išlydžio modeliavimas tęsiamas sprendžiant krūvio pernašos uždavinį. Naudojamas krūvio pernašos sąsaja (angl. *Charge Transport*), kuri naudojama modeliuojant, kaip vainikinio išlydžio metu susidarę krūviai juda elektriniame lauke. Sprendžiamos lygtys:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (7)$$

ir

$$J = z_q \mu_i \rho E \quad (8)$$

kur J – krūvininkų srovės tankis;

z_q – krūvio ženklas;

μ_i – jonų judris;

ρ – erdvinis krūvio tankis;

E – elektrinis lauko stipris.

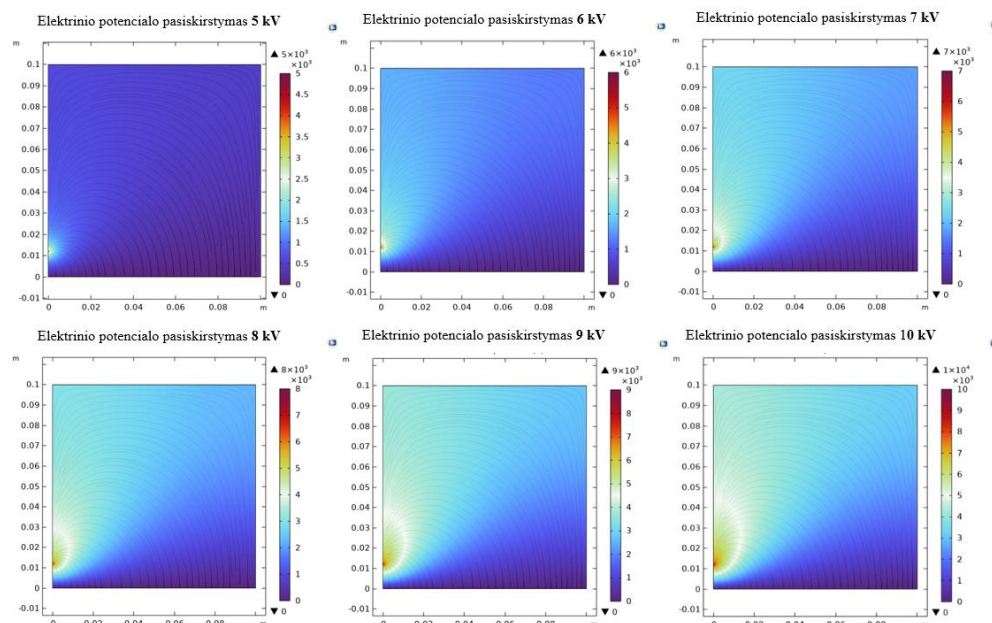
z_q – krūvio ženklas pasirenkamas pagal tai, koks vainikinis išlydis modeliuojamas t.y. ar neigiamas, ar teigiamas. Teigiamo vainikinio išlydžio modeliavimo atveju +1, neigiamo vainikinio išlydžio atveju -1. μ_i – jonų judris visiems skaičiavimams laikomas $2,39 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ teigiamo vainikinio išlydžio atveju ir $1,71 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ neigiamo vainikinio išlydžio atveju [3].

2.3.1. Kraštinės (ribinės) sąlygos

Atliekant vainikinio išlydžio elektrinio lauko modeliavimą, kraštinės (ribinės) sąlygos yra labai svarbios, nes jos lemia elektrinio lauko pasiskirstymą, erdviųjų krūvių elgseną ir bendrą modeliavimo sistemos rezultata. 2.1 poskyryje 7 pav. pavaizduota vainikinio išlydžio modeliavimo geometrija, 1 numeriu pažymėta riba – žemintas plokščiasis elektrodas, kurio ribinė sąlyga: įtampa nustatyta kaip nulis, $V = 0$. 2 numeriu pažymėta riba – atvira riba, aplinkos sritis (modelio kraštas), kurios ribinė sąlyga: atvira tiek įtampai, tiek erdviniam krūviui, leidžia elektriniam laukui ir krūviams "išeiti" iš skaičiavimo srities, $D = 0$, elektrinė poslinkio vektoriaus divergencija yra lygi nuliui, $\nabla \cdot D = 0$. 3 numeriu pažymėta riba – simetrijos ašis, kurios ribinė sąlyga: elektrinis srautas per paviršių lygus nuliui, $D = 0$. 4 numeriu pažymėta riba – vainikinio išlydžio elektrodas, vainikinį išlydį generuojantis elektrodas (laidas), kurios ribinė sąlyga įtampai: nustatoma įtampa $V = u$, kuri viršija vainikinio išlydžio slenkstį, ribinė sąlyga erdviniam krūviui: erdvinio krūvio tankis paskirstomas pagal kosinuso dėsnį, kad elektrinio lauko stipris elektrodų paviršiuje būtų pastovus.

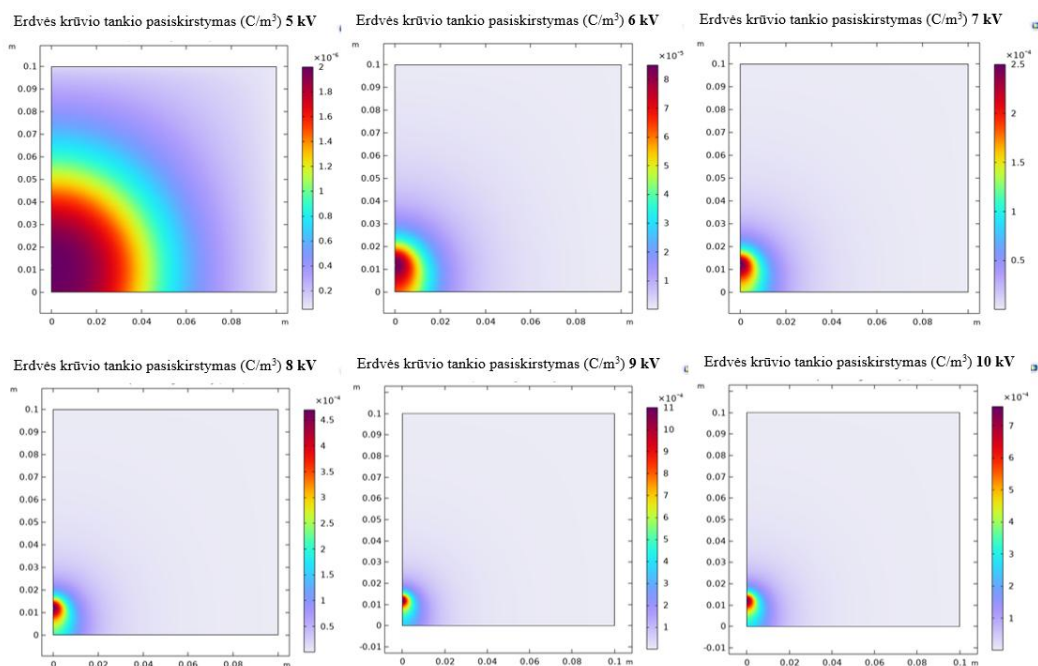
2.3.2. Elektrinio lauko skaičiavimo rezultatai

Elektrinio potencialo pasiskirstymas erdvėje prie skirtingų bandymo įtampų pavaizduotas 10 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas erdvėje priklauso nuo taikomos įtamos dydžio – prie mažesnių įtampų (pvz.: 5 kV) potencialas koncentruojasi tik aplink elektrodą, o tolimesnėse srityse išlieka labai mažas. Didėjant įtampai nuo 6 kV iki 10 kV, potencialas tampa tolygesnis visoje erdvėje virš elektrodo – tai rodo stiprėjantį elektrinį lauką ir didesnę krūvio tankį. Pastebima aiški sąsaja tarp įtamos ir elektrinio lauko intensyvumo – kuo didesnė įtampa, tuo stipresnis ir toliau veikiantis elektrinis laukas susidaro.



10 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas erdvėje 5 kV - 10kV

11 paveikslėlyje pateikti vainikinio išlydžio modeliavimo rezultatai, rodantys erdvinio krūvio tankio pasiskirstymą 2D geometrijoje, esant skirtingoms įtampoms nuo 5 kV iki 10 kV. Didėjant įtampai nuo 5 kV iki 10 kV, erdvinio krūvio tankis sparčiai auga, tai rodo didėjantį jonizacijos intensyvumą ir lauko stiprį. Prie 5 kV matomas platus krūvio pasiskirstymas, kuris rodo difuzinį vainikinį išlydį. Prie didesnių įtampų (nuo 6 kV) matome lokalizuotą, intensyvių krūvio telkinį – tai rodo labiau koncentruotą išlydžio zoną, kurioje elektrinis laukas pakankamas intensyviai jonizacija. Tarp 5 ir 6 kV riboje pasireiškia staigus krūvio tankio padidėjimas, todėl galima teigti, kad ~5 kV yra slenkstinė įtampa vainikiniam išlydžiui prasidėti arba kritinė įtampa vainikinio išlydžio iniciacijai. Būtent šioje riboje pasireiškia staigus krūvio tankio padidėjimas, todėl galima teigti, kad ~6 kV yra slenkstinė įtampa vainikiniam išlydžiui prasidėti.



11 pav. Erdvinio krūvio tankio pasiskirstymas erdvėje 5 kV – 10 kV

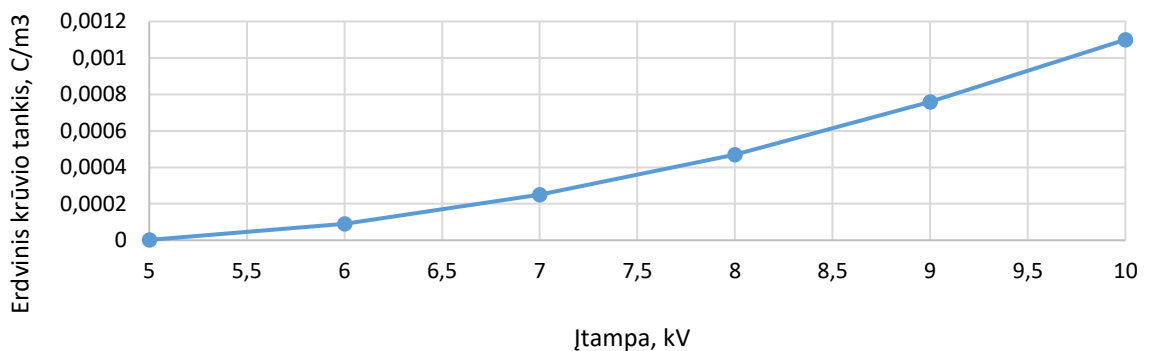
1 lentelė. Krūvio tankio prie elektrodo paviršiaus priklausomybė nuo įtampos

Įtampa, kV	Erdvinis krūvio tankis, C/m ³
5	0,000002
6	0,00009
7	0,00025
8	0,00047
9	0,00076
10	0,0011

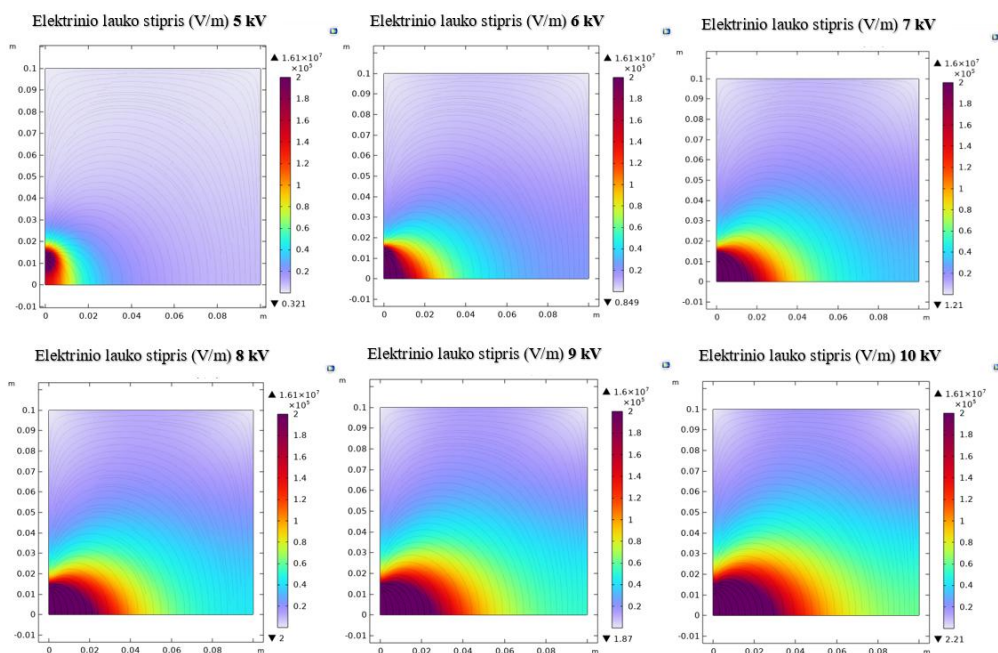
12 paveiksle pavaizduota erdvinio krūvio tankio (C/m³) prie elektrodo paviršiaus priklausomybė nuo taikomos įtampos (kV). Esant 5 kV įtampai, erdvinis krūvio tankis praktiškai nulinis arba artimas nuliui, nes vainikinis išlydis pradeda formuotis, nesiformuoja iki 4870 V. Didinant įtampą erdvinis krūvio tankis didėja dėl elektrodo paviršiuje susidariusio stipresnio elektrinio lauko. Kai elektrinis laukas pasiekia arba viršija kritinę vertę, dujų molekulės ima jonizuotis. Kuo stipresnis laukas, tuo didesnė dalis dujų molekulių gali būti jonizuota, ir tuo daugiau jonų bei elektronų susidaro. Kai lauko stiprumas didėja, elektronai, pagreitinti stipraus elektrinio lauko, įgyja pakankamą kinetinę energiją,

kad galėtų jonizuoti dujų molekules, vykstant vadinamajai smūginei jonizacijai. Padidėjus įtampai, elektronų energijos pakanka intensyviau jonizuoti aplinkines dujų molekules, todėl susidaro daugiau įkrautų dalelių. Intensyvėjant jonizacijai, pradeda vykti papildomi jonizacijos procesai, tokie kaip antrinių jonų generavimas dėl susidūrimų ir fotonų išspinduliavimas, kuris taip pat gali sukelti papildomą jonizaciją aplinkinėje erdvėje. Tai dar labiau padidina erdvinį krūvio tankį. Didinant įtampą plečiasi ir aktyvi jonizacijos zona, kurioje vyksta intensyvūs jonizacijos procesai, todėl daugiau jonų ir elektronų kaupiasi platesniame tūryje šalia elektrodo paviršiaus, kas didina bendrą erdvinio krūvio tankį. Vykstant vainikiniam išlydžiui, susidarę jonai modifikuoja elektrinio lauko pasiskirstymą – erdvinis krūvis stiprėja, o tai keičia elektrinio lauko konfigūraciją: ties elektrodo laukas silpnėja, tačiau toliau nuo elektrodo gali susidaryti stipresnis laukas, kuris skatina tolesnę jonizaciją. Toks teigiamo grįžtamojo ryšio mechanizmas lemia spartų krūvio tankio didėjimą didinant įtampą. Padidėjusi įtampa lemia didesnį elektrinio lauko stiprumą, kuris intensyvina jonizaciją, antrinių jonų generaciją ir skatina išlydžio zonos plėtrą. Visi šie procesai lemia ženklų erdvinio krūvio tankio didėjimą vainikinio išlydžio metu. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas ant elektrodo paviršiaus didėjant įtampai nuo 5 kV iki 10 kV pavaizduotas 13 paveikslėlyje.

Erdvės krūvio tankis prie vainikinio išlydžio elektrodo esant skirtingoms įtampoms

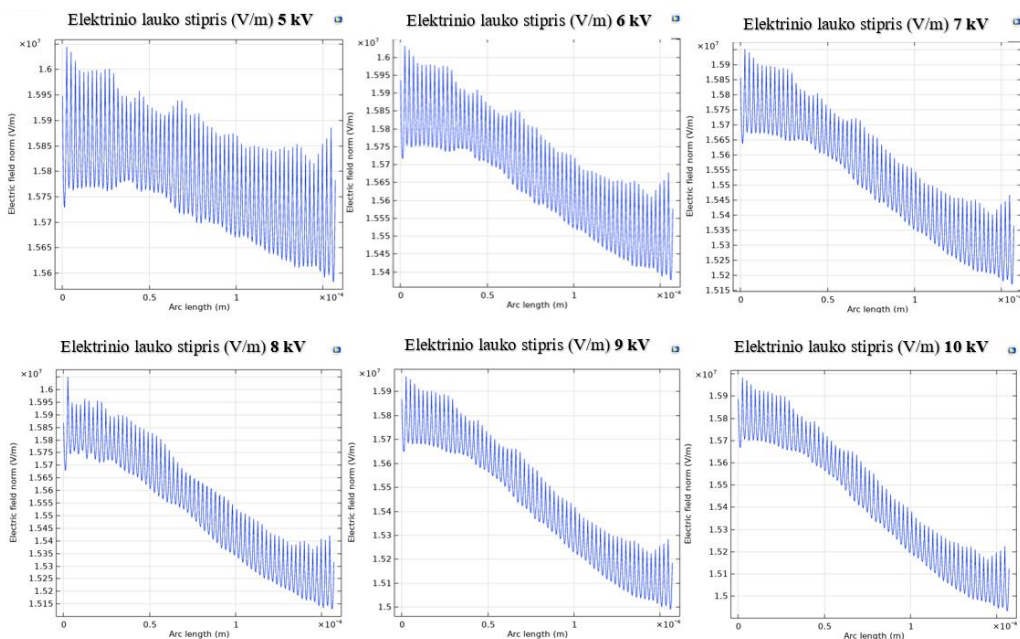


12 pav. Erdvės krūvio tankis prie vainikinio išlydžio elektrodo esant skirtingoms įtampoms



13 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas erdvėje esant įtampai 5 – 10 kV

Atliekant matematinį modeliavimą vainikinio išlydžio elektrodo erdvinio krūvio tankį pasirenkame tokį, jog stebint elektrinio lauko stiprio maksimalią vertę ji būtų artima pagal Peek'ο formulę (1) apskaičiuotą reikšmę $E_{peek} = 15,88 \cdot MV/m$, tačiau jos neviršytų. Pasirinktos erdvinio krūvio tankio vertės tenkinančios sąlygą $E_{peek} = 15,88 \cdot MV/m$ pateiktos 1 lentelėje. 14 paveikslėlyje pavaizduotas elektrinio lauko stiprio kitimas ant vainikinio išlydžio elektrodo paviršiaus prie skirtingų modeliavimo įtampų, visais modeliavimo atvejais elektrinio lauko stipris yra mažesnis už E_{peek} . Iš šio grafiko sprendžiame, kokį krūvio tankį parinkti prie esančios įtampos. Krūvio tankiui didėjant elektrinis lauko stipris aplink vainikinio išlydžio elektrodą mažėja ir atvirkščiai, krūvio tankiui mažėjant – elektrinis lauko stipris didėja.



14 pav. Elektrinio lauko stiprio kitimas ant vainikinio išlydžio elektrodo paviršiaus 5 – 10 kV

2.4. Elektrinio vėjo srauto skaičiavimas

Norint apskaičiuoti vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo srauto greitį „COMSOL Multiphysics 6.2“ programine įranga reikia apjungti keletą fizikinių sąsajų:

1. Elektrostatikos sąsaja
2. Krūvio pernašos sąsaja
3. Sluoksninio tekėjimo (angl. *Laminar Flow*) sąsaja

Pirmosios dvi sąsajos aprašytos 2.3 poskyryje. „COMSOL Multiphysics 6.2“ programinėje įrangoje sluoksninio tekėjimo sąsajoje sprendžiamos Navjė–Stokso lygtis, aprašančios impulsų tvermės dėsnį. Stacionarios būsenos atveju taikomos šios dvi pagrindinės lygtys:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (9)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (10)$$

kur ρ – skysčio tankis;
 u – greičio vektorius;
 p – slėgis;

I – vienetinė matricos forma;
 K – klampos įtempių tenzorius;
 F – tūrinių jėgų (EHD) vektorius.

Skaičiuojant pagrindinis dėmesys skiriamas elektrinio vėjo formavimuisi, o ne išsamiam srauto mechanikos teoriniam nagrinėjimui, todėl naudojama supaprastinta išraiška:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = F \quad (11)$$

Sekantis svarbus momentas – sukuriamos jėgos aprašymas:

$$F = \rho_0 \cdot E \quad (12)$$

kur ρ_0 – erdvinis krūvio tankis, gautas iš krūvio pernašos sąsajos;
 E – elektrinis lauko stipris, gautas iš elektrostatikos sąsajos.

Taigi, gaunama supaprastinta Navjė–Stokso išraiška:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \rho_0 E \quad (13)$$

kur ρ – oro tankis;
 u – oro greičio vektorius;
 ρ_e – erdvinio krūvio tankis;
 E – elektrinis lauko stipris.

2.4.1. Kraštinės (ribinės) sąlygos

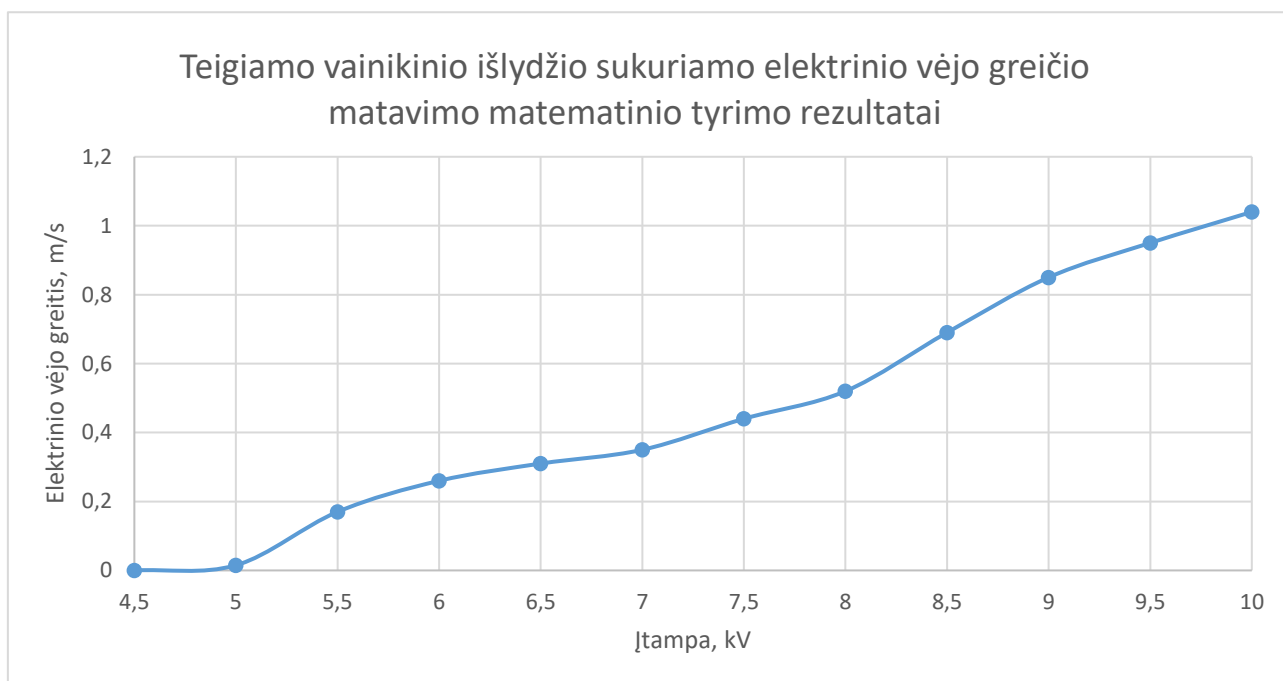
Atliekant vainikinio elektrinio vėjo srauto modeliavimą, kraštinės (ribinės) sąlygos yra labai svarbios, nes jos nustato fizikinę sąveiką su elektrodais ir modelio geometrijos sienelėmis. 2.1 poskyryje 7 pav. pavaizduota vainikinio išlydžio modeliavimo geometrija, 1 numeriu pažymėta riba – sienelė, su kuria sąveikauja oro srautas, kurio ribinė sąlyga: be slydimo (angl. *No slip*), matematiškai tai reiškia, kad oro srauto greitis prie sienelės yra lygus nuliui $u = 0$. Ši sąlyga yra standartinė skysčių mechanikos sąlyga, kuri reiškia, kad sienelė „prilaiko“ oro srautą, t. y. oro greitis prie sienelės tampa nulinis. 2 numeriu pažymėta riba – tai yra atidaryta (neuždara) srauto riba, per kurią oras gali laisvai tekėti į arba iš modelio geometrijos ribų, $n \cdot \sigma = 0$, normalus paviršinis įtempis per šią ribą yra lygus nuliui – t. y. kraštas yra atviras ir nesukelia jokio pasipriešinimo srautui. 3 numeriu pažymėta riba – simetrijos ašis, kurios ribinė sąlyga: $u \cdot n = 0$, oro srautas neįteka ir neišteka per šią ribą.

2.4.2. Elektrinio vėjo srauto skaičiavimo rezultatai

2 lentelėje ir 15 pav. grafike pateikti teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio priklausomybės nuo įtampos matematinio tyrimo rezultatai. Modeliuojant gauti elektrinio vėjo greičio duomenys rodo, kad, esant žemesnei nei 5 kV įtampai, elektrinis vėjas nesusidaro, t. y. greitis lygus nuliui, nes vainikinis išlydis dar neprasidėjęs, įtampa nesiekia išlydžiui būtino slenksčio. Viršijus 5 kV įtampą, elektrinio vėjo greitis sparčiai auga. Nuo 5,5 kV iki 10 kV elektrinio vėjo greitis padidėja nuo 0,17 m/s iki 1,04 m/s. Grafike aiškiai matyti eksponentinis kilimas – tai tipiška priklausomybė vainikinio išlydžio sukuriamam elektriniam vėjui, nes greitis stipriai priklauso nuo elektrinio lauko stiprio, kuris auga didėjant įtampai. Matematinio modeliavimo rezultatai patvirtina, kad elektrinio vėjo greitis tiesiogiai priklauso nuo elektrodų įtampos.

2 lentelė. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matematinio tyrimo rezultatai

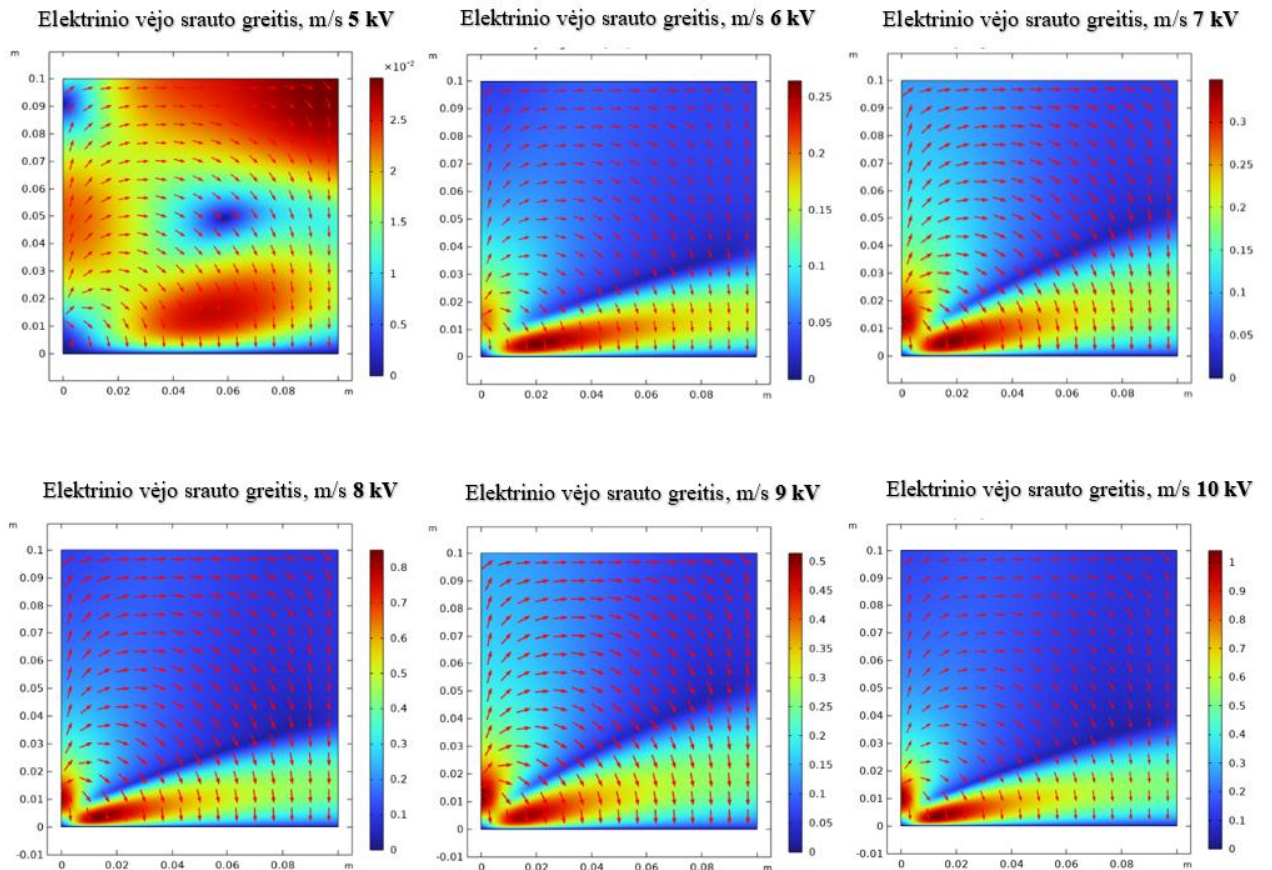
Įtampa, kV	Elektrinio vėjo srauto greitis, m/s
4,5	0
5	0
5,5	0,17
6	0,26
6,5	0,31
7	0,35
7,5	0,44
8	0,52
8,5	0,69
9	0,85
9,5	0,95
10	1,04



15 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio tyrimo rezultatai

16 pav. pateikti elektrinio vėjo srauto greičio vektoriniai pasiskirstymai modeliuojant teigiamą vainikinį išlydį prie skirtingų įtampų – nuo 5 kV iki 10 kV. Spalvinė skalė žymi elektrinio vėjo greitį (m/s), o rodyklės – srauto kryptį bei intensyvumą. Esant 5 kV įtampai, matomas itin silpnas srautas, o elektrinio vėjo greitis siekia vos $\sim 10^{-4}$ m/s. Šiame režime vainikinis išlydis dar nėra pilnai susiformavęs, todėl EHD srautas yra labai silpnas ir chaotiškas. Srauto vektoriai rodo besisukančią struktūrą, būdingą pradiniam jonų pasiskirstymui, kai dar nėra dominuojančios krypties. Padidinus įtampą iki 6 – 7 kV, srautas tampa kryptingesnis ir formuojasi aiški vertikali judėjimo struktūra nuo vainikinio elektrodo (laido) link įžemintos plokštumos. Greitis padidėja iki 0,2 – 0,4 m/s, o srauto intensyvumas labiausiai koncentruotas šalia vainikinio elektrodo. Tolimesnis įtampos padidinimas (8 – 10 kV) sukelia reikšmingą elektrinio vėjo sustiprėjimą. Maksimalus greitis prie 10 kV pasiekia apie

1 m/s. Pastebima, kad didėjant įtampai, didėja ir srauto pasiskirstymo zona: aukštesnė įtampa lemia didesnę aktyvaus vėjo sritį, apimančią vis didesnę modeliujamo tūrio dalį. Taigi, didėjanti įtampa lemia ne tik didesnę elektrinio vėjo greitį, bet ir ryškesnę srauto kryptingumą. Tokie rezultatai patvirtina, kad vainikinio išlydžio sukelti EHD srautai yra tiesiogiai priklausomi nuo įtampos dydžio, o jų struktūra kinta nuo lokaliai netvarkingos iki globaliai kryptingos.



16 pav. Elektrinis vėjo srauto greitis 5 – 10 kV

3. Eksperimentinis tyrimas ir matematinio modeliavimo palyginimas

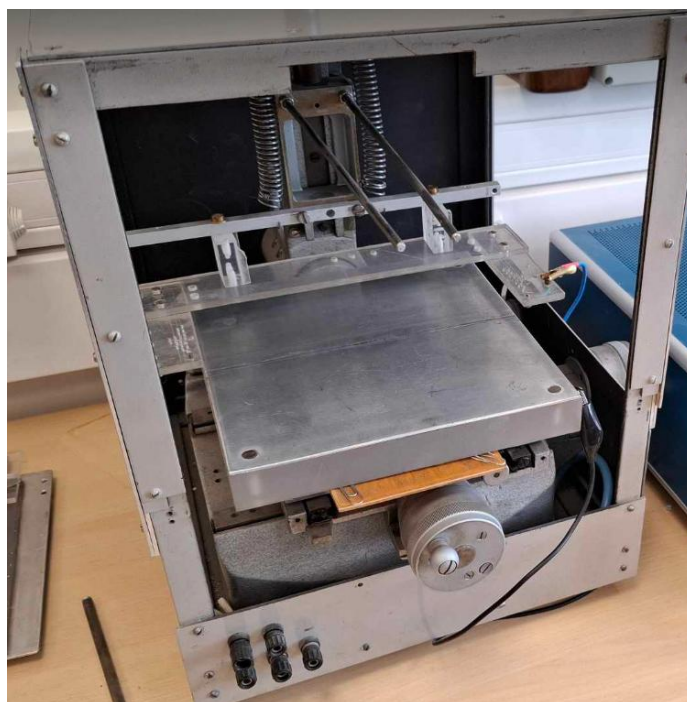
3.1.1. Matavimo įranga

Eksperimentinio tyrimo metu buvo naudojamas reguliuojamas aukštos įtampos nuolatinės srovės šaltinis „HCP 35-20000“, skirtas naudoti moksliniuose, pramoniniuose ar technologiniuose procesuose, kuriems reikalinga stabili ir tiksli aukšta įtampa. Jis priklauso HCP (angl. *High Current Power*) serijai ir yra pritaikytas dirbti su aukšta srove bei įtampa, užtikrinant patikimą veikimą net ir esant didelėms apkrovoms. Tyrimo metu naudotas reguliuojamas aukštos įtampos nuolatinės srovės šaltinis pateiktas 17 paveikslėlyje.



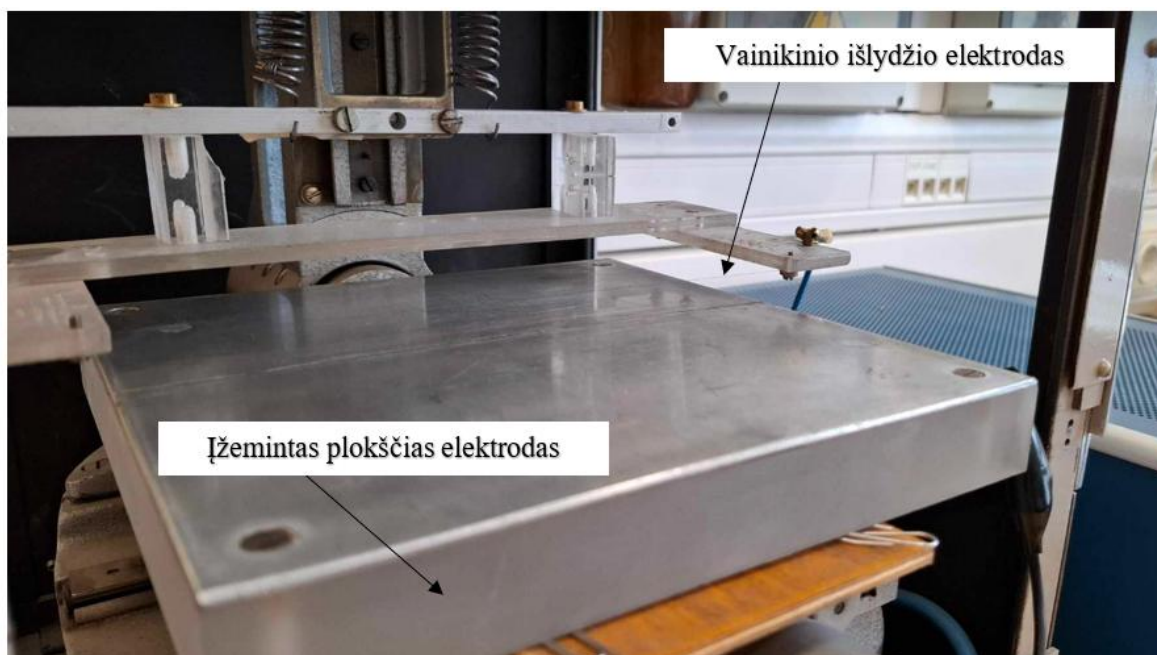
17 pav. Reguliuojamas aukštos įtampos nuolatinės srovės šaltinis „HCP 35-20000“

18 pav. pavaizduotas eksperimentinis stendas, skirtas elektriniams išlydžiams tirti, pavyzdžiui, vainikiniam arba paviršiniam išlydžiui. Virš metalinės įžemintos plokštės yra elektrodas (0,005 cm spindulio laidininkas), pritvirtintas prie izoliacinių laikiklių. Metalinė plokštė naudojama kaip įžeminimo elektrodas, tarp kurio ir elektrodo sukuriama aukštos įtampos elektrinis laukas, sukeliantis išlydžius.



18 pav. Eksperimentinis stendas, skirtas elektriniams išlydžiams tirti

19 pav. pavaizduotas priartintas eksperimentinio stendo vaizdas. Paveikslėlyje matoma laido – plokštumos elektrodų konfiguracija, vainikinio išlydžio elektrodas yra plonas (0,005 cm spindulio) laidininkas, plokštumos elektrodas yra plokščias įžemintas elektrodas.



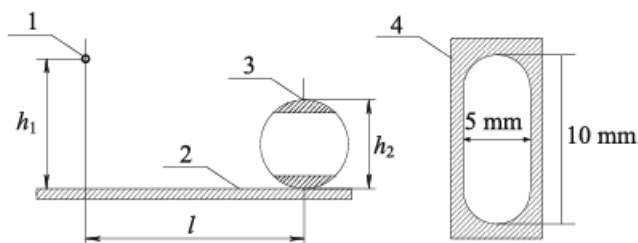
19 pav. Priartintas eksperimentinio stendo vaizdas

Taip pat, eksperimentinio tyrimo metu buvo naudojamas multifunkcinis matavimo prietaisas termo – anemometras. Jis dažniausiai naudojamas oro srautui (greičiui), temperatūrai ir kartais drėgmei matuoti. 20 paveiksle matomas rankinis termo – anemometras su išoriniu jutikliu (zondą), kuris leidžia atlikti matavimus sunkiai prieinamose vietose. Prietaiso ekrane rodomi matavimo rezultatai, pvz.: oro greitis m/s, temperatūra °C ir kt.



20 pav. Multifunkcinis matavimo prietaisas termo – anemometras

Modelio eksperimentinis patikrinimas atliktas matuojant EHD oro srauto greitį termo – anemometru. Eksperimentinė schema pateikta 21 pav. Termo – anemometro jutiklis nutolęs $l = 55$ mm atstumu nuo simetrijos ašies, siekiant kiek įmanoma sumažinti jo įtaką vainikinio išlydžio elektriniam laukui ir oro srauto pasiskirstymui. 21 paveiksle 1 numeriu pažymėtas vainikinio išlydžio elektrodas (laidas), 2 numeriu pažymėta įžeminta plokštė, 3 numeriu pažymėtas termo – anemometras. 4 numeriu pažymėta termo – anemometro jutiklio anga parodyta 21 pav. dešinėje.



21 pav. Eksperimentinė schema EHD oro srauto greičiui matuoti

Eksperimentinis stendas EHD oro srauto greičiui matuoti laido – plokštumos elektrodų sistemoje pavaizduotas 22 pav.



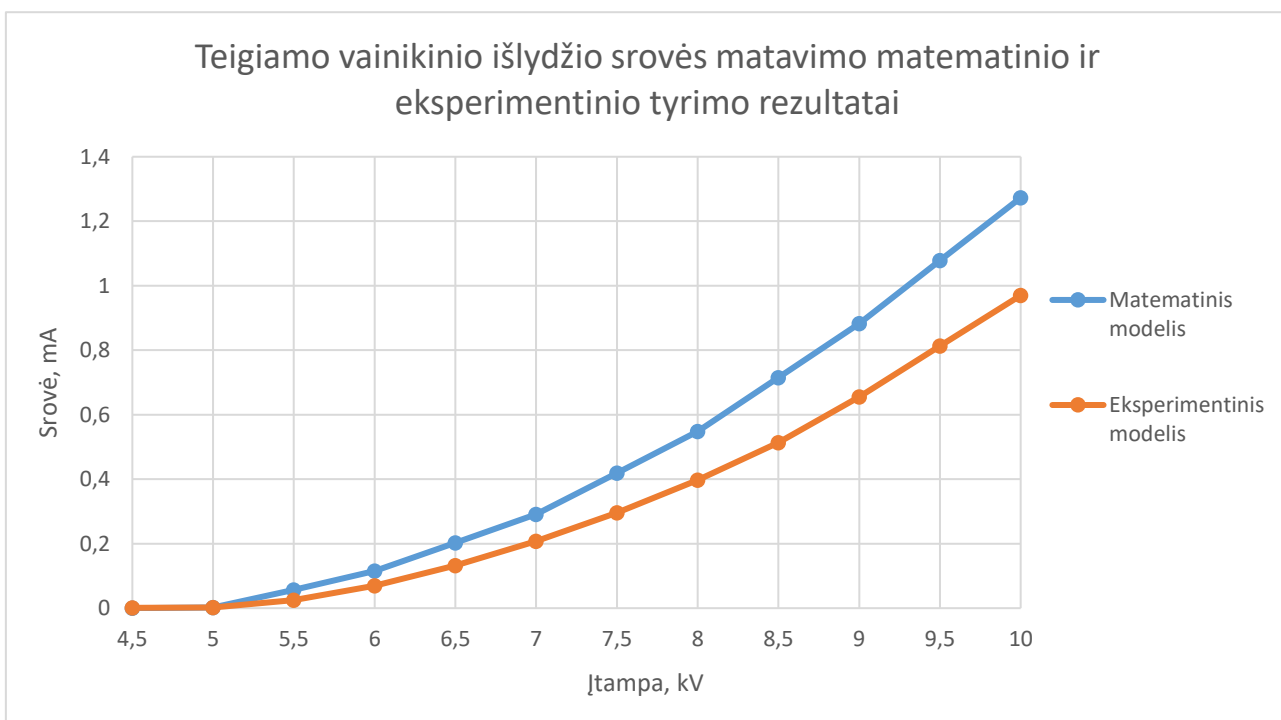
22 pav. Eksperimentinis stendas EHD oro srauto greičiui matuoti

3.1.2. Matavimo rezultatai

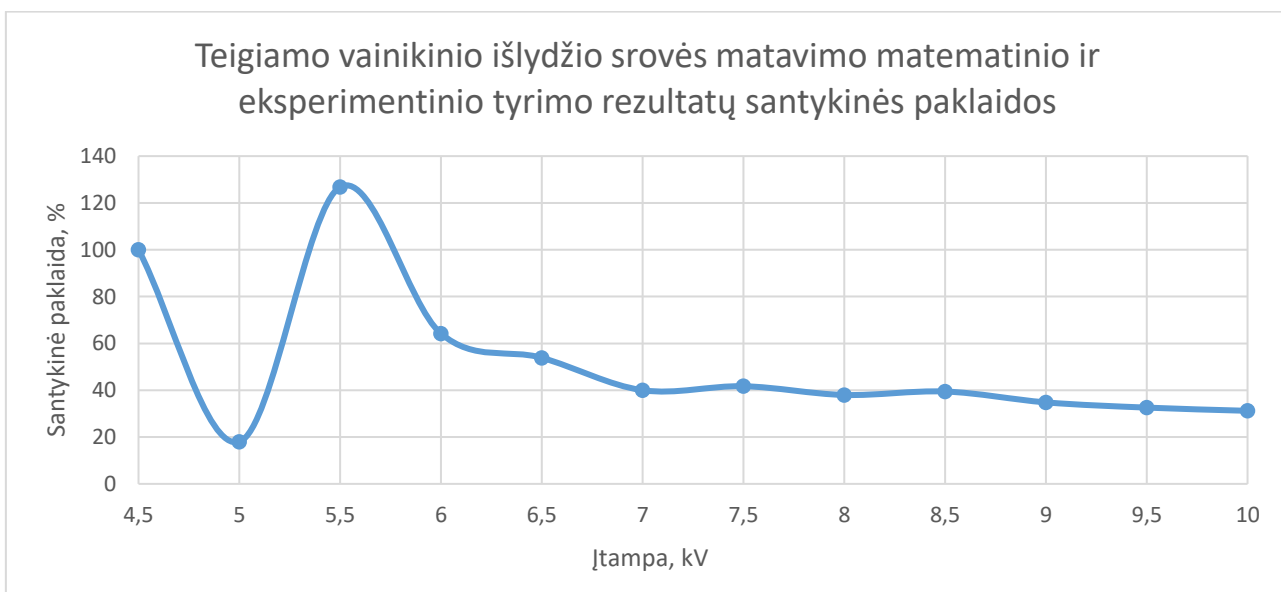
3 lentelė. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai

Įtampa, kV	Vainikinio išlydžio srovė (matematinis modelis), mA	Vainikinio išlydžio srovė (eksperimentinis modelis), mA	Santykinė paklaida, %	Absoliutinė paklaida, mA
4,5	0	0,001	100,00	0,00100
5	0,00236	0,002	18,00	0,00036
5,5	0,05671	0,025	126,84	0,03171
6	0,11495	0,070	64,21	0,04495
6,5	0,20308	0,132	53,85	0,07108

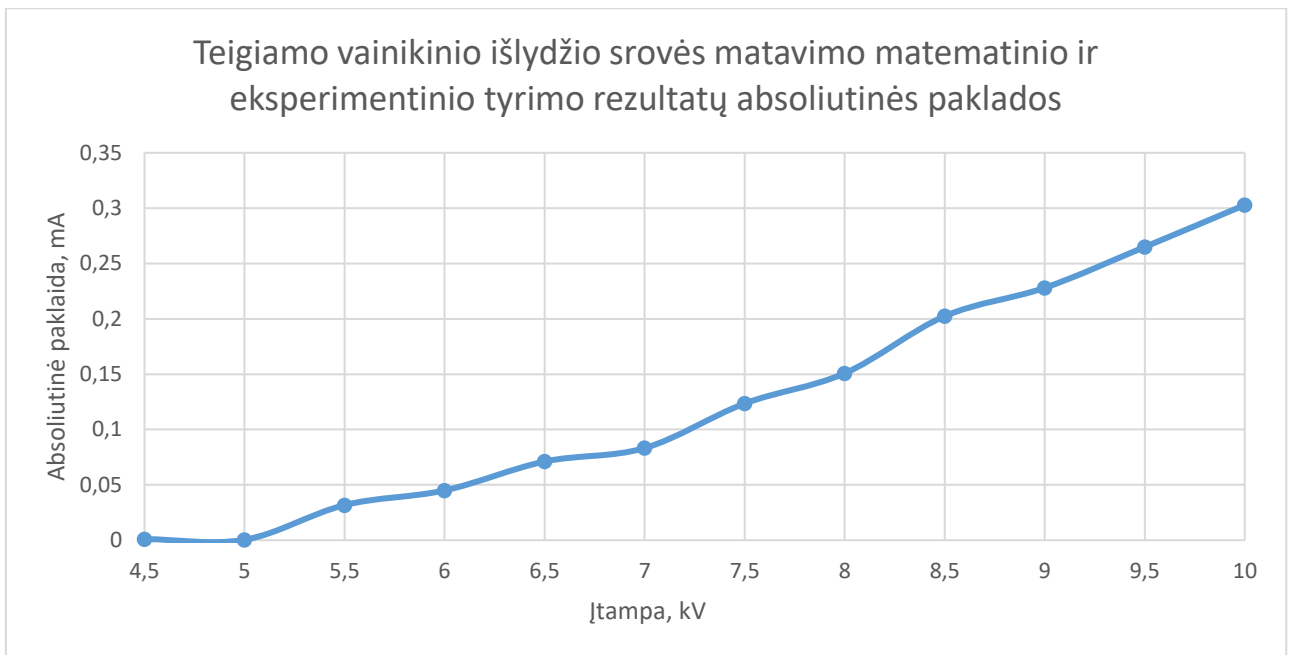
7	0,29121	0,208	40,00	0,08321
7,5	0,41949	0,296	41,72	0,12349
8	0,54777	0,397	37,98	0,15077
8,5	0,71539	0,513	39,45	0,20239
9	0,88302	0,655	34,81	0,22802
9,5	1,07791	0,813	32,58	0,26491
10	1,27281	0,970	31,22	0,30281



23 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai



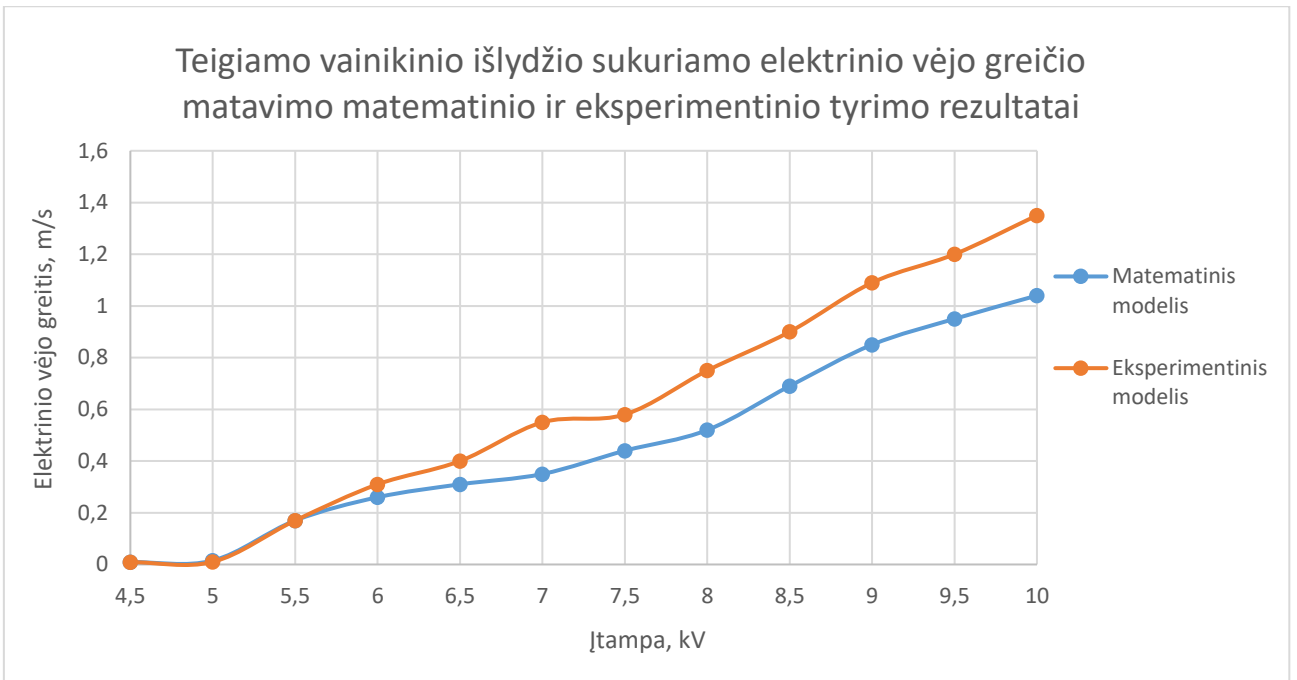
24 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų santykinės paklaidos



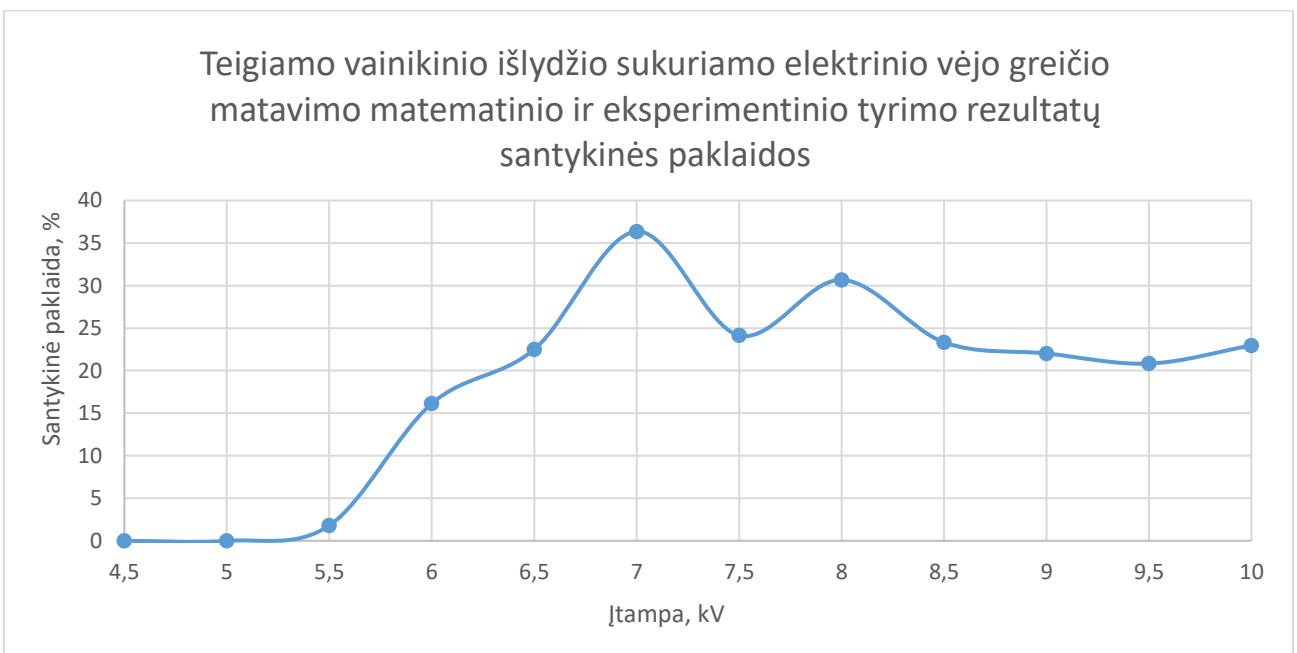
25 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų absoliutinės paklaidos

4 lentelė. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai

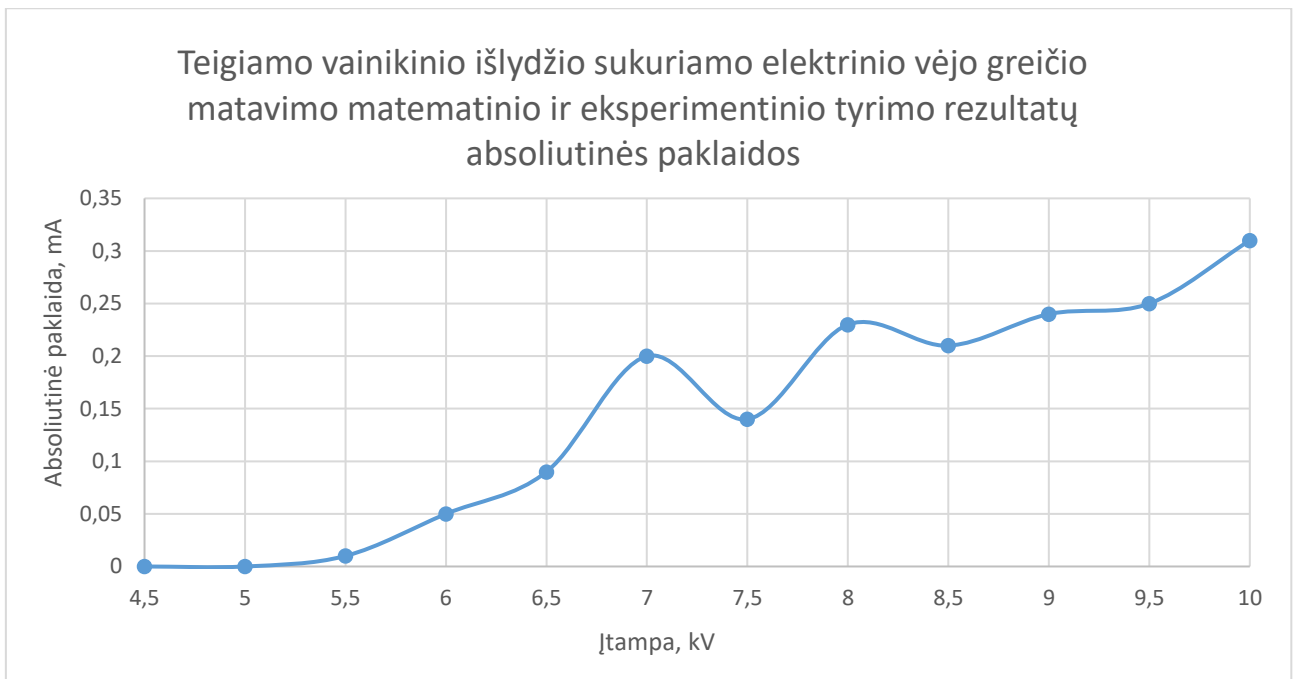
Įtampa, kV	Elektrinio vėjo greitis (matematinis modelis), m/s	Elektrinio vėjo greitis (eksperimentinis modelis), m/s	Santykinė paklaida, %	Absoliutinė paklaida, m/s
4,5	0	0	0	0,00
5	0	0	0	0,00
5,5	0,17	0,17	0,00	0,00
6	0,26	0,31	16,13	0,05
6,5	0,31	0,40	22,50	0,09
7	0,35	0,55	36,36	0,20
7,5	0,44	0,58	24,14	0,14
8	0,52	0,75	30,67	0,23
8,5	0,69	0,90	23,33	0,21
9	0,85	1,09	22,02	0,24
9,5	0,95	1,20	20,83	0,25
10	1,04	1,35	22,96	0,31



26 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai



27 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų santykinės paklaidos



28 pav. Teigiamo vainikinio išlydžio sukuriama elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų absoliutinės paklaidos

Santykinė paklaida apskaičiuojama pagal (14) formulę:

$$\delta = \frac{|x-a|}{|a|} \quad (14)$$

kur δ – santykinė paklaida
 x – eksperimento metu išmatuota reikšmė
 a – teorinė arba matematiškai apskaičiuota reikšmė

Absoliutinė paklaida apskaičiuojama pagal (15) formulę:

$$\Delta x = |x - a| \quad (15)$$

kur Δx – santykinė paklaida
 x – eksperimento metu išmatuota reikšmė
 a – teorinė arba matematiškai apskaičiuota reikšmė

Vainikinio išlydžio srovė matematiniam modelyje gaunama pagal (16) formulę:

$$I = 2 \int \rho_q \cdot \mu \cdot |E| dl \quad (16)$$

kur I – tekanti srovė per vainikinio išlydžio elektrodą, A;
 ρ_q – erdvinis krūvio tankis, C/m³;
 μ – jonų judris, m²/s;
 $|E|$ - elektrinio lauko stipris, V/m;
 dl – linijos elemento ilgis, integruojama per vainikinio elektrodo ribą;
2 – dauginama dėl geometrijos simetrijos, nes modeliuojama tik pusė geometrijos.

3.1.3. Eksperimentinio matavimo palyginimas su matematiniu modeliu

23 paveikslo grafike pateikti teigiamo vainikinio išlydžio srovės matavimo rezultatai, lyginant matematinio modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo duomenis. Grafike matoma, kad didėjant įtampai nuo 4,5 kV iki 10 kV, tiek matematinio modeliavimo, tiek eksperimentinio tyrimo atvejais, vainikinio išlydžio srovė didėja. Matematinio modeliavimo metu gautos didesnės srovės vertės nei gautos eksperimentinio tyrimo metu visame nagrinėjamame įtampos intervale, tai gali būti susiję su idealizuotomis sąlygomis matematinio modeliavimo metu. Eksperimentinio tyrimo metu, realiomis sąlygomis esantys veiksniai (pvz.: oro drėgmė, temperatūra, elektrodų paviršiaus būklė ir pan.) mažina išmatuotą srovę. Skirtumas tarp matematinio modeliavimo ir eksperimentinių rezultatų didėja augant įtampai, pavyzdžiui, esant 10 kV įtampai, skirtumas tarp teorinės ir eksperimentinės vertės yra ryškiausias. 1 lentelėje pateiktos teigiamo vainikinio išlydžio srovės santykinės ir absoliutinės paklaidos. 24 paveiksle matyti, kad santykinė paklaida gaunama labai didelė esant ~5,5 kV įtampai, kai prasideda vainikinis išlydis, didėjant įtampai (ir srovėms), santykinės paklaidos mažėja ir stabilizuojasi – nuo ~ 40 % iki ~ 31 % aukštesnių įtampų srityje (nuo 7 iki 10 kV). Tai rodo, kad modelis labiau tikslus didesnių srovių (aukštesnės įtampos) atveju. 25 paveiksle matyti, kad absoliutinė paklaida nuosekliai didėja, ši tendencija yra linijinė arba beveik linijinė, atitinkanti srovės augimo pobūdį. Absoliutinė paklaida nėra labai didelė, tačiau jos augimas rodo, kad modelis galėtų būti perkalibruotas, kad tiksliau atitiktų eksperimentinius duomenis. Siekiant sumažinti matematinio ir eksperimentinio tyrimo paklaidas, reikia tobulinti matematinį modelį, įtraukiant daugiau realių parametrų, galinčių sumažinti neatitikimus tarp matematinio modelio ir eksperimentinių duomenų. Taip pat, paklaidos eksperimentiniuose matavimuose, ypač mažų srovių srityje, dažnai atsiranda dėl matavimo įrangos riboto tikslumo. Dauguma ampermetrų ar duomenų surinkimo sistemų turi žemutinę ribą, žemiau kurios signalas tampa labai triukšmingas, netikslus. Esant labai mažoms srovėms, matavimo rezultatus gali iškraipyti aplinkos elektromagnetinis triukšmas, foninė įtampa ir kt. Didėjant įtampai (srovei), įranga dirba artimiau savo optimaliam matavimo diapazonui, todėl matavimų tikslumas gerėja, o tai atsispindi mažėjančiose paklaidose.

26 paveikslo grafike pateikti teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai. Grafike matoma, kad didėjant taikomai įtampai nuo 4,5 kV iki 10 kV, tiek matematinis modelis, tiek eksperimentiniai matavimai rodo augantį elektrinio vėjo greitį. Esant mažesnėms įtampoms (iki ~6,5 kV), skirtumai tarp matematinio modelio ir eksperimentinio tyrimo yra nedideli. Esant didesnėms įtampoms (>6,5 kV), eksperimentinis elektrinio vėjo greitis yra didesnis nei matematinio modeliavimo metu, darome prielaidą, kad termo – anemometras yra fizinis objektas, kuris matavimo metu patenka į elektrinio lauko zoną tarp elektrodų. Jutiklis gali iškreipti elektrinio lauko pasiskirstymą dėl savo laidumo ar formos, keisdamas vietinę elektrinio lauko stiprio kryptį ir stiprumą. Tai gali paveikti jonų judėjimą ir tuo pačiu – elektrinio vėjo generaciją. Taigi, susidaro netikslūs elektrinio vėjo greičio matavimai, nes pats jutiklis pakeičia sistemą, kurią matuoja. Taip pat, jei elektrinis vėjas natūraliai ar dėl elektrodų geometrijos krypsta tiesiai į jutiklio angą, greitis gali būti dirbtinai padidintas – gaunamas lokalus maksimalus greitis, kuris neatspindi vidutinio srauto greičio. Eksperimentiniai matavimai gali būti paveikti tiek matavimo įrangos sukuriamo lauko trikdžių, tiek vietinio srauto sustiprinimo (lokalizacijos) efekto, todėl rezultatai dažnai būna kiek didesni nei suskaičiuoti matematiniam modelyje, kuris remiasi idealiomis sąlygomis. 2 lentelėje pateiktos teigiamo vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo greičio matavimo matematinio ir eksperimentinio tyrimo rezultatų santykinės ir absoliutinės paklaidos. 27 paveiksle matyti, kad santykinė paklaida sparčiai didėja, pasiekdama net apie 36 % ties

7 kV. Esant didesnėms įtampoms (nuo 7,5 kV iki 10 kV), santykinė paklaida stabilizuojasi ties 20–25 %. 27 paveiksle taip pat, matyti, kad didžiausios paklaidos zonos (nuo 6,5 kV – 8 kV) gali būti susijusios su perėjimu nuo silpno vainikinio išlydžio prie stipresnio režimo, kai pradeda vyrauti papildomi reiškiniai (pvz.: padidėjęs jonų srautas, didesnė oro jonizacija, elektrohidrodinaminiai nestabilumai). 28 paveiksle pateikta grafinė priklausomybė atspindi absoliutinę paklaidą tarp matematiškai modeliuotų ir eksperimentiškai išmatuotų elektrinio vėjo greičio reikšmių, ši grafinė priklausomybė dar kartą patvirtina, kad eksperimentinėmis sąlygomis vėjo srautas gali būti chaotiškas, jį sunku tiksliai išmatuoti, taip pat, matavimo įranga gali būti paveikta stipraus elektrinio lauko ar oro judėjimo turbulencijos.

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė, kurioje apžvelgti pagrindiniai elektrinio lauko modeliavimo metodai, vainikinio išlydžio taikymo sritys, tipai, galimos elektrodų konfigūracijos, bei vainikinio išlydžio susidarymo principai. Taip pat, literatūros analizėje apžvelgta vainikinio išlydžio sukuriamo elektrinio vėjo atsiradimo istorija, elektrinio vėjo susidarymo mechanizmo priklausomybė nuo poliarizacijos bei apžvelgtas vainikinio išlydžio elektrinio vėjo generavimas.
2. Sukurtas vainikinio išlydžio matematinis modelis leido įvertinti elektrinio lauko pasiskirstymą tarp elektrodų ir erdvinio krūvio formavimąsi išlydžio zonoje.
3. Sukurtas elektrinio vėjo oro srauto matematinis modelis, paremtas elektrohidrodinaminiais principais, leido įvertinti oro judėjimą, sukeltą vainikinio išlydžio metu.
4. Eksperimentiniu tyrimu įvertintas sukurtų modelių tikslumas – rezultatai parodė pakankamą matematinio modeliavimo ir praktinio matavimo atitikimą, kas patvirtina modelių tinkamumą vainikinio išlydžio ir elektrinio vėjo reiškinių tyrimams.

Literatūros sąrašas

- [1] J. Blazek, “Principles of Solution of the Governing Equations,” in *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, Elsevier, 2015, pp. 29–72. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080999951000038>.
- [2] N. Monrolin, O. Praud, and F. Plouraboué, “Revisiting the positive DC corona discharge theory: Beyond Peek’s and Townsend’s law,” *Phys. Plasmas*, vol. 25, no. 6, Jun. 2018, Available: <https://pubs.aip.org/pop/article/25/6/063503/320052/Revisiting-the-positive-DC-corona-discharge-theory>.
- [3] P. Marciulionis, “Analysis of Space Charge Distribution in dc Corona Discharge Field Computed With Finite-Element Method,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1698–1703, Jul. 2017, Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7953535/>.
- [4] M. Paulauskas, “ĮŽEMĖJIMO ĮTAKOS IŠLYDŽIAMS TYRIMAS,” pp. 1–43, 2018, [Online]. Available: <https://epubl.ktu.edu/object/elaba:28844537/index.html>
- [5] Z. S. Zhang, P. B. Ge, X. D. Shi, B. F. Liu, and Z. Q. Liu, “The Control System of High Voltage Electrostatic Precipitator Based on FPGA,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 823, no. July, pp. 528–531, Oct. 2013, Available: <https://www.scientific.net/AMR.823.528>.
- [6] P. K. Paniker, “Ionization of air by corona discharge,” p. 121, 2003.
- [7] H. Javed, L. Kang, and G. Zhang, “The Study of Different Metals Effect on Ozone Generation Under Corona Discharge in MV Switchgear Used for Fault Diagnostic,” in *2019 IEEE Asia Power and Energy Engineering Conference (APEEC)*, IEEE, Mar. 2019, pp. 29–33. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8720699/>.
- [8] I. Ir, D. Fakultetas, and G. Minc, “FLEKSOGRAFINIŲ SPAUDOS GAMINIŲ KOKYBĖS GERINIMO TECHNOLOGIJŲ TYRIMAS UAB „REPRODUKCIJOS SPALVOS“ Baigiamasis magistro projektas KOKYBĖS GERINIMO TECHNOLOGIJŲ TYRIMAS UAB „REPRODUKCIJOS SPALVOS“ Baigiamasis magistro projektas,” 2015, [Online]. Available: <https://talpykla.elaba.lt/elaba-fedora/objects/elaba:22848712/datastreams/MAIN/content>
- [9] “Xerography, a dry printing process,” *Electr. Eng.*, vol. 68, no. 1, pp. 46–46, Jan. 1949, Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6444558/>.
- [10] S. K. Guharay, P. Dwivedi, and H. H. Hill, “Ion Mobility Spectrometry: Ion Source Development and Applications in Physical and Biological Sciences,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 36, no. 4, pp. 1458–1470, Aug. 2008, Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4599001/>.
- [11] P. Bunme *et al.*, “Polarity effect of pulsed corona discharge plasma on seed surface modification,” *2017 Int. Electr. Eng. Congr. iEECON 2017*, 2017,
- [12] Z. Buntat *et al.*, “Design and Development of Ozone-Based Surgical Equipment Sterilizer,” in *2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, IEEE, Oct. 2019, pp. 186–191. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8984511/>.
- [13] M. Dalvi-Isfahan, M. Havet, N. Hamdami, and A. Le-Bail, “Recent advances of high voltage electric field technology and its application in food processing: A review with a focus on corona discharge and static electric field,” *J. Food Eng.*, vol. 353, no. February, p. 111551, Sep. 2023, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0260877423001498>.
- [14] G. Altamimi, H. A. Illias, N. Mokhtar, H. Mokhlis, and A. H. A. Bakar, “Corona discharges under various types of electrodes,” in *2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, IEEE, Dec. 2014, pp. 5–8. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7062403/>.
- [15] H. Z. Alisoy, A. Yesil, M. Koseoglu, and I. Unal, “An approach for unipolar corona discharge in N₂/O₂ gas mixture by considering townsend conditions,” *J. Electrostat.*, vol. 69, no. 4, pp. 284–290, Aug. 2011, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304388611000556>.
- [16] A. Yehia, E. Abdel-Fattah, and A. Mizuno, “Positive direct current corona discharges in

- single wire-duct electrostatic precipitators,” *AIP Adv.*, vol. 6, no. 5, pp. 1–15, May 2016, Available: <https://pubs.aip.org/adv/article/6/5/055213/997344/Positive-direct-current-corona-discharges-in>.
- [17] T. Stegmaier, A. Dinkelmann, V. Von Arnim, and A. Rau, “Corona and dielectric barrier discharge plasma treatment of textiles for technical applications,” in *Plasma Technologies for Textiles*, Elsevier, 2007, pp. 129–157. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845690731500056>.
- [18] K. Asano, R. Hishinuma, and K. Yatsuzuka, “Bipolar corona discharge from a floating filamentary particle between parallel plate electrodes,” in *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129)*, IEEE, 2000, pp. 606–609. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/881173/>.
- [19] Y. Guo, S. Li, Z. Wu, K. Zhu, and N. Wang, “Pulsation Characteristics of Corona Discharge in Electrohydrodynamic Process Using Ionic Liquid,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 47, no. 12, pp. 5234–5238, Dec. 2019, Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8894428/>.
- [20] Y. Vadikkeetil *et al.*, “Plasma assisted decomposition and reforming of greenhouse gases: A review of current status and emerging trends,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 161, no. March, p. 112343, Jun. 2022, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032122002568>.
- [21] L. Gu *et al.*, “Relationship between Corona Discharge Thrust and Applied Voltage’s Polarity,” *Energies*, vol. 16, no. 14, p. 5257, Jul. 2023, Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/14/5257>.
- [22] Y. Zhang, L. Liu, Y. Chen, and J. Ouyang, “Characteristics of ionic wind in needle-to-ring corona discharge,” *J. Electrostat.*, vol. 74, pp. 15–20, Apr. 2015, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304388614001326>.
- [23] L. Li, S. J. Lee, W. Kim, and D. Kim, “An empirical model for ionic wind generation by a needle-to-cylinder dc corona discharge,” *J. Electrostat.*, vol. 73, pp. 125–130, Feb. 2015, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304388614001090>.
- [24] H. Ait Said, H. Nouri, and Y. Zebboudj, “Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator,” *J. Electrostat.*, vol. 73, pp. 19–25, Feb. 2015, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304388614000886>.
- [25] S. I. Wais and P. A. Mohammed, “Influence of Magnetic Field on Characteristics of Corona Discharge in Wire-Cylinder Electrodes Configuration,” *Plasma*, vol. 4, no. 4, pp. 764–779, Dec. 2021, Available: <https://www.mdpi.com/2571-6182/4/4/39>.
- [26] A. Bologna, H. R. Paur, H. Seifert, and K. Woletz, “Influence of gas composition, temperature and pressure on corona discharge characteristics,” *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 110–116, 2011, [Online]. Available: <http://ijpest.com/Contents/05/2/PDF/05-02-110.pdf>
- [27] J. Wang, T. Zhu, Y. Cai, J. Zhang, and J. Wang, “Review on the recent development of corona wind and its application in heat transfer enhancement,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 152, p. 119545, May 2020, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931019344333>.
- [28] A. Tilmatine, N. Kadous, K. Yanallah, Y. Bellebna, Z. Bendaoudi, and A. Zouaghi, “Experimental investigation of a new solar panels cleaning system using ionic wind produced by corona discharge,” *J. Electrostat.*, vol. 124, no. June, p. 103827, Jul. 2023, Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304388623000360>.