



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Įvairių veiksmų įtaka vainikinio išlydžio susidarymui aukštos
įtampos oro linijose**

Baigiamasis magistro darbas

Elvinas Setkauskas

Projekto autorius

Doc. Povilas Marčiulionis

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Įvairių veiksmų įtaka vainikinio išlydžio susidarymui aukštos įtampos oro linijose

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Elvinas Setkauskas

Projekto autorius

Doc. Povilas Marčiulionis

Vadovas

Lekt. Ramūnas Deltuva

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elvinas Setkauskas

Įvairių veiksmų įtaka vainikinio išlydžio susidarymui aukštos įtampos oro linijose

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.

Elvinas Setkauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Setkauskas, Elvinas. Įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio susidarymui aukštos įtampos oro linijose. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Povilas Marčiulionis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): Elektros inžinerija (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: vainikinis išlydis, išlydžiai dujose, elektrinio lauko stipris.

Kaunas, 2021. 40 p.

Santrauka

Darbo tikslas yra sumodeliuoti įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio susidarymui aukštos įtampos oro linijose.

Darbe pateikiama išlydžio dujose, vainikinio išlydžio susidarymo, elektromagnetinio lauko apskaičiavimo teorijos apžvalga. Aptariami vainikinio išlydžio susidarymo padariniai. Apžvelgta įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio susidarymui ir jo sukeliams nuostoliams.

Programinio paketo „COMSOL Multiphysics“ pagalba sukurtas modelis įvairių veiksnių įtakai vainikinio išlydžio susidarymui ištirti ir pateikt rezultatai su išvadomis.

Setkauskas, Elvinas. Influence of Various Factors on Corona Discharge Formation in High Voltage Overhead Power Lines. Master's Final Degree / 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, discharges in gasses, electric field strength.

Kaunas, 2021. 40 p.

Summary

The aim of this work is to model the influence of various factors on the formation of corona discharge in high voltage overhead power lines.

The paper presents an overview of the theory of gas discharge, corona discharge formation, electromagnetic field calculation. The consequences of the corona discharge formation are discussed. Influence of various factors on the formation of the corona discharge and corona losses is reviewed.

With the help of the software package COMSOL Multiphysics, a model was developed to investigate the influence of various factors on the formation of the corona discharge. Results with conclusions were presented.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	11
1.1. Elektrinis dujų pramušimas	11
1.2. Vainikinis išlydis	13
1.2.1. Vainikinio išlydžio procesas prie teigiamojo ir neigiamojo elektrodo.....	14
1.2.2. Vainikinis išlydis kintamos srovės elektros perdavimo linijose.....	16
1.2.3. Vainikinio išlydžio padariniai	17
1.3. Įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio formavimuisi perdavimo linijose.....	18
1.3.1. Laido defekto įtaka vainikinių išlydžių susidarymui.....	18
1.3.2. Išskaidytosios fazės laidų skaičiaus įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams....	18
1.3.3. Dulkių įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams	20
1.4. Elektrostatinio lauko stiprio skaičiavimas.....	21
2. Modeliavimas	25
3. Rezultatai.....	30
Išvados	38
Literatūra	39

Lentelių sąrašas

1 Lentelė. Pradinis elektrinio lauko stipris esant skirtingiems laidininkų tipams ir orui.....	28
2 Lentelė. Modeliavimo rezultatų pjūviuose atramoje ir tarp atramų palyginimas	32
3 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingiems šiurkštumo koeficientams palyginimas	33
4 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingiems laidininkų spindulio ilgimams palyginimas .	34
5 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingam išskaidytosios fazės laidininkų skaičiui palyginimas.....	35
6 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingiems defektų tipams palyginimas. Laidininko tipas 386-AL1/34-ST1A	35
7 Lentelė. Dulkės ir vandens lašo įtakos elektrinio lauko stiprio susidarymui modeliavimo rezultatų palyginimas.....	37

Paveikslų sąrašas

1 pav. Srovės tankio pokytis plokščiaame kondensatoriuje su dujų dielektriku priklausomai nuo elektrinio lauko stiprio E [2]	11
2 pav. Griūtis tolygiame elektriniame lauke ir elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas pagal griūtės ašį. E_g – pagrindinio elektrinio lauko stipris [2].....	12
3 pav. Vainikinio išlydžio pulsai teigiamojo ir neigiamojo pusperiodžių metu [7].....	15
4 pav. Elektrinio lauko stiprio tarpe tarp elektrodų, įtampos elektrodų paviršiuje ir išlydžio srovės grafikai kai: a) įtampa lygi 8,7 kV, b) įtampa lygi 9,5 kV, c) įtampa lygi 10,2 kV, d) įtampa lygi 13,5 kV [8].....	16
5 pav. Šiašialaidės iškaidytosios fazės elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas: a – visoje konstrukcijoje; b – aplink vieną laidą [12]	19
6 pav. Pradinės vainikinio išlydžio įtampos priklausomybė nuo laidininko diametro a) iškaidytosios fazės laidininkų skaičius $N = 2$ ir 4, b) $N = 6$, c) $N = 8$. R_c – vainikinio išlydžio matavimo narvo spindulys [7]	19
7 pav. Išskaidytosios fazės laidų skaičiaus (n) įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams (CL) esant skirtingiems elektrinio lauko stipriams kai: a – laidininko tipas yra LGJ-400; b – laidininko tipas yra LGJ-630 [12].....	20
8 pav. Dulkių koncentracijos įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams kai dalelės dydis: a – $rd < 0,125$ mm; b – $0,25$ mm $< rd < 0,5$ mm [12]	20
9 pav. Dulkių dalelių dydžio įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams kai dulkių dalelių koncentracija g yra: a – $547 < g < 559$ mg/m ³ ; b – $698 < g < 706$ mg/m ³	21
10 pav. Dvimačio baigtinio elemento elektrinio potencialo linijinė interpoliacija [16]	23
11 pav. Modeliuojamos 330 kV atramos geometriniai matmenys, nurodyti metrais	25
12 pav. Kraštinės sąlygos: a – Neumann'o; b, c – Dirichlet	26
13 pav. Baigtinių elementų tinklelis: a – pjūvis linijos dalyje su atrama; b – pjūvis linijos dalyje tarp atramų	27
14 pav. Baigtinių elementų tinklelis priartintas laidininkų vaizdas: a – pjūvis linijos dalyje su atrama; b – pjūvis linijos dalyje tarp atramų	27
15 pav. Laidininko defektų modelis: a – įbraukta vija, b – Pakilusi vija, c – trūkusi vija	28
16 pav. Išskaidytosios fazės modelis: a – vienlaidė, b – dvilaidė, c – trilaidė, d – keturlaidė, e – šešialaidė sistemos.....	29
17 pav. Laidininko ir vandens lašo (pažymėtas mėlynai) modelio baigtinių elementų tinklelis	29
18 pav. Laidininko ir dulkės (pažymėta mėlynai) modelio baigtinių elementų tinklelis.....	29
19 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas visoje uždavinio srityje	30
20 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas aplink izoliatorių girliandą	30
21 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas: a – perdavimo linijos pjūvyje tarp atramų; b – pjūvyje atramoje, dvilaidės konstrukcijos srityje	31
22 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininkus ir izoliatorių girliandą pjūvyje atramoje. Maksimalus stipris $E_{max} = 10,405$ kV/cm.....	31
23 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininkus dvilaidės konstrukcijos srityje: a – su apsauginiu žiedu, $E_{max} = 10,405$ kV/cm; b – be apsauginio žiedo, $E_{max} = 16,94$ kV/cm ...	32
24 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininkus pjūvyje tarp atramų: a – fazinių laidininkų vaizdas; b – priartintas vieno laidininko vaizdas dvilaidėje sistemoje. $E_{max} = 32,03$ kV/cm	32

25 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininką: a – monolitinis vienlaidėje sistemoje, $E_{max} = 30,68$ kV/cm; b – monolitinis dvilaidėje sistemoje, $E_{max} = 21,23$ kV/cm; c – daugiagyslis vienlaidėje sistemoje, $E_{max} = 43,69$ kV/cm; d – daugiagyslis dvilaidėje sistemoje, $E_{max} = 32,03$ kV/cm	33
26 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininką esant skirtingiems laidininko skerspjūviams: a – 511 markės, $E_{max} = 38,67$ kV/cm; b – 653 markės, $E_{max} = 35,25$ kV/cm; c – 1046 markės, $E_{max} = 29,24$ kV/cm	34
27 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininką esant skirtingoms laidininkų sistemoms: a – trilaidė, $E_{max} = 25,90$ kV/cm; b – keturlaidė, $E_{max} = 22,11$ kV/cm; c – šiašialaidė $E_{max} = 17,89$ kV/cm	35
28 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink 386-AL1/34-ST1A tipo laidininką esant skirtingiems defektams: a – pakilusi vija, $E_{max} = 65,11$ kV/cm; b – įbraukta vija, $E_{max} = 136,22$ kV/cm; c – trūkusi vija $E_{max} = 192,46$ kV/cm	35
29 pav. Dulkės įtaka elektrinio lauko stiprio pasiskirstymui esant trilaidei sistemai. $E_{max} = 37,26$ kV/cm	36
30 pav. Vandens lašo įtaka elektrinio lauko stiprio pasiskirstymui esant trilaidei sistemai. $E_{max} = 32,95$ kV/cm.....	36

Išvadas

Vainikinis išlydis - tai savaiminis elektros išlydis dujose, kurį sukelia smūginė jonizacija stipriame elektriniame lauke. Susidaro normaliam ($\sim 10^5$ Pa) slėgyje ir labai nevienalyčiame elektriniame lauke, pavyzdžiui, apie aukštosios įtampos elektros perdavimo linijų laidus, įelektrintų kūnų smailes.

Vainikinis išlydis aukštos įtampos perdavimo linijose kai linijomis yra perduodama elektros energija be perstojo generuoja galios nuostolius, todėl projektuojant perdavimo linijas svarbu sprendinius parinkti tokius, kurie mažintų vainikinio išlydžio susidarymo tikimybę arba minimalizuotų jo sukeltus galios nuostolius.

Be galios nuostolių vainikinis išlydis taip pat:

1. sukelia girdimus triukšmus;
2. į tinklą generuoja aukštesnės eilės harmonikas;
3. sukelia laidininkų vibracijas;
4. sukelia chemines reakcijas ore.

Darbo metu išnagrinėtas vainikinio išlydžio susidarymo principas, apskaičiavimo metodika. Programinio paketo „COMSOL Multiphysics“ pagalba sumodeliuota įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio susidarymui 330 kV įtampos elektros oro perdavimo linijoje. Darbo pabaigoje įvertinti gauti rezultatai ir pateiktos išvados.

Darbo tikslas – ištirti įvairių veiksnių įtaką vainikinio išlydžio susidarymui aukštos įtampos oro linijose.

Darbo uždaviniai:

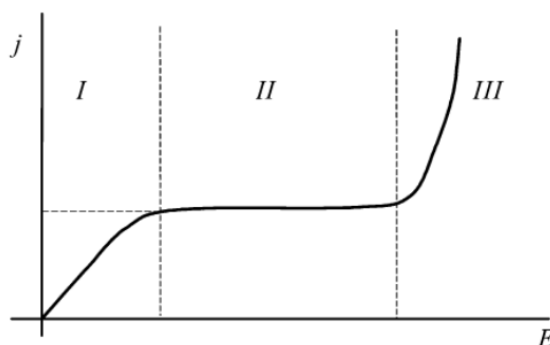
1. išnagrinėti vainikinio išlydžio susidarymo principą, ir skaičiavimo metodiką;
2. ištirti įvairių veiksnių įtaką vainikinių išlydžių susidarymui pasitelkiant programinį paketą „COMSOL multiphysics“;
3. įvertinti gautus rezultatus ir pateikti išvadas.

1. Literatūros analizė

1.1. Elektrinis dujų pramušimas

Tarkime esant standartiniams slėgiui ir temperatūrai ($273,15^{\circ}\text{K}$, 100 kPa) prie dviejų plokščių ir lygiagrečių elektrodų prijungiamas nuolatinės įtampos šaltinis, dėl kurio tarpe tarp elektrodų susidaro lauko stipris E . Atsiradus lauko stipriui, tarp elektrodų esantys laisvieji krūvininkai (dėl natūralios radiacijos, foto emisijos ir foto jonizacijos procesų dujose visada yra laisvųjų krūvininkų) pradeda judėti elektrinio lauko linijų kryptimi, pasiekia elektrodus ir grandinėje pradeda tekėti elektros srovė. Elektros srovės tekėjimas dujose vadinamas dujų išlydžiu [1].

Elektrinio lauko stipriui didėjant, srovė didėja (kaip nurodyta išlydžio tarpelio tarp elektrodų voltamperinėje charakteristikoje (1 pav.) I intervale) kol yra pasiekiamas soties srovė (II intervalas). Soties srovė atsiranda nes visi laisvieji krūvininkai, dėl natūralios spinduliuotės susidarantys tarpelyje tarp elektrodų, elektrinio lauko veikiami pasiekia elektrodus. I ir II intervaluose krūvininkų energija, kurią krūvininkai įgauna greitėdami elektriniame lauke, yra nepakankama jonizacijos procesui, tačiau toliau didėjant elektrinio lauko stipriui ir pereinant į III voltamperinės charakteristikos zoną laisvieji elektronai įgauna pakankamą energijos kiekį, kad susidūrę su molekule galėtų ją jonizuoti. Taip prasideda elektronų griūtis procesas [2].



1 pav. Srovės tankio pokytis plokščiam kondensatoriuje su dujų dielektriku priklausomai nuo elektrinio lauko stiprio E [2]

Elektronų griūtis susidaro, kai tarpelyje tarp elektrodų esantis laisvasis elektronas, kurį veikia tarp elektrodų esantis elektrinis laukas E , greitėdamas įgauna pakankamą kiekį energijos, kad susidurdamas su neutralia molekule išlaisvintų elektroną. Po susidūrimo susidaro du laisvieji elektronai ir teigiamasis jonas. Elektronai bus toliau greitinami elektriniame lauke ir susidurdami su neutraliosiomis molekulėmis išlaisvins dar po vieną elektroną.

Paprastai elektronų slinkio greitis 200 kartų viršija jonų slinkio greitį, elektronai juda elektriniame lauke palikdami teigiamus jonus praktiškai savo vietose [3].

Elektronų griūtis procesą charakterizuoja koeficientas α vadinamas jonizacijos koeficientu arba pirmuoju Taunsendo koeficientu. Koeficientas apibūdinamas kaip elektronų, išlaisvintų vieno elektrono, skaičius ilgio vienetu elektrinio lauko kryptimi. Mažą energiją turintys elektronai gali būti prijungti neutralų molekulių ir sudaryti neigiamus jonus. Tokį procesą charakterizuoja prilipimo koeficientas η . Koeficientas apibūdinamas kaip prie neutralių molekulių prijungtų elektronų skaičius

vienam elektronui ilgio vienete. Įvertinus jonizacijos ir prilipimo koeficientus gaunamas efektnis jonizacijos koeficientas $\bar{\alpha}$ [4].

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \quad (1)$$

Jeigu taške x yra n elektronų, tai atstume dx elektrinio lauko kryptimi vykstant elektronų griūčiai susidaro dn elektronų.

$$dn = \bar{\alpha} n dx \quad (2)$$

Beatkuriame taške x elektronų skaičius bus:

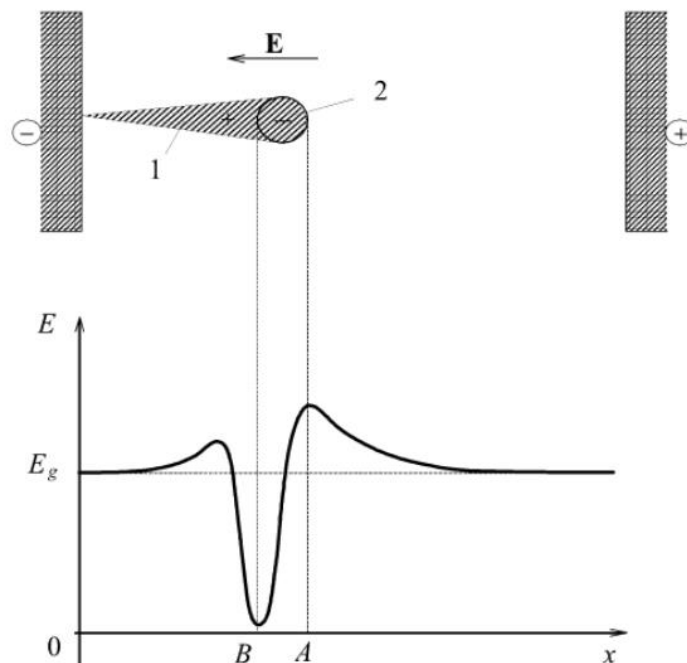
$$n = n_0 e^{\int_0^x \bar{\alpha} dx} \quad (3)$$

kur n_0 – pirminių elektronų, atsiradusių prie katodo, skaičius.

Elektriniame lauke judantys elektronai, už savęs palikdami teigiamus jonus, 2 paveiksle pažymėtus skaičiumi 2, suformuoja griūtės galvutę pažymėtą skaičiumi 1. Dėl difuzijos nuo griūtės galvutės centro elektronai pasiskirsto į abi puses beveik vienodai spinduliu r_L [2].

$$r_L = 2\sqrt{D't} \quad (4)$$

Kur D' - difuzijos koeficientas, t – griūtės susiformavimo laikas.



2 pav. Griūtis tolygiame elektriniame lauke ir elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas pagal griūtės ašį. E_g – pagrindinio elektrinio lauko stipris [2]

Lygties (4) narį $e^{\int_0^x \bar{\alpha} dx}$ galima vadinti elektronų griūtimi. Eksponentinė išraiška nusako kiek elektronų išlaisvina vienas elektronas kelyje nuo $x = 0$ iki x . Tačiau ši išraiška tiksliai nusako vykstančius procesus tik tol, kol krūvininkų, esančių tarpelyje tarp elektrodų, sukuriama elektrinio lauko stiprio E_L yra mažas palyginus su elektrodų sukuriama elektrinio lauko stipriu E_g [4].

2 paveiksle parodytas elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas tarpe tarp elektrodų. Vystantis elektronų griūčiai, griūtis galvutėje susikaupia elektronais užpildytas debesis, už savęs palikdamas teigiamų jonų užpildytą debesį. Tarpe tarp elektrodų susidaro papildomi elektriniai laukai: tarp anodo ir neigiamų elektronų debesis, sustiprinantis pagrindinį elektrinį lauką, tarp teigiamų jonų debesis ir neigiamų elektronų debesis, susilpninantis pagrindinį elektrinį lauką, ir tarp teigiamų jonų debesis ir katodo, sustiprinantis pagrindinį elektrinį lauką.

Jeigu tarpas tarp elektrodų yra pakankamai ilgas, elektronų griūčiai išsivysčius tam tikrame kritiniame ilgyje x_c , krūvininkų esančių tarp elektrodų sukuriama elektrinio lauko stipris E_L pradeda atritėti prie pagrindinio elektrinio lauko E_g vertės ir suminė elektrinio lauko stiprio vertė išauga. Todėl griūtis galvutės priekyje prasideda intensyvi molekulių jonizacija ir sužadinimas. Elektronų ir jonų rekombinacija skleidžia fotonus, kurie susidūrę su neutraliomis molekulėmis išmuša iš jų elektronus. Šie nauji elektronai, greitunami elektriniame lauke, pradeda naujas elektronų griūtis. Kadangi fotonai juda šviesos greičiu, jonizacijos procesas pagreitėja ir visame tarpelyje tarp elektrodų ilgyje sparčiai vystosi jonizuotas kanalas vadinamas strimeriu.

Atlikdamas eksperimentus H. Raether aprašė empirinę strimerinio išlydžio kriterijaus išraišką:

$$\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c + \ln \frac{E_L}{E_g} \quad (5)$$

Strimerio susidarymo kriterijumi laikoma sąlyga, kad krūvininkų sukuriama elektrinio lauko stipris E_L turi atritėti prie pagrindinio elektrinio lauko E_g vertės ($E_L \approx E_g$) [4], įrašę šią sąlygą į (5) lygtį gauname:

$$\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c \quad (6)$$

Ore esant standartiniams slėgiui ir temperatūrai vertė $\alpha x_c \approx 18-20$ [4].

Strimeriui pasiekus abu elektrodus, jis greitai įkaista ir strimeryje prasideda šiluminė jonizacija. Kanalas tampa labai laidus ir įtampa prijungta prie elektrodų krenta. Įvyksta elektrinis dujų pramušimas oro tarpelyje tarp elektrodų [2].

1.2. Vainikinis išlydis

Vienalyčiuose elektriniuose laukuose dujų jonizacijos proceso pradžia dažniausiai baigiasi dujų pramušimu, tačiau nevienalyčiuose elektriniuose laukuose dar prieš visišką dujų pramušimą galima pastebėti švytėjimą apie elektrodus ir išgirsti traškantį išlydžio sukeltą garsą. Tokio tipo išlydis yra vadinamas vainikiniu išlydžiu [4].

Vainikinis išlydis - tai savaiminis elektros išlydis dujose, kurį sukelia smūginė jonizacija stipriame elektriniame lauke. Susidaro normaliam (~ 10⁵ Pa) slėgyje ir labai nevienalyčiame elektriniame lauke, pavyzdžiui, apie aukštosios įtampos elektros perdavimo linijų laidus, įelektrintų kūnų smailes.

Taip yra, nes mažesnio kreivio paviršiuje yra reikalingas didesnis paviršinio krūvio tankis tam, kad laidininko viduje elektrinio lauko stipris būtų lygus nuliui. Esant didesniam paviršinio krūvio tankiui, tuo pačiu atstumu nuo elektrodo susidarys stipresnis elektrinio lauko stipris negu prie likusio laidininko paviršiaus tuo pačiu atstumu. Todėl kritinis elektrinio lauko stipris pirma bus pasiektas mažesnio kreivio laidininko zonoje.

Pagrindinė vainikinio išlydžio savybė yra tai, jog jonizacijos procesai vyksta nedidelėje oro tarpo dalyje prie elektrodo su mažu paviršiaus kreivumo spinduliu. Išlydžiui vystantis tarpelyje toliau, elektrinio lauko stipris pradeda silpnėti, griūtiniai elektronai sulėtėja, yra absorbuojami molekulių ir išlydis užgęsta. Vainikinio išlydžio susidarymą įtakojantys veiksniai yra elektrodų forma, oro slėgis, įtampa, atstumai tarp elektrodų.

Vainikinis išlydis susiformuoja esant pradiniam vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipriui E_n arba pradinei įtampai U_n [2]. Empirinė formulė pradinei vainikinio išlydžio įtampai U_n apskaičiuoti buvo pasiūlyta 1911 m. F.W. Peek Jr. [5].

$$U_n = m\delta E_n r \log_e \frac{s}{r} \quad (7)$$

Kur U_n – pradinė vainikinio išlydžio įtampa kV; δ – oro tankio faktorius; E_n – pradinis vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipris, kV/cm; r – laidininko spindulys, cm; s – atstumas tarp laidininkų, cm; m – šiurkštumo koeficientas.

Šiurkštumo koeficientas m įvertina laidininko paviršiaus netolygumo įtaką pradiniam lauko stipriui ar pradinei įtampai. Elektrodui lygiu paviršiumi šiurkštumo koeficientas $m = 1$, laidininkui sudarytam iš apvalių vijų $m = 0,85 - 0,75$, esant smulkiems paviršiaus įbrėžimams $m = 0,8 - 0,6$, esant dideliame paviršiaus užterštumui $m = 0,6 - 0,3$.

Oro tankio faktorius apskaičiuojamas:

$$\delta = \frac{3,92b}{273+t} \quad (8)$$

Kur δ – oro tankio faktorius; b – oro slėgis, cmHg; t – oro temperatūra, C^0 .

1.2.1. Vainikinio išlydžio procesas prie teigiamojo ir neigiamojo elektrodo

Vainikinis išlydis vystosi skirtingai priklausomai nuo įtampos poliškumo.

Tarkime tolygiai keliant įtampą, teigiamojo poliaus elektrodo įtampa pasiekia pradinę vainikinio išlydžio įtampą U_n , prasideda elektrodo supančių dujų jonizacija – vainikinis išlydis. Veikiant elektriniam laukui elektronai greitai pereina teigiamojo elektrodo pusėn ir yra absorbuojami. Palyginti sunkūs teigiamieji jonai daug lėčiau juda link tolumo katodo. Dėl šių greičių skirtumų aplink elektrodo susiformuoja teigiamųjų jonų debesis. Teigiamųjų jonų debesis sukuria papildomą elektrinį lauką, kuris susilpnina pagrindinį lauką, esantį prie elektrodo paviršiaus. Teigiamiesiems jonams tolstant link katodo, elektrinio lauko stipris prie anodo pradeda didėti kol pasiekia pakankamai aukštą įtampą, kad ir vėl jonizuotų aplink esančias dujas, taip suformuodamas naują teigiamųjų jonų debesį [2].

Taip prasideda teigiamasis vainikinis išlydis. Besikartojantys teigiamųjų jonų susidarymo prie anodo, elektrinio lauko susilpnėjimo prie anodo, teigiamųjų jonų migracijos link katodo ir elektrinio lauko stiprėjimo prie anodo procesai atsispindi vainikinio išlydžio srovės dedamojoje kaip nevienodai pasikartojantys srovės pulsai.

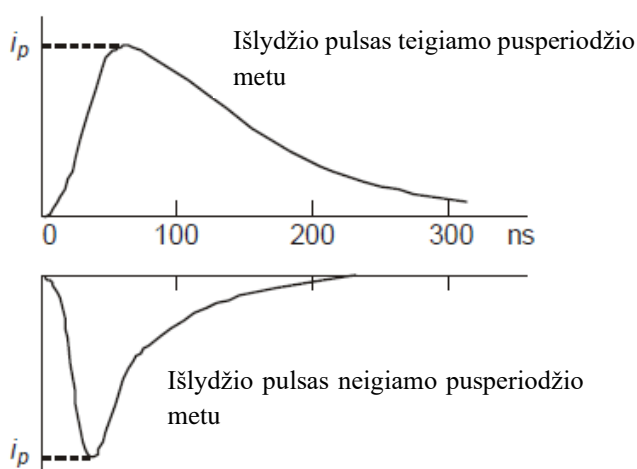
Toliau kylant įtampai srovės pulsavimas vis labiau mažės, kol srovė pasidarys tolygi. Susidaro stabilus švytintis vainikinis išlydis.

Didinant įtampą toliau susidaro strimerinis vainikinis išlydis. Jeigu įtampą kyli labai staigiai arba yra pakankamai aukšta, teigiamieji jonai nespėja migruoti link katodo. Jonai kaupiasi anodo paviršiuje taip iškraipydami elektrinį lauką, kuris darosi nehomogeniškas ir tam tikruose regionuose jonizacija suintensyvėja. Pasiekus kritinį jonų tankį prasideda foto jonizacija ir susidaro strimerinis išlydis.

Elektrodui esant neigiamam elektronai yra stumiami link tolimojo anodo. Elektronai jonizuoja molekules ir už savęs palieka sunkesnius teigiamuosius jonus. Elektrinis laukas, susidarantis tarp teigiamųjų jonų debesies ir neigiamųjų jonų bei elektronų debesies, susilpnina pagrindinį elektrinį lauką esantį tarp katodo ir anodo. Pasiekus tam tikrą teigiamųjų jonų koncentraciją suminis elektrinis laukas tarp debesų tampa nepakankamas, kad jame vyktų jonizacija. Todėl šioje zonoje nutrūksta visos elektronų griūtys, o elektronai prisijungia prie neutralių atomų ar molekulių, taip sudarydami neigiamuosius jonus. Šis debesis iš lėto judės link tolimo anodo, kol tuo metu teigiamųjų jonų debesis artės prie katodo, taip sustiprindamas pagrindinį elektrinį lauką zonoje prie katodo. Kai neigiamųjų jonų debesis nutolsta pakankamu atstumu nuo katodo, suminis elektrinis laukas įgauna vertę artimą pradinei, ir vėl prasideda jonizacija ir elektronų griūčių formavimasis.

Tokiu būdu prie katodo vyksta trumpos elektronų griūtys, sukuriančios srovę su periodiškai pasikartojančiu staigiu kilimo frontu ir lėtu eksponentiniu mažėjimu ligi kito kilimo fronto. Didinant įtampą srovės forma nesikeičia, bet didėja pulsavimo dažnis, todėl didėja ir vidutinė srovė [6]. Toliau didinant įtampą srovė tampa tolygi ir susidaro švytintis vainikinis išlydis. Dar keliant įtampą srovė vėl pradeda pulsuoti, tačiau nereguliariai ir su didesne amplitude nei ankstesni pulsai. Tai rodo strimerinio išlydžio susidarymą, po kurio susidarymo greitai pramušamas oro tarpas tarp elektrodų.

Vainikinio išlydžio pulsai teigiamojo ir neigiamojo pusperiodžių metu pavaizduoti 3 paveiksle.



3 pav. Vainikinio išlydžio pulsai teigiamojo ir neigiamojo pusperiodžių metu [7]

1.2.2. Vainikinis išlydis kintamos srovės elektros perdavimo linijose

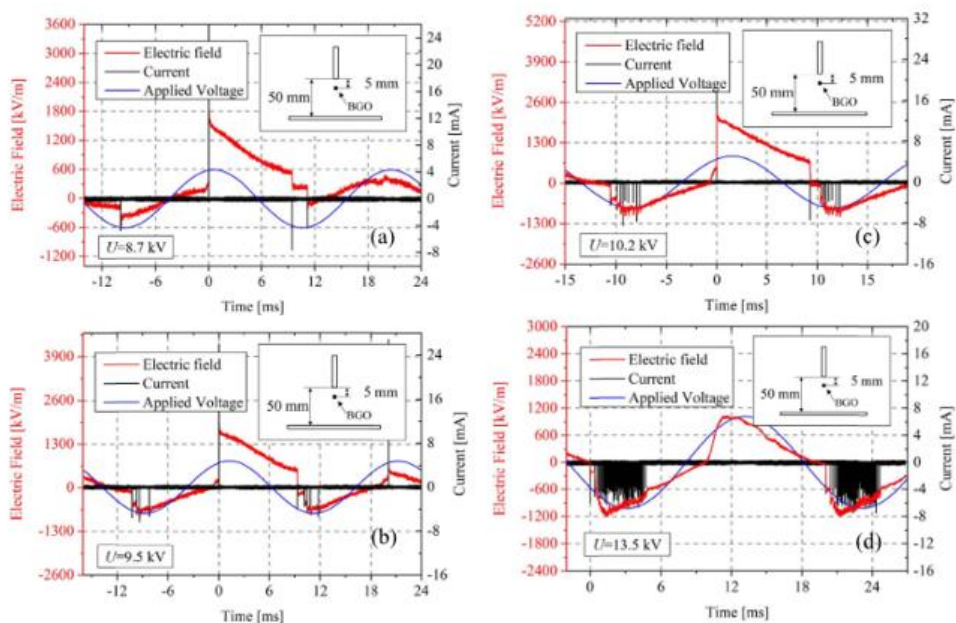
Kintamosios srovės perdavimo tinklo oro linijose laido poliškumas nenutrūkstamai keičiasi. Kiekvienos fazės tūrinis krūvininkas nuo laido atsiskiria kas pusę periodo, o pasikeitus laidininko poliškumui ir vėl yra pritraukiamas prie laido.

Vainikinio išlydžio susidarymą esant kintamai įtampai tyrinėjo X. Fan ir kiti [8]. Savo darbe autoriai matavo elektrinio lauko stiprį tam tikru atstumu nuo elektrodų naudodami elektro-optinių savybių turintį kristalą. Tyrimo metu gautos elektrinio lauko 5 cm nuo elektrodo, elektrodo įtamos ir išlydžio srovės diagramos, pateiktos 4 paveiksle.

Kintamosios srovės elektros perdavimo linijose vykstantis vainikinis išlydis kiekviename pusperiodyje turi dvi pagrindines stadijas. Pirmoji stadija tai greitai vykstantys elektronų griūtės procesai. Įtampai pasiekus pradinę įtampą prasideda dujų jonizacija, susidaro elektronų griūtys ir strimerinis išlydis. Teigiamojo pusperiodžio metu vykstant elektronų griūtims anodas absorbuoja susidarančius elektronus, tuo pat metu susidaro teigiamieji joniai kurie migruoja į tolį. Abu šie faktoriai įtakoja srovės šuolį matomą teigiamo pusperiodžio metu, tačiau net ir elektronų absorbcijos metu daugiausiai srovę įtakoja teigiamųjų jonų judėjimas [9]. Pulsų pasikartojimo dažnis priklauso nuo laidininko parametrų konkrečiame perdavimo linijos regione. Tačiau paprastai teigiamojo pusperiodžio metu, esant sausoms oro sąlygoms, yra pastebimas vienas srovės pulsas, o esant lietu pulsų skaičius pusperiodyje gali padidėti iki dešimties [7].

Neigiamo pusperiodžio procesas vyksta atvirkščiai palyginus su teigiamuoju pusperiodžiu. Prie katodo yra palyginus greitai pritraukiami teigiamieji joniai, o judrūs elektronai migruoja link tolimo anodo. Išlydžio metu matomas periodiškas srovės pulsavimas, kurio dažnis didinant įtampą didėja.

Antroji stadija tai lėtas krūvininkų migracijos procesas tarpe tarp elektrodų. Išlydžio metu susidarę joniai veikiami pagrindinio elektrinio lauko migruoja erdvėje tarp elektrodų.



4 pav. Elektrinio lauko stiprio tarpe tarp elektrodų, įtamos elektrodų paviršiuje ir išlydžio srovės grafikai kai: a) įtampa lygi 8,7 kV, b) įtampa lygi 9,5 kV, c) įtampa lygi 10,2 kV, d) įtampa lygi 13,5 kV [8]

4 paveiksle vaizduojamas elektrinio lauko stiprio tarpe tarp elektrodų ir vainikinio išlydžio srovės sąryšis. Paveiksle matyti (a dalis), kad laidininko įtampa viršija pradinę vainikinio išlydžio įtampą, todėl pasirodo vainikinio išlydžio srovės pulsas ir elektrinio lauko stiprio tarpe tarp elektrodų šuoliškas pakitimas. Srovės pulsas teigiamojo pusperiodžio metu yra didesnis nei neigiamojo, todėl ir elektrinio lauko stiprio kitimas yra didesnis teigiamojo pusperiodžio metu. Įtampai didėjant (b, c dalis) vainikinio išlydžio srovės pulso amplitudė teigiamojo pusperiodžio metu didėja staigiau nei neigiamojo pusperiodžio metu, bet neigiamojo pusperiodžio metu didėja vainikinio išlydžio srovės pulsų pasikartojimo dažnis, kai tuo tarpu viso teigiamojo pusperiodžio metu pastebimas tik vienas pulsas. Pasiekus tam tikrą laidininko įtampos vertę išlydis pereis iš pulsuojančio į švytintį vainikinį išlydį (d dalis). Elektrinio lauko stipris teigiamojo pusperiodžio metu didėja tačiau nebelieka šuoliško didėjimo, taip pat nebefiksuoja srovės pulsas. Neigiamojo pusperiodžio metu elektrinio lauko stipris pulsuoja aukštu dažniu, taip pat pulsuoja ir vainikinio išlydžio srovė. Tokia srovės forma atitinka neigiamąjį švytintįjį išlydį [8].

Paveiksle galima pastebėti, kad laidininko įtampa kertant laiko ašį įgauna nulinę reikšmę, tačiau elektrinio lauko stipris tarpe tarp elektrodų nėra lygus nuliui. Po kiekvieno pusperiodžio erdvėje tarp elektrodų lieka tam tikra krūvininkų koncentracija, kuri erdvėje išlieka ir prasidedant kitam pusperiodžiui [8]. Šie erdvėje likę krūviai įtakoja vainikinio išlydžio susidarymą kito pusperiodžio metu.

1.2.3. Vainikinio išlydžio padariniai

Vainikinis išlydis yra svarbus veiksnys projektuojant aukštos įtampos oro perdavimo linijas. Aukštos įtampos linijose elektriniai laukai dažniausiai yra netolygūs, nebent projekto metu yra imamas priemonių, kad laukai būtų kuo labiau tolygūs. Todėl linijose dažnai susidaro vainikinis išlydis kuris sukelia šias pasekmes [10]:

1. vainikinis išlydis sukelia šnypščiantį garsą ir mėlyną – violetinį vainiką, kuris šildo jį supančias dujas ir sukelia galios nuostolius linijoje;
2. vainikinis išlydis sukelia didelio dažnio pulsuojančią srovės dedamąją, kuri susideda iš aukštesnės eilės harmonikų sukeliančių radijo trikdžius;
3. vainikinis išlydis sukelia girdimus triukšmus, kurie turi neigiamų psichologinių pasekmių žmonėms;
4. laidininkų kraštuose ar defektų atplaišų vietose susidaro stiprus elektrinis laukas ir jo įgreitinti jonai ir elektronai perduoda savo momentą dujų molekulėms taip sukeldami laidininko vibracijas;
5. vainikinis išlydis ore sukelia chemines reakcijas, kurių produktai yra ozonas (O_3), azoto oksidas (NO) ir azoto dioksidas (ON_2), junginiai spartina izoliacijos senėjimą ir metalų oksidaciją.

Vainikinio išlydžio sukelti galios nuostoliai aukštos įtampos oro perdavimo linijose gali būti apskaičiuojami pagal F. W. Peeks pasiūlytą formulę:

$$p = \frac{244}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{s}} (U - U_n)^2 10^{-5} \quad (9)$$

Kur p - vainikinio išlydžio sukelti galios nuostoliai, kW/km; U – efektinė fazinė įtampa, kV; δ – oro tankio faktorius; r – laidininko spindulys, cm; s – atstumas tarp laidininkų, cm; f – dažnis, Hz; U_n – pradinė vainikinio išlydžio įtampa, kV, apskaičiuojama pagal (7) formulę.

Palyginus su perdavimo linijose patiriamais I^2R nuostoliais, vainikinio išlydžio sukeliama galios nuostoliai, vertinant vidutinę metinę nuostolių vertę, sudaro apie 10 % I^2R nuostolių vertės. Iki 400 km ilgio linijose vidutiniai metiniai vainikinio išlydžio sukeliama nuostoliai gali siekti 2 – 10 kW/km, o iki 800 km linijose 20 – 40 kW/km, dėl jose naudojamos aukštesnės įtampos vertės. Tam tikrose ypač aukštos įtampos oro perdavimo linijos atkarpose esant prastoms oro sąlygoms (lietui, šlapdribai) vainikinio išlydžio sukeliama nuostoliai gali pasiekti 300 kW/km vertę [7].

Vainikinio išlydis aukštos įtampos oro linijose turi reikšmingų neigiamų padarinių. Europoje vis plačiau pritaikant ypač aukštos įtampos oro linijas, vainikinio išlydžio sukeliama padariniai įgis vis didesnę svarbą linijų projektavime. Svarbu tyrimais identifikuoti vainikinio išlydžio susidarymo galimybes ir linijų projektavimo etape parinkti sprendinius maksimaliai sumažinančius išlydžių susidarymo tikimybę.

1.3. Įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio formavimuisi perdavimo linijose

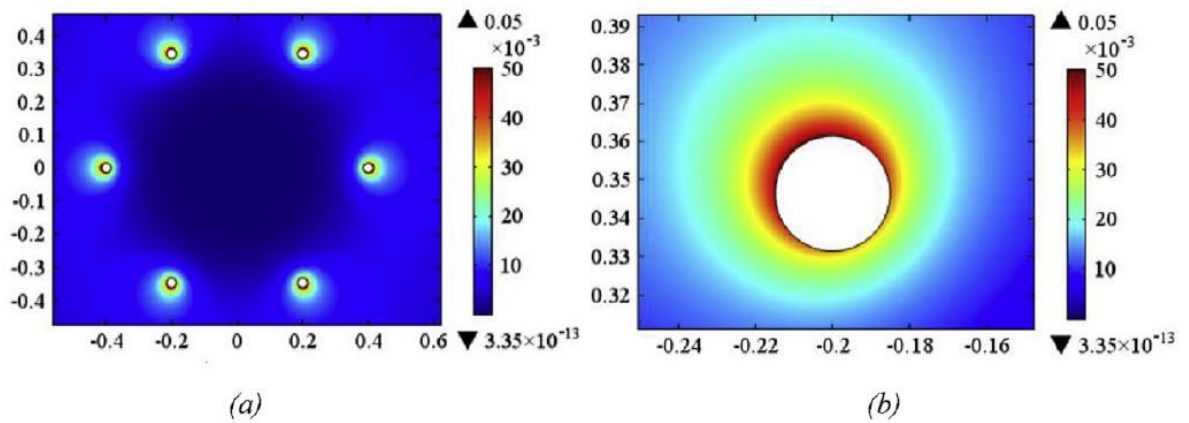
1.3.1. Laido defekto įtaka vainikinių išlydžių susidarymui

Laidininkas yra medžiaga viduje turinti daug laisvųjų elektronų, kurie gali laisvai judėti medžiagoje. Jeigu laidininkas yra paveikiamas elektrinio lauko, laisvieji krūvininkai esantys laidininko viduje pasiskirstys laidininko paviršiuje taip, kad elektrinio lauko stipris laidininko viduje būtų lygus nuliui, o potencialas laidininko paviršiuje visur būtų vienodas. Jeigu laidininkas turi mechaninių defektų, kurių matmenys yra mažesni nei laidininko, tai defekto paviršiuje susidarys didesnis krūvininkų tankis, nei likusiame laidininko paviršiuje. Todėl elektrinio lauko stipris prie laido defekto gali būti ženkliai didesnis negu prie likusio laidininko paviršiaus. Taip pat dėl defekto geometrijos elektrinis laukas prie defekto gali būti iškraipytas. Dėl šių priežasčių defektų vietose elektrinio lauko stipris pasiekia pradinį vainikinio išlydžio lauko stiprį ir čia prasideda vainikinis išlydis, nors likusioje laidininko dalyje laidininko įtampa dar nesiekia pradinės vainikinio išlydžio įtampos.

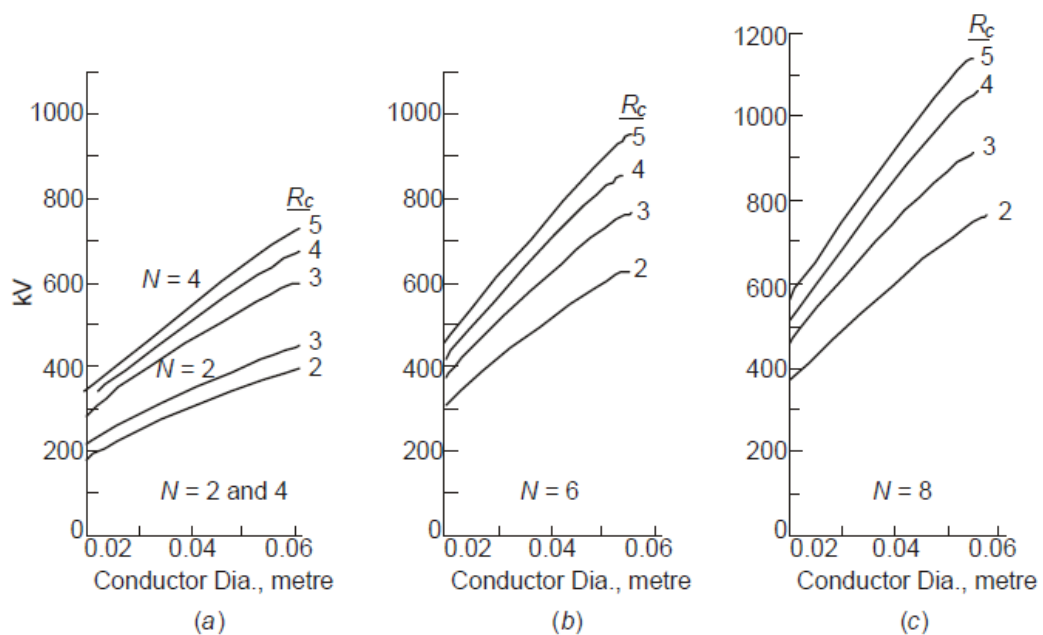
Transportuojant ar montuojant elektros perdavimo linijų laidus, atsiranda įvairių defektų atsiradimo galimybė, tai gali būti atplaišos, vijų iškilimai ar trūkumai. Šių defektų įtaka pradinei vainikinio išlydžio įtampai buvo nagrinėti Kai He ir kitų [11]. Autoriai nustatė, kad pakelta vija vainikinio išlydžio pradinę įtampai sumažina 4,28 %, atplaiša – 33,97 %, trūkusi vija – 37,59 %. Kai defektas yra pakelta vija vainikinio išlydžio pradinę įtampa sumažėja ne ženkliai, nes pakilusi vija neturi aštrių kampų kurie iškraipytų elektrinį lauką. Laukas iškraipomas nežymiai dėl vijos pakilimo ir atitolimo nuo kitų vijų. Tačiau atplaišos arba trūkusios vijos defekto kreivumo spindulys yra daug mažesnis negu vijos ir elektrinis laukas yra iškraipomas ženkliai daugiau.

1.3.2. Išskaidytosios fazės laidų skaičiaus įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams

Tam, kad sumažinti vainikinio išlydžio sukeliamus nuostolius 330 kV ir aukštesnės įtampos perdavimo linijose, vienos fazės laidininkas yra išskaidomas į konstrukciją, sudarytą iš dviejų ir daugiau laidininkų. Išskaidyti laidai vienas kito atžvilgiu simetriškai kabinami atstumu didesniu už laido spindulį ir linijoje šis atstumas yra palaikomas skėtikliais. Perdavimo linijos viena faze pratekantis krūvis pasiskirsto tolygiai tarp fazės laidininkų ir laidininkų sukuriama elektrinis lauko stipris erdvėje yra įtakojamas kiekvieno laido pagal superpozicijos principą (5, 6 pav.) [2].



5 pav. Šiašialaidės išskaidytosios fazės elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas: a – visoje konstrukcijoje; b – aplink vieną laidą [12]

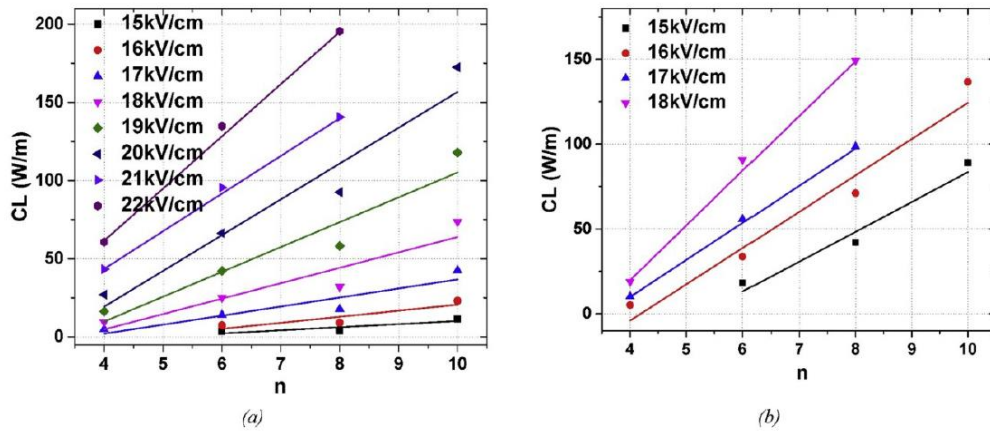


6 pav. Pradinės vainikinio išlydžio įtampos priklausomybė nuo laidininko diametro a) išskaidytosios fazės laidininkų skaičius $N = 2$ ir 4 , b) $N = 6$, c) $N = 8$. R_c – vainikinio išlydžio matavimo narvo spindulys [7]

Jeigu elektrinio lauko stipris E ir išskaidytosios fazės laido spindulys r yra nekintantys dydžiai, tai didėjant išskaidytosios fazės laidų skaičiui n , vainikinio išlydžio sukeliama nuostoliai CL tiesiškai didėja (10). Tai galima paaiškinti tuo, kad didėjant laidininkų skaičiui n taip pat didėja ir vainikinio išlydžio susidarymo taškų skaičius. Kuo daugiau vainikinio išlydžio susidarymo taškų tuo didesnė vainikinio išlydžio srovė ir generuojami nuostoliai.

$$CL = a_2 \cdot n + b_2 \quad (10)$$

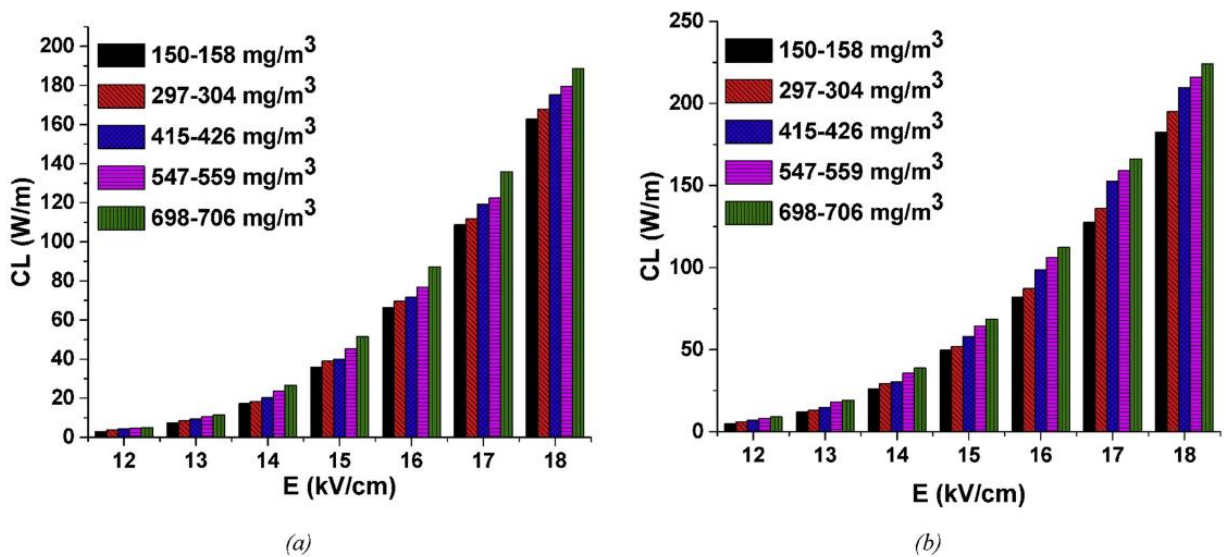
kur CL - vainikinio išlydžio sukeliama nuostoliai, n - išskaidytosios fazės laidų skaičiaus, a_1 , b_1 – konstantos.



7 pav. Išskaidytosios fazės laidų skaičiaus (n) įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams (CL) esant skirtingiems elektrinio lauko stipriams kai: a – laidininko tipas yra LGJ-400; b – laidininko tipas yra LGJ-630 [12]

1.3.3. Dulkių įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams

Jeigu elektrinio lauko stipris E ir dulkių dalelės dydis r_d yra nekintantys dydžiai, tai didėjant dulkių koncentracijai g , vainikinio išlydžio sukeliama nuostoliai CL didėja netiesiškai (8 pav.). Elektrinio lauko stipriui esant lygiam 17 kV/cm ir kai dulkių dalelės dydis yra tarp $0,25 \text{ mm}$ ir $0,5 \text{ mm}$, dalelių koncentracijai padidėjus nuo 154 mg/m^3 iki 702 mg/m^3 vainikinio išlydžio nuostoliai padidėja $40,1 \text{ W/m}$.



8 pav. Dulkių koncentracijos įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams kai dalelės dydis: a – $r_d < 0,125 \text{ mm}$; b – $0,25 \text{ mm} < r_d < 0,5 \text{ mm}$ [12]

Kai elektrinio lauko stipris E ir dulkių dalelės dydis r_d yra nekintantys dydžiai, vainikinio išlydžio nuostolių priklausomybė nuo dulkių koncentracijos g bus:

$$CL = a_3 \cdot 10^{b_3 \cdot \sqrt{g}} \quad (11)$$

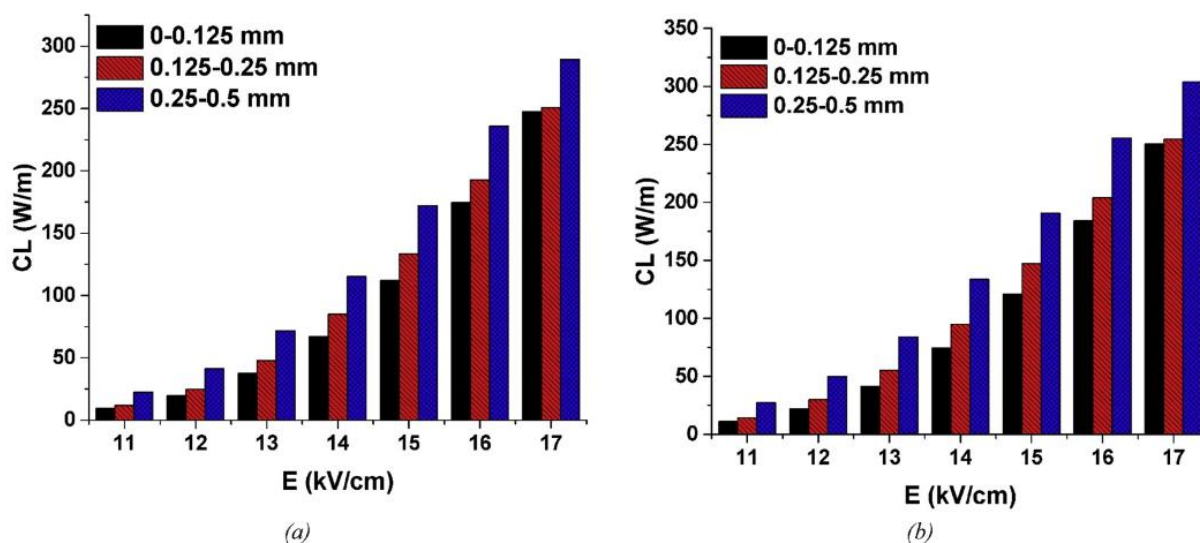
kur CL - vainikinio išlydžio sukeliama nuostoliai, g -dulkių dalelių koncentracija mg/m^3 , a_3 , b_3 – konstantos.

Dulkių dalelių dydžiui didėjant, didėja ir jų įtaka vainikinio išlydžio nuostoliams. Kai dulkių dalelių koncentracija g ir elektrinio lauko stipris E yra nekintantys dydžiai vainikinio išlydžio nuostoliai, didėjant dalelės dydžiui r_d , didėja netiesiškai pagal (12) lygtį:

$$CL = a_4 \cdot 10^{b_4 \cdot \sqrt{r_d}} \quad (12)$$

kur CL - vainikinio išlydžio sukeliami nuostoliai, r_d - dulkių dalelių dydis mm, a_3 , b_3 – konstantos.

9 paveiksle parodyta kaip kinta vainikinio išlydžio nuostoliai esant 8 x LGJ720 laidininko tipui kintant dalelės dydžiui r_d . Elektrinio lauko stipriui esant lygiam 17 kV/cm ir kai dulkių dalelių koncentracija yra nuo 698 mg/m³ ir 706 mg/m³, kintant dalelės dydžiui nuo 0,125 mm iki vertės esančios intervale 0,25 – 0,5 mm, vainikinio išlydžio nuostoliai padidėja 54,05 W/m.



9 pav. Dulkių dalelių dydžio įtaka vainikinių išlydžių sukeliams nuostoliams kai dulkių dalelių koncentracija g yra: a – $547 < g < 559 \text{ mg/m}^3$; b – $698 < g < 706 \text{ mg/m}^3$

1.4. Elektrostatinio lauko stiprio skaičiavimas

Elektrostatinis laukas yra aprašomas dvejomis Maksvelo lygtimis [13].

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (11)$$

$$\nabla \times E = 0 \quad (12)$$

Kur E – elektrinio lauko stipris, V/m; ρ – tūrinis elektros krūvio tankis, C/m³; ϵ_r – santykinė dielektrinė skvarba, vnt.; ϵ_0 – elektrinė konstanta lygi $8,85 \cdot 10^{-12}$, F/m.

10 lygtis parodo, kad elektrinio lauko stiprio rotorius lygus nuliui. Taip yra nes elektrostatiniame lauke nėra kintančių magnetinių laukų, kurie sukurtų kintantį sūkurinį elektrinį lauką. Toks laukas kuriame nėra elektrinio lauko sūkurių, vadinamas potencialiniu lauku [13].

Potencialinį lauką galima apibūdinti skaliarine funkcija – potencialu $V(x, y, z)$. Tai tokia skaliarinė koordinatinių funkcija, kurios gradientas lygus lauko stiprio vektoriaus moduliui, o vektorių ∇V ir E

kryptys yra priešingos (11). Fiziškai elektrostatinio lauko potencialas yra lygus darbui, kurį turi atlikti lauko jėgos, pernešdamos vienetinį teigiamąjį taškinį krūvį iš šio taško į tašką, kuriame jo neveikia lauko jėgos [13].

$$E = -\nabla V \quad (13)$$

11 lygtį įstatę į 11 lygtį gauname:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (-\nabla V) &= \frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \\ \nabla^2 V &= -\frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \end{aligned} \quad (14)$$

12 lygtis yra vadinama Poissono lygtimi. Descartes' o kordinačių sistemoje lygtį galima užrašyti:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (15)$$

Lauko sritims, kuriose nėra krūvių, taikoma Laplace' o lygtis:

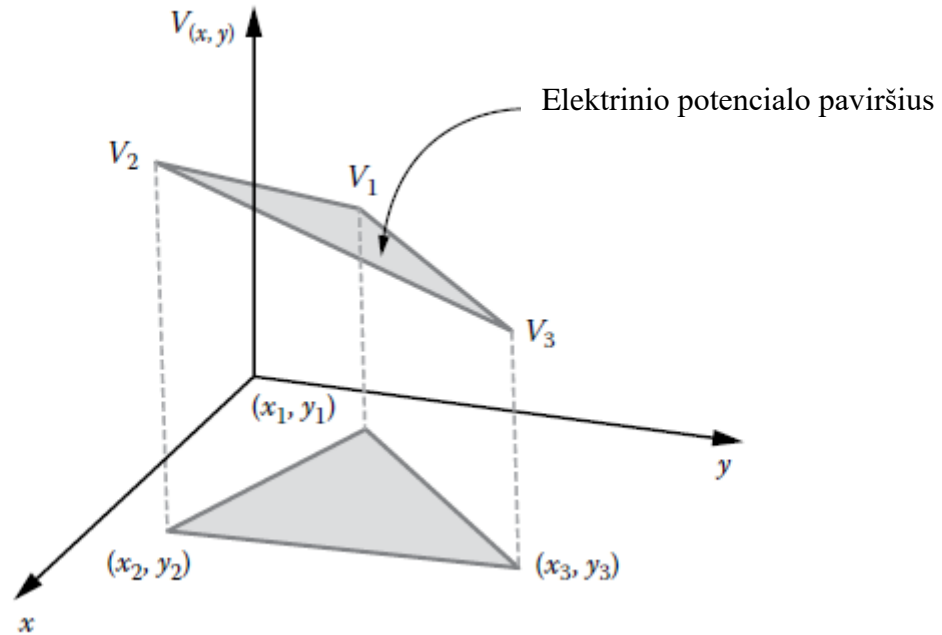
$$\nabla^2 V = 0 \quad (16)$$

Poissono ir Laplace' o lygtys yra antrosios eilės tiesinės dalinių išvestinių diferencialinės lygtys, kurių sprendiniai yra tolydinės visų trijų koordinačių funkcijos. Matematikoje tokios funkcijos vadinamos harmoninėmis. Iš visų sprendinių, atitinkančių nagrinėjamas diferencialines lygtis, visumos tik vienintelis sprendinys atitinka papildomas sąlygas, vadinamas kraštinėmis sąlygomis. Tiesioginis Poissono ir Laplace' o lygčių sprendimas yra sudėtingas, todėl šioms lygtims išspręsti yra taikomi specialūs metodai [13].

Tobulėjant kompiuterinėms technologijoms išpopuliarėjo skaitiniai lygčių sprendimo metodai. Plačiausiai taikomas skaitinis lygčių sprendimo metodas vadinamas baigtinių elementų metodu. Baigtinių elementų metodo esmė yra skaičiuojamos srities skaidymas į paprastas geometrines figūras, vadinamas baigtiniais elementais [14]. Vienmačiuose uždaviniuose baigtiniai elementai yra linijų atkarpos, dvimačiuose - dažniausiai parenkami trikampiai arba keturkampiai, o trimačiuose uždaviniuose – tetraedrai, lygiagretainiai, gretasieniai [15]. Baigtiniai elementai sudaromi vadovaujantis šiais principais [16]:

1. baigtiniai elementai yra jungiami mazguose;
2. baigtinio elemento dydis nėra svarbus, bet regionuose, kur tikimasi didesnio potencialo kitimo, reikalingas didesnis baigtinių elementų skaičius;
3. viename baigtiniame elemente gali būti tik vieno tipo homogeniška terpė.

Baigtinių elementų visuma sudaro baigtinių elementų tinklą. Potencialo pasiskirstymas baigtiniame elemente yra nustatomas interpoliacijos metodu atsižvelgiant į dydžio vertes elemento mazguose. Kiekvienam baigtiniam elementui yra parenkama aproksimacijos funkcija, kuri pakeičia sudėtingą diferencialinę funkciją tame regione. Paprastai atskirų baigtinių elementų aproksimuojančia funkcija parenkamas ne aukštesnės kaip trečios eilės polinomas [15].



10 pav. Dvimačio baigtinio elemento elektrinio potencialo linijinė interpoliacija [16]

8 paveiksle pavaizduotas baigtinis elementas, kurio aproksimacijos funkcija parenkama:

$$V(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (17)$$

Kur, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - koeficientai.

Žinant elektrinio potencialo reikšmes elementų mazguose galutinę interpoliacijos funkciją galima užrašyti:

$$V(x, y) = N_1(x, y)V_1 + N_2(x, y)V_2 + N_3(x, y)V_3 \quad (18)$$

N yra vadinama baigtinio elemento formos funkcija. Trikampio formos baigtiniam elementui formos funkcija tenkina šias sąlygas [16]:

$$N_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^3 N_i(x, y) = 1$$

Formos funkcija N_i mazge i įgauna vertę lygią 1, o kituose elemento mazguose įgauna vertę lygią 0. Formos funkcijų suma bet kuriame baigtinio elemento paviršiaus taške lygi vienetui.

Tam, kad rasti elektrinio potencialo vertes tinkamo mazguose sudaroma algebrinių lygčių sistema, sudaryta iš lygčių skaičiaus lygaus mazgų skaičiui visoje uždavinio srityje, kurios pavidalas matricinėje formoje yra [16]:

$$[C] \cdot [V] = [Q] \quad (19)$$

Kur $[C]$ – koeficientų, priklausančių nuo tinklelio geometrijos, matrica, vadinama standumo matrica; $[V]$ – mazgų potencialo verčių matrica, $[Q]$ – verčių, priklausančių nuo baigtiniame elemente esančio krūvio, matrica, vadinama poveikio vektoriumi.

Kaip ir visuose uždaviniuose, kuriuose yra sprendžiamos diferencialinės lygtys, matricos sprendinius gauname po kraštinių sąlygų įvertinimo. Dvimačio uždavinio sritis, kurioje norime gauti sprendinį, yra apibrėžiama kraštinėmis. Kraštinėms nustatomos kraštinės sąlygos. Pagrindinės kraštinės sąlygos yra šios [16]:

1. Dirichlet sąlygos. Nurodomos žinomos elektrinio potencialo vertės laidininkų paviršiuje, žemės potencialo paviršius.
2. Neumann'o sąlygos. Nurodomos kraštinės, kurių nekerta elektrinio lauko linijos, tai yra elektrinio lauko stiprio statmenoji dedamoji E_T kraštinės paviršiuje yra lygi nuliui:

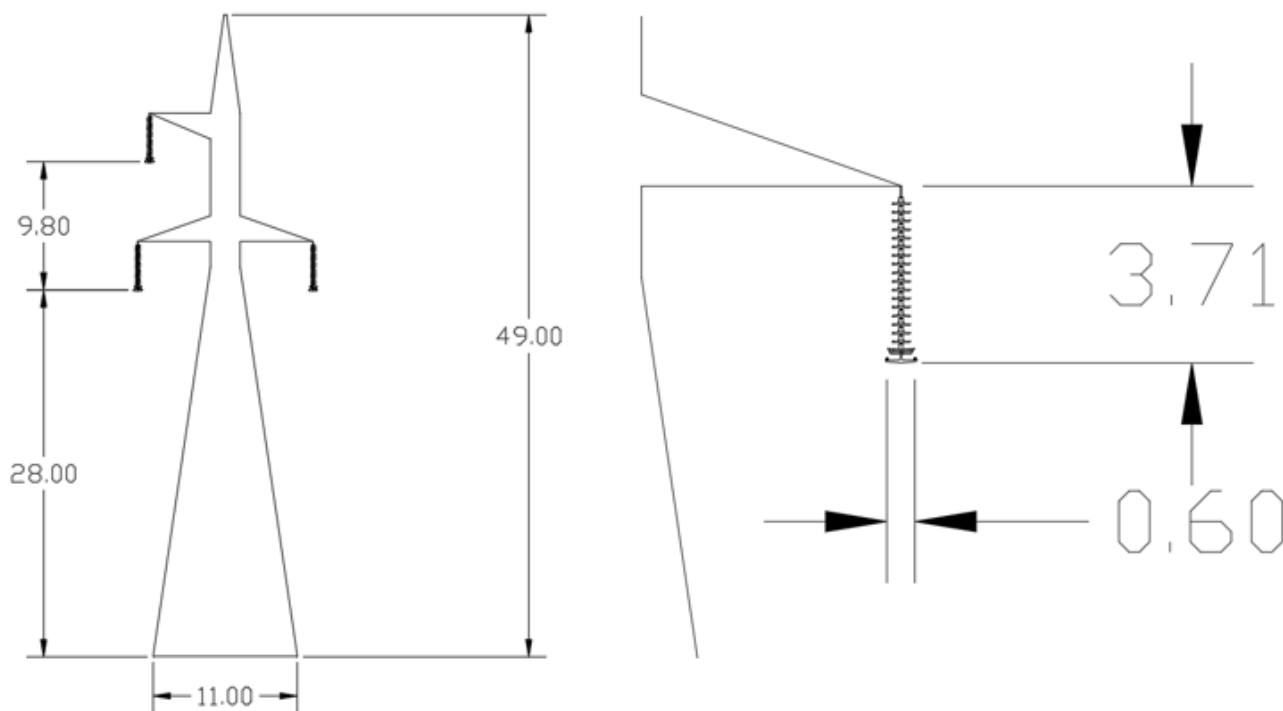
$$E_T = \frac{\partial V}{\partial n} = 0$$

Įvertinus kraštines sąlygas yra sprendžiama (17) lygčių sistema ir yra gaunamos elektrinio potencialo reikšmės visuose uždavinio srities mazguose. Sprendinius įrašius į (16) lygtį randamos elektrinio potencialo reikšmės bet kuriame uždavinio srities taške. Pasinaudoję (11) lygtimi galime rasti elektrinio lauko stiprio reikšmes bet kuriame uždavinio srities taške.

2. Modeliavimas

Įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio susidarymui buvo tiriama pasinaudojant COMSOL Multiphysics 5.1 paketu. Tai yra pažangiais skaitiniais metodais paremtas bendrinių fizikinių problemų sprendimo paketas, kurį galima panaudoti modeliuojant įvairias fizikines problemas projektavimo, inžinerijos ar tyrimų srityse. Paketas diferencialines lygtis sprendžia naudodamas baigtinių elementų metodą. Vainikinio išlydžio susidarymas tirtas naudojant COMSOL Multiphysics AC/DC modulį.

Tyrimui pasirinkta 330 kV įtampos viengrandė linija (11 pav.). Atramos geometriniai matmenys parinkti pagal AB „Litgrid“ pateikiamus tipinius oro linijų atramų techninius projektus [17]. Pasirinkta atrama K330/49. Izoliatorių girliandos parinktos atsižvelgiant į AB „Litgrid“ standartinius techninius reikalavimus 400 - 110 kv įtampos oro linijų stiklinių izoliatorių girliandų sudėčiai [18], standartinius techninius reikalavimus 330-110 kv įtampos oro linijų stikliniams lėkštiniais izoliatoriams [19], izoliatorių katalogus [20]. Laidininkai parinkti remiantis atramos projektu. Vienos fazės srovė perduodama dviem 386-AL1/34-ST1A tipo laidais [21]. Apsaugai nuo žaibo išlydžio naudojamas ŽTSK (žaibolaidžio trosas su šviesolaidiniu kabeliu) tipo kabelis.



11 pav. Modeliuojamos 330 kV atramos geometriniai matmenys, nurodyti metrais

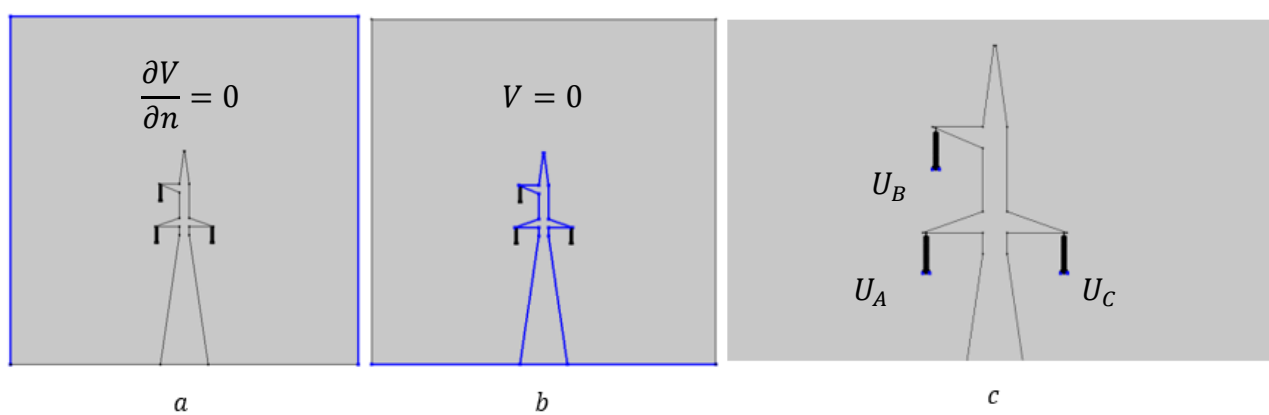
Geometrija braižoma AutoCAD paketo pagalba ir yra importuojama į COMSOL Multiphysics 5.1 paketo aplinką (10 pav.). Modelis kuriamas dviejų dimensijų tam, kad supaprastinti modelio geometriją, palengvinti ir pagreitinti programinio paketo darbą. Taip pat supaprastintai modeliuojama ir dvilaidės išskaidytosios fazės sistemos laikančioji konstrukcija. Konstrukcijos detalių geometrija supaprastinama, modeliuojamas tik konstrukcijoje tvirtinamų laidininkų išorinis vijų sluoksnis. Supaprastinimų įtaka galutiniams rezultatams priimama esanti nedidelė [16].

330 kV perdavimo linija modeliuojama dviem pjūviais:

1. pjūvis linijos dalyje su atrama;
2. pjūvis linijos dalyje tarp atramų (panaikinama atrama ir izoliatorių girliandos).

Importavus geometriją, skirtingoms geometrinėms zonoms parenkamos skirtingos fizikinės savybės priklausančios nuo medžiagos. Savybės parinktos iš COMSOL Multiphysics bibliotekoje esančių medžiagų. Laidininkų šerdims parenkamas plienas, išorei parenkamas aliuminis. Bokšto konstrukcijos zonai parenkamas plienas. Izoliatoriams plienas ir stiklas. Likusi erdvė priskiriama orui. Oro savybės parenkamos esant standartiniams slėgiui ir temperatūrai (273,15°K, 100 kPa). Modeliuojant elektrinio lauko stiprį svarbiausia medžiagos savybė yra jos santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r .

Modelyje nustatomos Dirichlet ir Neumann'o kraštinės sąlygos (12 pav.).



12 pav. Kraštinės sąlygos: a – Neumann'o; b, c – Dirichlet

Laidininkams parenkamos fazinės įtampos:

$$U_A = \frac{330000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin(2\pi ft)$$

$$U_B = \frac{330000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$U_C = \frac{330000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Kur U – fazinės įtampos amplitudė, V; f – tinklo dažnis, Hz; t – laikas, s.

Laidininkų sistemai apskaičiuojamos elektrinių potencialų vertės. Elektrinį lauką modeliuojame kai A fazinės įtampa pasiekia maksimumo vertę tai yra kai:

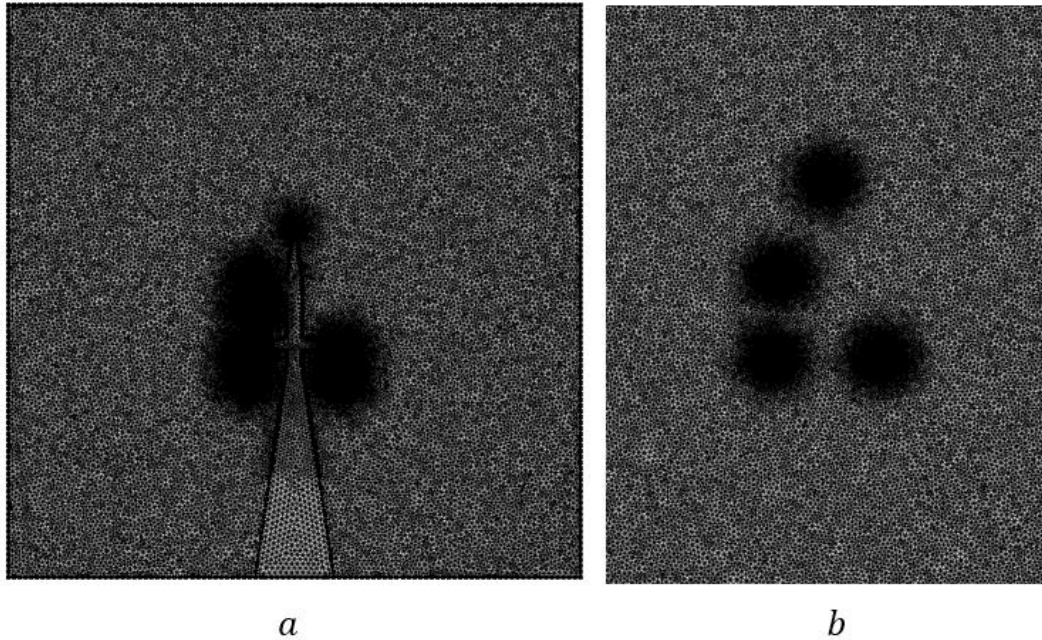
$$\frac{d}{dt} U_f \sin(2\pi ft) = 0$$

$$t = 0,005 \text{ s.}$$

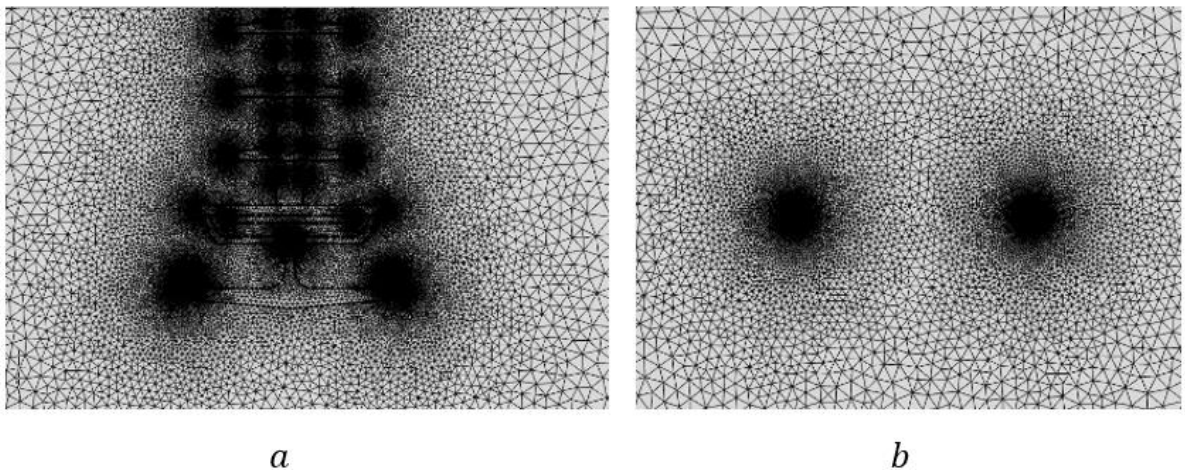
Kur U_f – fazinės įtampos amplitudė, V; f – tinklo dažnis, Hz; t – laikas, s.

Jeigu šiuo laiko momentu laidininko paviršiuje susidariusio maksimalaus elektrinio lauko stiprio E_{max} vertė yra didesnė arba lygi pradiniam vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipriui E_n , laikome, jog laidininko paviršiuje susidaro vainikinis išlydis.

Visoje modelio zonoje sudarytas baigtinių elementu tinklelis sudarytas iš trikampių baigtinių elementų automatiškai parinktų sistemos (13, 14 pav.).



13 pav. Baigtinių elementų tinklelis: a – pjūvis linijos dalyje su atrama; b – pjūvis linijos dalyje tarp atramų



14 pav. Baigtinių elementų tinklelis priartintas laidininkų vaizdas: a – pjūvis linijos dalyje su atrama; b – pjūvis linijos dalyje tarp atramų

Sugeneravus baigtinių elementų tinklelį apskaičiuojamas elektrinio potencialo pasiskirstymas visoje uždavinio srityje. Atliekant modeliavimą tariame, kad elektrinio lauko stipris laiko momentu $t = 0,005$ s yra nusistovėjęs ir nevyksta jokie pereinamieji procesai. Taip pat erdvėje aplink laidininkus nėra likusio tūrinio krūvio po prieš tai buvusio įtampos pusperiodžio. Toks tūrinio krūvio egzistavimas galėtų paveikti vainikinio išlydžio susidarymą, tačiau darbe to nevertiname. Taigi, srityse, kuriose ieškomas elektrinis potencialas, krūvininkų tankis lygus nuliui, todėl elektrinio potencialo vertės apskaičiuotos naudojant Laplace'o lygtį (16). Žinant elektrinio potencialo

pasiskirstymą bet kuriame uždavinio srities taške galime apskaičiuoti elektrinio lauko stiprį bet kuriame uždavinio srities taške, naudodami (13) lygtį. Šias lygtis išsprendžia COMSOL Multiphysics paketas.

Modeliavimo metu gautos maksimalaus elektrinio lauko stiprio laidininkų paviršiuje E_{max} vertės yra palyginamos su pradiniu vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipriu E_n , kuris apskaičiuojamas pagal F. W. Peek's pasiūlytą formulę [10]:

$$E_n = 30,3m\delta \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r\delta}} \right) \quad (20)$$

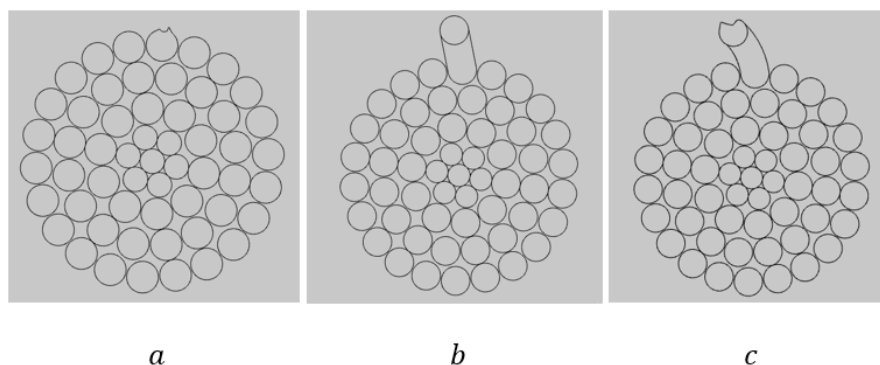
Kur E_n – pradinis vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipris, kV/cm; m – šiuurkštumo faktorius; δ – oro tankio faktorius; r – laidininko spindulys, cm.

Modeliavimas atliekamas esant standartiniams slėgiui ir temperatūrai (273,15°K, 100 kPa), todėl oro tankio faktorius $\delta = 1$. Šiuurkštumo koeficientas parenkamas $m = 0,84$ [22]. Pradinio elektrinio lauko stiprio vertės apskaičiuotos skirtingų diametrų laidininkams, ir laidininkų spinduliai pateikti 1 lentelėje.

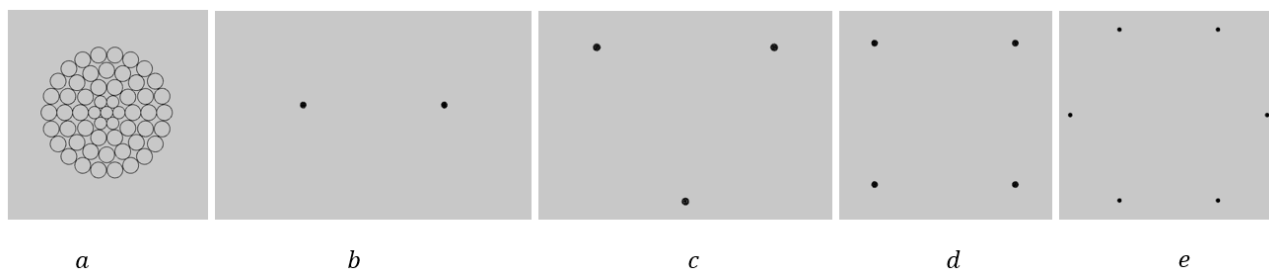
1 Lentelė. Pradinis elektrinio lauko stipris esant skirtingiems laidininkų tipams ir orui

Laidininko tipas	Spindulys r , cm	Pradinis elektrinio lauko stipris E_n , kV/cm
Oro dielektrinis atsparumas	-	30,00
Apvalus, monolitinis	1,335	38,11
386-AL1/34-ST1A	1,335	32,02
511-AL1/34-ST1A	1,535	31,57
653-AL1/34-ST1A	1,72	31,24
1046-AL1/34-ST1A	2,15	30,62

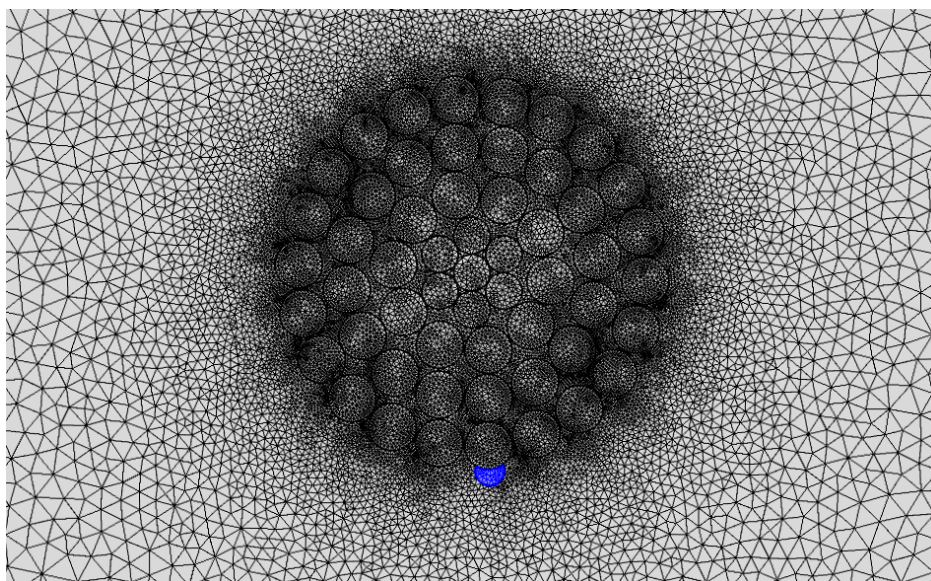
Įvairių veiksnių įtaka vainikinio išlydžio susidarymui analizuojama pjūvyje linijos dalyje tarp atramų. Tiriama paviršiaus šiuurkštumo, laidų defektų (15 pav.), išskaidytosios fazės laidininkų skaičiaus (16 pav.), vandens lašo (17 pav.) ir dulkių (18 pav.) įtaka.



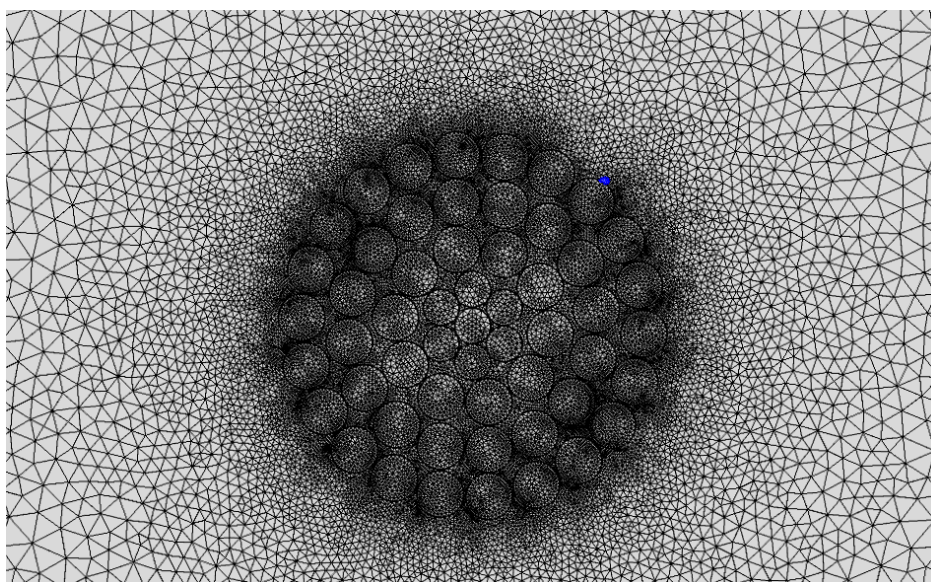
15 pav. Laidininko defektų modelis: a – įbraukta vija, b – Pakilusi vija, c – trūkusi vija



16 pav. Išskaidytosios fazės modelis: a – vienlaidė, b – dvilaidė, c – trilaidė, d – keturlaidė, e – šešialaidė sistemos



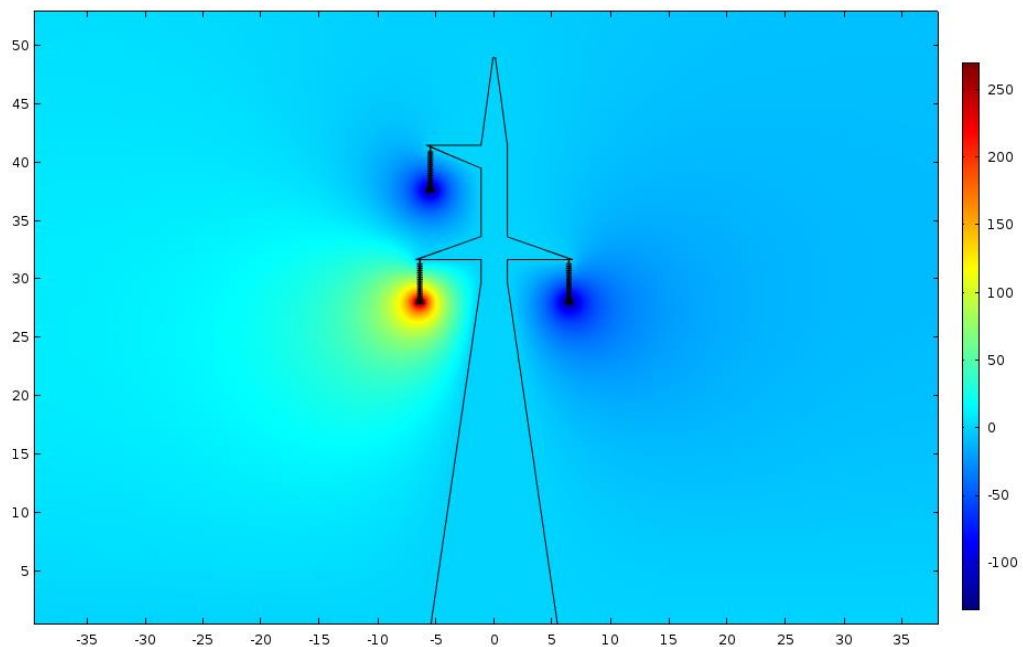
17 pav. Laidininko ir vandens lašo (pažymėtas mėlynai) modelio baigtinių elementų tinklelis



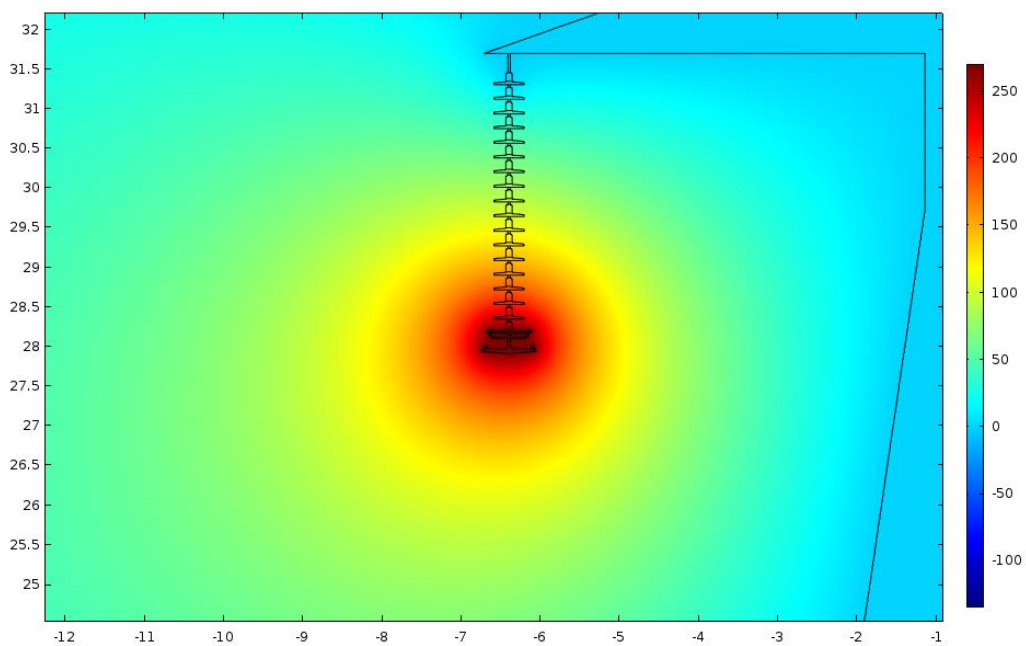
18 pav. Laidininko ir dulkės (pažymėta mėlynai) modelio baigtinių elementų tinklelis

3. Rezultatai

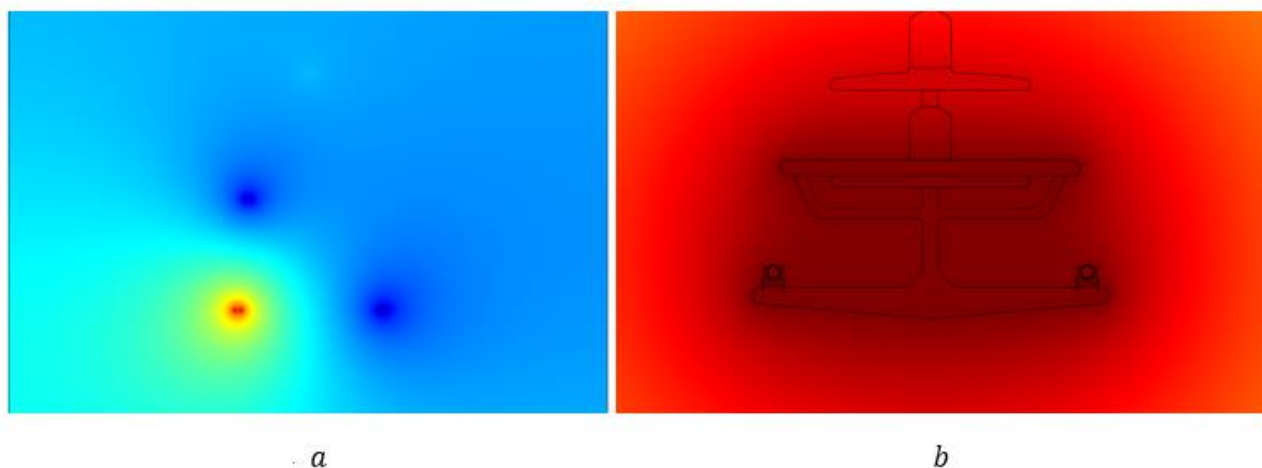
Programinio paketo COMSOL Multiphysics elektrinio potencialo pasiskirstymo (laiko momentu $t = 0,005$ s) pagal (16) lygtį modeliavimo rezultatai visoje uždavinio srityje pateikiami 19 paveiksle. 20, 21, 22 paveiksluose pateikiamas elektrinio potencialo pasiskirstymas tam tikrose uždavinio srityse.



19 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas visoje uždavinio srityje

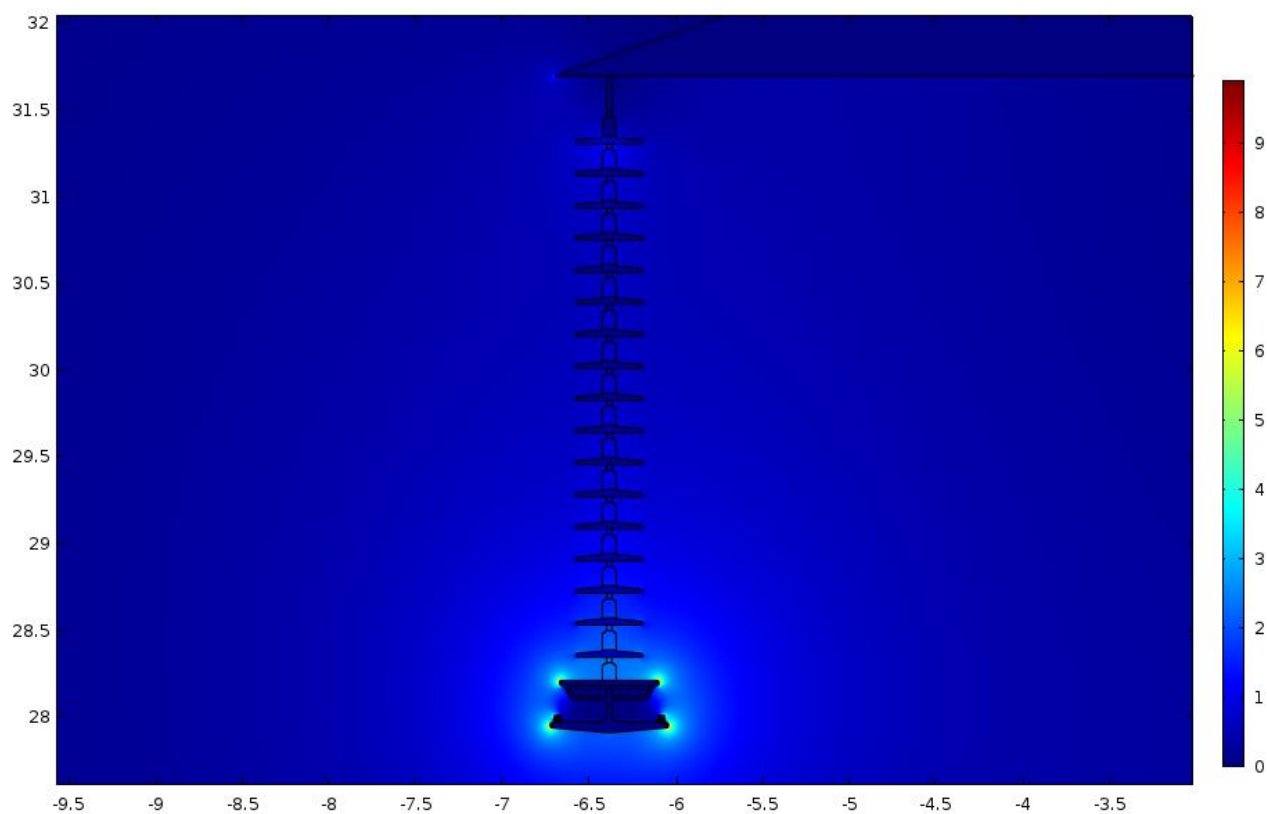


20 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas aplink izoliatorių girliandą

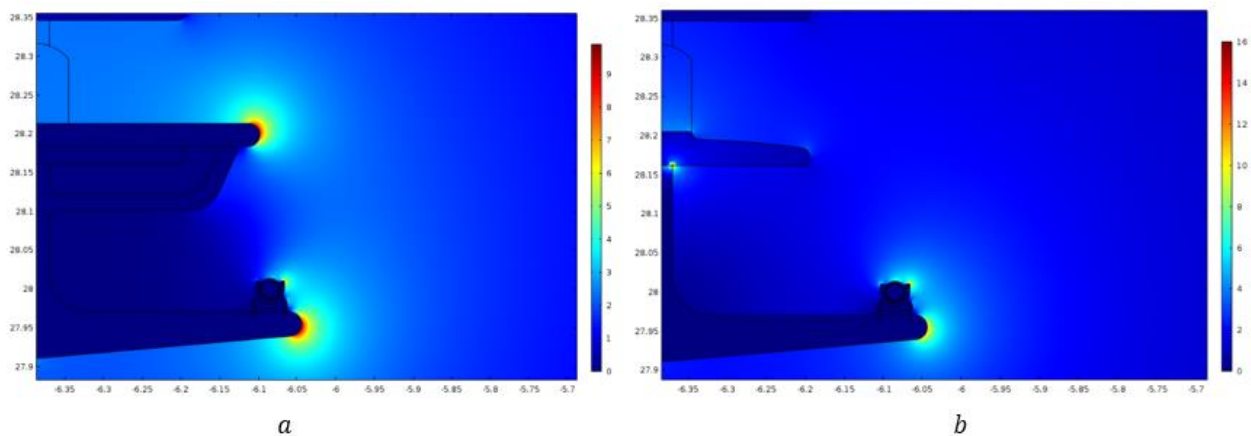


21 pav. Elektrinio potencialo pasiskirstymas: a – perdavimo linijos pjūvyje tarp atramų; b – pjūvyje atramoje, dvilaidės konstrukcijos srityje

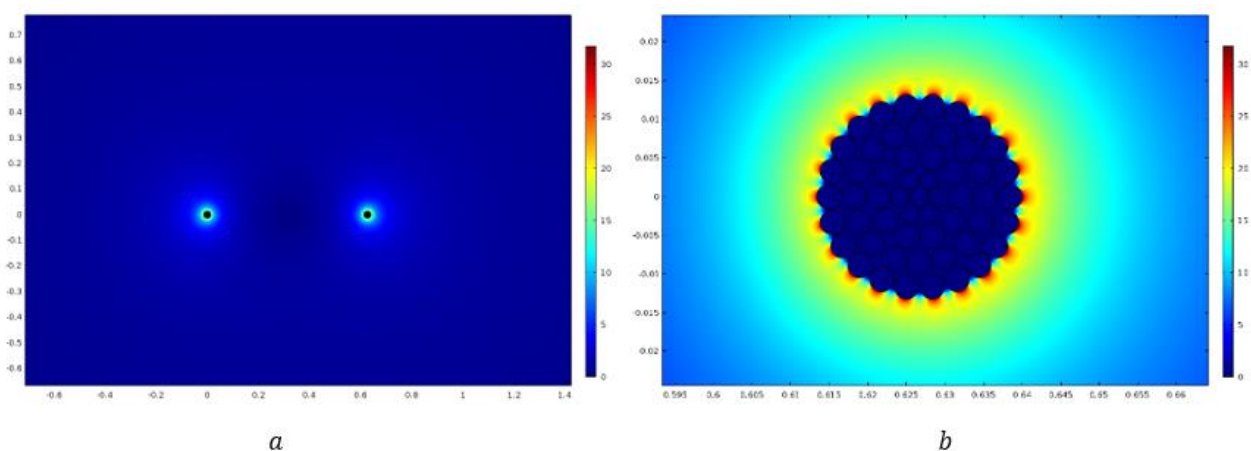
Sumodeliavus elektrinio potencialo pasiskirstymą, paketas pagal (13) lygtį apskaičiuoja elektrinio lauko stiprio pasiskirstymą visoje uždavinio srityje. 22, 23, 24 paveiksluose pateikiamas elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas tam tikrose uždavinio srityse. Rezultatai palyginami 2 lentelėje.



22 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininkus ir izoliatorių girliandą pjūvyje atramoje. Maksimalus stipris $E_{max} = 10,405 \text{ kV/cm}$



23 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininkus dvilaidės konstrukcijos srityje: a – su apsauginiu žiedu, $E_{max} = 10,405$ kV/cm; b – be apsauginio žiedo, $E_{max} = 16,94$ kV/cm



24 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininkus pjūvyje tarp atramų: a – fazinių laidininkų vaizdas; b – priartintas vieno laidininko vaizdas dvilaidėje sistemoje. $E_{max} = 32,03$ kV/cm

2 Lentelė. Modeliavimo rezultatų pjūviuose atramoje ir tarp atramų palyginimas

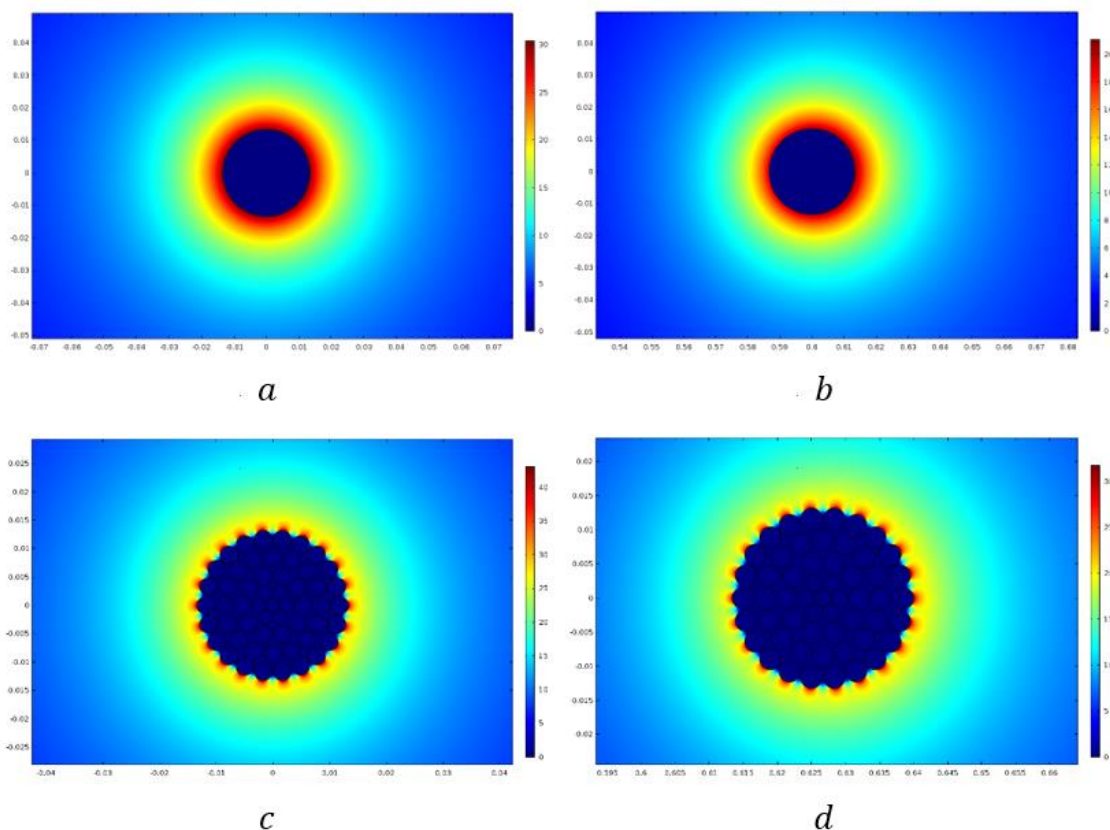
Pjūvis	Maksimalus elektrinio lauko stipris E_{max} , kV/cm	Pradinis elektrinio lauko stipris E_n , kV/cm	Ar susiformuoja vainikinis išlydis
Atramoje su apsauginiu žiedu	10,41	30,00	Ne
Atramoje be apsauginio žiedo	16,94	30,00	Ne
Tarp atramų	32,03	32,02	Taip

Iš gautų rezultatų matyti, kad mažiausias elektrinio lauko stipris susidaro pjūvyje atramoje, fazinių laidininkų laikančiosios konstrukcijos paviršiuje, kai yra naudojamas apsauginis žiedas. Taip yra todėl, nes elektrinis potencialas yra lygus visame konstrukcijos paviršiuje, tai yra, konstrukcija yra ekvipotencialinis paviršius. Todėl elektrinio lauko stipris laidininkų konstrukcijos paviršiuje pasiskirsto tolygiau palyginus su situacija atramoje be apsauginio žiedo ar tarp atramų.

Taip pat, matome, jog naudojant fazinių laidininkų laikančiąją konstrukciją be apsauginio žiedo, maksimalus elektrinio lauko stipris laidininkų paviršiuje padidėja 63 procentais. Apsauginis žiedas išlygina įtampą didelėje laidininkų konstrukcijos dalyje. Taip pat apsauginis žiedas sumažina įtampą pirmajame girliandos izoliatoriuje.

Pjūvyje tarp atramų maksimalaus elektrinio lauko stiprio vertė laidininko paviršiuje pasiekia vertę labai artimą pradiniam vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipriui. Taip yra, nes laido matmenys yra daug mažesni nei laikančiosios konstrukcijos. Taip pat laido paviršius sudarytas iš vijų, kurios padidina paviršiaus šiurkštumą ir sustiprina paviršinį elektrinio lauko stiprį.

25 paveiksle pavaizduotas paviršinio elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas esant skirtingam laidininkų paviršiaus šiurkštumui, pjūvyje tarp atramų. Lygaus paviršiaus laidininkui šiurkštumo koeficientas priimtas lygus 1, 386-AL1/34-ST1A tipo laidininkui lygus 0,84. Rezultatai palyginami 3 lentelėje.



25 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininką: a – monolitinis vienlaidėje sistemoje, $E_{max} = 30,68$ kV/cm; b – monolitinis dvilaidėje sistemoje, $E_{max} = 21,23$ kV/cm; c – daugiagyslis vienlaidėje sistemoje, $E_{max} = 43,69$ kV/cm; d – daugiagyslis dvilaidėje sistemoje, $E_{max} = 32,03$ kV/cm

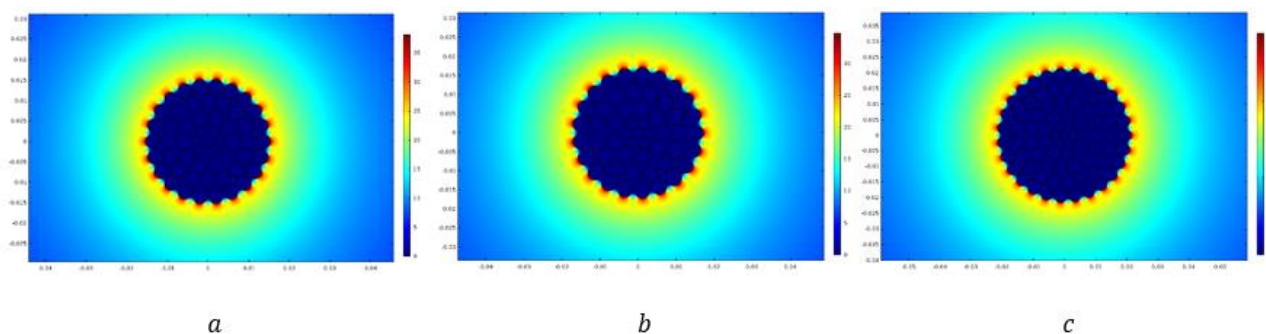
3 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingiems šiurkštumo koeficientams palyginimas

Laidininko tipas	Maksimalus elektrinio lauko stipris E_{max} , kV/cm	Pradinis elektrinio lauko stipris E_n , kV/cm	Ar susiformuoja vainikinis išlydis
386 monolitinis (lygus)	30,68	38,11	Ne
2x386 monolitinis (lygus)	21,23	38,11	Ne
386-AL1/34-ST1A	43,69	32,02	Taip
2x386-AL1/34-ST1A	32,03	32,02	Taip

25 paveikslo a dalyje matyti, kad elektrinio lauko stipris tolygiai pasiskirsto erdvėje supančioje laidininko paviršių. Tuo tarpu laidininko sudaryto iš vijų (25 pav, c) paviršiaus nelygumai iškraipo elektrinio lauko stiprį erdvėje aplink laidininką ir vijų paviršiuje jį sustiprina. Toms pačioms

sąlygoms esant laidininko sudaryto iš vijų paviršiuje esantis maksimalus elektrinio lauko stipris yra 13,01 kV/cm didesnis esant vienam laidininkui fazėje ir 10,79 kV/cm esant dviem laidininkams fazėje.

26 paveiksle pavaizduotas paviršinio elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas esant skirtingam laidininkų spinduliui, pjūvyje tarp atramų. Rezultatai palyginami 4 lentelėje.



26 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininką esant skirtingiems laidininko skerspjūviams: a – 511 markės, $E_{max} = 38,67$ kV/cm; b – 653 markės, $E_{max} = 35,25$ kV/cm; c – 1046 markės, $E_{max} = 29,24$ kV/cm

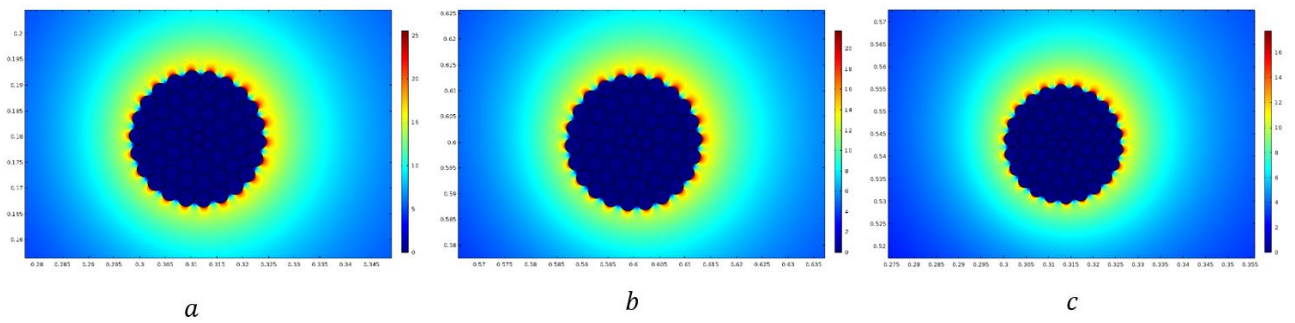
4 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingiems laidininkų spindulio ilgimams palyginimas

Laidininko tipas	Spindulys r , cm	Maksimalus elektrinio lauko stipris E_{max} , kV/cm	Pradinis elektrinio lauko stipris E_n , kV/cm	Ar susiformuoja vainikinis išlydis
511-AL1/34-ST1A	1,535	38,67	31,57	Taip
653-AL1/34-ST1A	1,72	35,25	31,24	Taip
1046-AL1/34-ST1A	2,15	29,24	30,62	Ne

Iš rezultatų matome, kad didėjant laidininko spinduliui ir tuo pačiu paviršiaus plotui, maksimalaus elektrinio lauko stiprio reikšmė mažėja. Esant tai pačiai įtampai, laidininko spinduliui pakitus nuo 1,535 cm iki 2,15 cm maksimalus elektrinio lauko stipris laidininko paviršiuje sumažėjo nuo 38,67 kV/cm iki 29,94 kV/cm. Taip yra todėl, nes didėjant paviršiaus plotui ir nekintant laidininko potencialui, paviršinio krūvio tankis mažėja atvirkščiai proporcingai spinduliui. Taip pat padidėjęs vijų skerspjūvis mažiau iškraipo paviršinį lauko stiprį.

27 paveiksle pavaizduotas paviršinio elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas esant skirtingam išskaidytosios fazės laidininkų skaičiui, pjūvyje tarp atramų. Rezultatai palyginami 5 lentelėje.

Iš rezultatų matyti, kad didėjant išskaidytosios fazės laidininkų skaičiui, maksimalus elektrinio lauko stipris laidininkų paviršiuje mažėja. Maksimalios elektrinio lauko stiprio vertės vieno laidininko sistemoje ir šešių laidininkų sistemoje, esant tam pačiam laidininko potencialui, skiriasi 25,8 kV/cm. Taip yra, nes tą patį elektrinį potencialą turinčių laidininkų, išdėstytų vienas šalia kito paviršinio krūvio sukuriama jėga veikia kiekvieną kitą laidininką. Todėl vidinėje laidininko paviršiaus dalyje (nukreipta į laidininkų sistemos centrą) stipris susilpninamas ir didžioji sistemos krūvio dalis tolygiai pasiskirsto išorinėse laidininkų paviršiaus dalyse (nukreiptos nuo laidininkų sistemos centro) kaip matyti 27 paveiksle. Kadangi krūvis pasiskirsto didesniame plote, sumažėja paviršinio elektrinio lauko stipris.

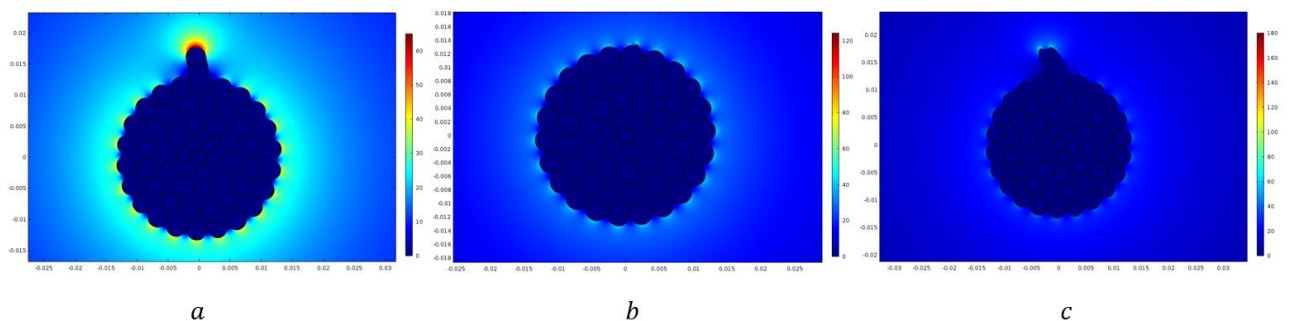


27 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink laidininką esant skirtingoms laidininkų sistemoms: a – trilaidė, $E_{max} = 25,90$ kV/cm; b – keturlaidė, $E_{max} = 22,11$ kV/cm; c – šiašialaidė $E_{max} = 17,89$ kV/cm

5 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingam išskaidytosios fazės laidininkų skaičiui palyginimas

Laidininko tipas	Maksimalus elektrinio lauko stipris E_{max} , kV/cm	Pradinis elektrinio lauko stipris E_n , kV/cm	Ar susiformuoja vainikinis išlydis
386-AL1/34-ST1A	43,69	32,02	Taip
2x386-AL1/34-ST1A	32,03	32,02	Taip
3x386-AL1/34-ST1A	25,90	32,02	Ne
4x386-AL1/34-ST1A	22,11	32,02	Ne
6x386-AL1/34-ST1A	17,89	32,02	Ne

28 paveiksle pavaizduotas paviršinio elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas esant skirtingiems laidininkų defektams, pjūvyje tarp atramų. Rezultatai palyginami 6 lentelėje.



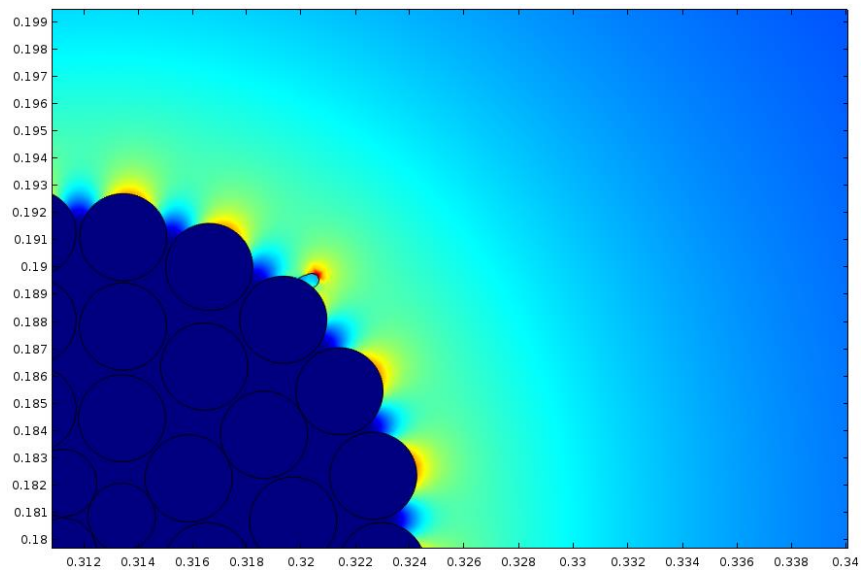
28 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas aplink 386-AL1/34-ST1A tipo laidininką esant skirtingiems defektams: a – pakilusi vija, $E_{max} = 65,11$ kV/cm; b – įbraukta vija, $E_{max} = 136,22$ kV/cm; c – trūkusi vija $E_{max} = 192,46$ kV/cm

6 Lentelė. Modeliavimo rezultatų esant skirtingiems defektų tipams palyginimas. Laidininko tipas 386-AL1/34-ST1A

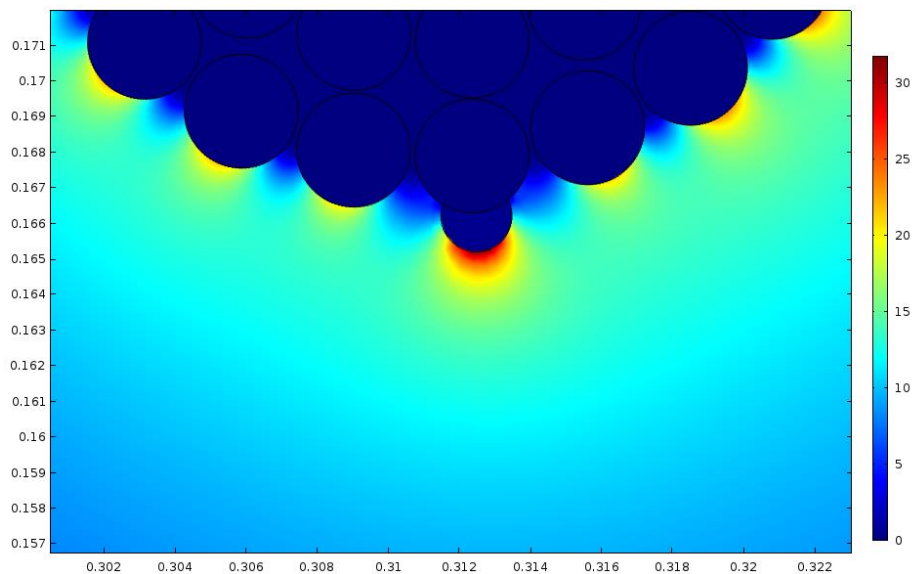
Defekto tipas	Maksimalus elektrinio lauko stipris E_{max} , kV/cm	Pradinis elektrinio lauko stipris E_n , kV/cm	Ar susiformuoja vainikinis išlydis
Pakilusi vija	65,11	32,02	Taip
Įbraukta vija	136,22	32,02	Taip
Trūkusi vija	192,46	32,02	Taip

Iš rezultatų galime matyti, kad mažiausias maksimalus elektrinio lauko stipris susidarys laidininko paviršiuje su pakeltos vijos defektu. Vijos paviršius nėra pažeistas, vija yra tik dislokuota ir jos paviršiuje nėra atplaišų ar aštrių paviršiaus kampų. Įbrauktos vijos paviršiuje yra aštrių vijos atplaišų, todėl tose vietose susidaro stiprus elektrinis lauko stipris. Trūkusios vijos paviršiaus geometriniai parametrai yra tam tikra anksčiau buvusių defektų suma. Vija yra ir dislokuota ir turi aštrių paviršiaus elementų, atplaišų, todėl ir elektrinio lauko stipris šio defekto vietoje yra didžiausias.

Iš 5 lentelės galime matyti, kad 330 kV įtampos elektros perdavimo linijoje naudojant dvilaidę 2x386-AL1/34-ST1A laidininkų sistemą linijoje susidaro vainikinis išlydis, tačiau naudojant trilaidę sistemą vainikinis išlydis nesusidaro. 29, 30 paveiksluose pavaizduota dulės ir vandens lašo įtaka vainikinio išlydžio susidarymui trilaidėje fazės laidininkų sistemoje. Rezultatai palyginami 7 lentelėje.



29 pav. Dulės įtaka elektrinio lauko stiprio pasiskirstymui esant trilaidėi sistemai. $E_{max} = 37,26$ kV/cm



30 pav. Vandens lašo įtaka elektrinio lauko stiprio pasiskirstymui esant trilaidėi sistemai. $E_{max} = 32,95$ kV/cm

7 Lentelė. Dulkės ir vandens lašo įtakos elektrinio lauko stiprio susidarymui modeliavimo rezultatų palyginimas

Defekto tipas	Maksimalus elektrinio lauko stipris E_{max}, kV/cm	Pradinis elektrinio lauko stipris E_n, kV/cm	Ar susiformuoja vainikinis išlydis
Dulkė	37,26	32,02	Taip
Vandens lašas	32,95	32,02	Taip

Iš rezultatų matome, kad trilaidės laidininkų sistemos laidininko paviršiuje esant dulkių ar vandens lašų bus viršytas pradinis vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipris ir laido paviršiuje susidarys vainikinis išlydis.

Išvados

1. Literatūros analizės metu apžvelgta vainikinio išlydžio susidarymo dujose teorija. Vainikinio išlydžio formavimasi ir plitimą erdvėje geriausiai apibūdina sujungtos griūtinio ir strimerinio išlydžio dujose teorijos. Vainikinis išlydis prasideda kai pasiekama pradinė vainikinio išlydžio įtampa arba pradinis vainikinio išlydžio elektrinio lauko stipris. Šių dydžių apskaičiavimą pirmasis po savo eksperimentų aprašė F.W. Peek Jr. Vainikinis išlydis sukelia daug nepageidaujamų reiškinių aukštos įtampos perdavimo linijose, kurie veikia visą linijos eksploatavimo laikotarpį.
2. COMSOL Multiphysics 5.1 paketo pagalba sukurtas 330 kV elektros perdavimo oro linijos modelis. Modeliuoti du pjūviai: atramoje ir tarp atramų. Modelis parengtas pagal AB Litgrid oro linijos atramos techninį projektą. Modelis sukurtas tirti laidininkų geometrijos, ir išorinių veiksnių įtaką vainikinio išlydžio susidarymui. Modelis elektrinį potencialą ir elektrinio lauko stiprį apskaičiavo pagal Laplace'o diferencialinę lygtį. Lygtis išspręsta naudojant baigtinių elementų metodą.
3. Pateikti gauti tyrimo rezultatai, bei aptartos galimos tokių rezultatų priežastys. Apskaičiuotas maksimalus elektrinio lauko stipris esant skirtingam laido šurkštumui, laido skersmeniui, laido defektui, išskaidytos fazės laidininkų skaičiui. Taip pat maksimalus stipris apskaičiuotas trilaidės laidininkų sistemos laidininko paviršiuje esant dulkei ir vandens lašui, dvilaidės laidininkų sistemos izoliatorių girliandoje su apsauginiu žiedu ir be jo. Rezultatai palyginti su pradiniu elektrinio lauko stipriu gautu pagal F.W. Peek Jr. formulę. Modeliuota 330 kV aukštos įtampos perdavimo linija su dvilaide išskaidytos fazės sistema, kurioje fazės srovė perduodama 2x386-AL1/34-ST1A tipo laidais. Nustatyta, kad esant dvilaidei konfigūracijai, linijoje susidarys vainikinis išlydis. Norint to išvengti reikia parinkti trilaidę sistemą su 3x386-AL1/34-ST1A tipo laidais. Tokiu atveju, vainikinis išlydis susidaro tik užteršus laidininko paviršių, pavyzdžiui ore pasklidus dulkėms, ar esant lietui.

Literatūra

1. GRIGONIS, Alfonsas ir Arvidas Galdikas. *Plazminiai ir plazmocheminiai procesai*. Kaunas : Vitae Litera, 2006. 978-9955-686-29-3.
2. BAUBLYS Juozas, Pranas Jankauskas, Linas Andronis Markevičius ir Alfonsas Morkvėnas. *Izoliacija ir viršįtampiai*. Kaunas : Technologija, 2008. 978-9955-25-472-0.
3. LOEB, Leonard B. *Electrical coronas, their basic physical mechanisms*. s.l. : University of California Press, 1965.
4. KUFFEL, John, E. Kuffel ir W. S. Zaengl. *High Voltage Engineering Fundamentals*. s.l. : Newnes, 2000. 0750636343.
5. Jr., F.W. Peek. *Dielectric Phenomena In High Voltage Engineering* . New York : McGraw-Hill book company, 1911.
6. Qiu Z., Ruan J. ir Shu S. *Corona Onset Voltage Prediction of Electrode Structures*. Singapore : Springer, 2019. 978-981-10-5162-3.
7. BEGAMUDRE, Rakosh das. *Extra High Voltage A.C. Transmission Engineering*. New Delhi : New Age International, 2006. 978-81-224-2481-2.
8. FAN X., W. Chen, Z. Pei, T. Wen, Z. Wu ir Q. Zhang. *Evolution Characteristics of Electric Field for AC Corona Modes in Atmospheric Air*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(1).
9. MORROW R. *The theory of positive glow corona*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(22).
10. QUE Zhibin, Jiangjun Ruan, Shengwen Shu. *Air Insulation Prediction Theory and Applications*. Singapore : Springer, 2019. 978-981-10-5163-0.
11. HE Kai, Xing-Liang Jiang, Zhen-Yu Li, Zhong-Yi Yang, Yu-Yao Hu ir Hong-Yu Zhou. *Study on the effects of defects on the AC corona characteristics of stranded conductors*. Advances in Engineering Research , 2016, 107, 2352-5401.
12. YUNPENG Liu, Huo Feng, Liu Chen, Li Yongshuang, Tang Jian, Chen Shaoshuai, Liu Daran, Chen Sijia, Huang Shilong. *Corona loss of the bundle conductors on EHV/UHV AC power lines under sandy and dusty conditions in high-altitude areas*. Journal of Electrostatics, 2020, 107(103476). 0304-3886.
13. ŽEBRAUSKAS, Stasys. *Elektromagnetinis laukas*. Kaunas : Technologija, 2013. 978-609-02-0898-4.
14. POLYCARPOU, Anastasis C. *Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics*. Morgan & Claypool, 2006. 1598290460.
15. NOREIKA Alius, Paulius Tarvydas ir Nerijus Bagdanavičius. *Baigtinių elementų metodo taikymas elektroninėms sistemoms projektuoti. Laboratoriniai darbai*. Kaunas : Technologija, 2013. 978-609-02-0996-7.
16. CARDOSO, José Roberto. *Electromagnetics through the finite element method. A simplified approach using Maxwell's equations*. London : CRC Press, 2016. 978-1-4987-8357-6.
17. AB "Litgrid": tipiniai oro linijų atramų techniniai projektai [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per: <https://www.litgrid.eu/index.php/tinklo-pletra/standartiniai-techniniai-reikalavimai/statybine-dalis/tipinis-techninis-projektas/31143>.
18. AB "Litgrid": standartiniai techniniai reikalavimai 400 - 110 kv įtampos oro linijų stiklinių izoliatorių girliandų sudėčiai [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per: https://www.litgrid.eu/uploads/files/dir551/dir27/dir1/5_0.php.

19. AB "Litgrid": standartiniai techniniai reikalavimai 330-110 kv įtampos oro linijų stikliniams lėkštiniais izoliatoriams [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per: https://www.litgrid.eu/uploads/files/dir529/dir26/dir1/8_0.php.
20. aiz.lt: izoliatorių katalogas [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per: http://www.aiz.lt/media/com_eshop/files/file_573b48e656f4d_AIZ_-glass-insulators.pdf.
21. lumpi-berndorf: kabelių katalogas [interaktyvus]. [žiūrėta 2021-05-19]. Prieiga per: https://www.lumpi-berndorf.at/fileadmin/downloads/Overhead_line_conductors_EN50182.pdf.
22. Electrical Systems Technology Institute. *Electrical transmission and distribution reference book*. ABB Power T&D Company, 1997.
23. XIAO, Dengming. *Gas Discharge and Gas Insulation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. 978-3-662-48040-3.