



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Mindaugas Paulauskas

IŽEMĖJIMO ĮTAKOS IŠLYDŽIAMS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Povilas Marčiulionis

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

ĮŽEMĖJIMO ĮTAKOS IŠLYDŽIAMS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

Doc. dr. Povilas Marčiulionis

Recenzentas

Doc. dr. Robertas Lukočius

Projektą atliko

Mindaugas Paulauskas

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Mindaugas Paulauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Įžemėjimo įtakos išlydžiams tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. gegužės 28 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Mindaugo Paulausko** baigiamasis projektas tema „Įžemėjimo įtakos išlydžiams tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Paulauskas, Mindaugas. Įžemėjimo įtakos išlydžiams tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Povilas Marčiulionis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *izoliatorius, įžemėjimas, išlydis, pramušimas, vainikinis, užterštumas.*

Kaunas, 2018. 43 p.

SANTRAUKA

Šiame darbe vertinami kriterijai reikalingi susiformuoti išlydžiams ant dviejų skirtingų tipų porcelianinių izoliatorių užterštų paviršių. Skaičiavimams naudojama programa Comsol multiphysics ir matematiniai modeliai skirti vertinti išlydžių susidarymui reikalingus parametrus. Šie parametrai apskaičiuojami dviem skirtingais tinklo režimais – normaliomis sąlygomis ir kai tinkle yra įžemėjimas.

Gauti rezultatai apibendrinami ir vertinama įžemėjimo įtaka išlydžių susidarymui bei kokiomis aplinkybėmis normaliu režimu izoliatorius atlieka savo funkciją, o atsiradus įžemėjimui tinkle – būna pramušamas ir išplečia tinklo avarijos apimtį.

Taip pat šiame darbe su Comsol multiphysics modeliuojamas potencialo ir elektrinio lauko pasiskirstymas 3D izoliatorių modeliuose. Naudojantis šiais modeliais ir Peek'o dėsnio įvertinama vainikinio išlydžio susidarymo galimybė ir ar tai įtakoja įžemėjimas tinkle

Paulauskas, Mindaugas. Research of Influence of Earth Fault on Discharges: Master's thesis / supervisor assoc. prof. Povilas Marčiulionis. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *insulator, earth fault, discharge, flashover, corona, contamination.*

Kaunas, 2018. 43 p.

SUMMARY

In this work criteria of forming a discharge on contaminated surface of two types of porcelain insulators are evaluated. For the calculations is used computer program Comsol Multiphysics and different mathematical models for estimating parameters required to form a discharge. Those parameters are estimated for two regimes of electrical power grid – when grid is working with no faults and when there is an earth fault.

The calculated results are used to estimate the influence of earth fault on discharge on formation and on which conditions the insulator is able to perform when the grid is working with no faults, but when an earth fault occurs, there is a possibility of a flashover and the damaged area of the grid is expanded.

Also in this work a 3D model with Comsol Multiphysics is simulated in which insulators potential and electric field distribution is calculated. By using those model probability of forming a corona discharge is evaluated by estimating it with Peek's law, when the power grid is working correctly and when an earth fault occurs.

Turinys

Įvadas	9
1. Įžemėjimas izoliuotos arba kompensuotos neutralės tinkle	10
1.1 Įžemėjimo žala elektros įrenginiams	12
2. Išlydžiai ant izoliatoriaus paviršiaus	13
2.1 Išlydis išilgai izoliatoriaus paviršiaus.....	13
2.2 Izoliatoriaus paviršiaus varža	14
2.3 Drėgnas izoliatoriaus paviršius	15
2.4 Išlydžių ant izoliatoriaus paviršiaus vertinimo modeliai.....	16
2.5 Izoliatoriaus paviršiaus tarša	19
3. Vainikinis išlydis.....	21
4. Tiriamieji objektai	22
4.1 Tiriamasis objektas nr. 1	22
4.2 Tiriamasis objektas nr. 2	23
4.3 Tyrimo metu vertinamos sąlygos.	24
5. Išlydžių ant izoliatoriaus paviršiaus tyrimas	24
5.1 Izoliatorių paviršių varža.....	24
5.3 Išlydžio ant izoliatoriaus paviršiaus formavimasis normaliu tinklo režimu.....	26
5.4 Išlydžio ant izoliatoriaus paviršiaus formavimasis tinkle esant įžemėjimui	30
5.3 Apibendrinami išlydžio ant izoliatoriaus paviršiaus skaičiavimo rezultatai	32
6. Vainikinių išlydžių tyrimas	36
Išvados.....	41
Literatūros sąrašas.....	43

Paveikslėlių ir lentelių sąrašas

1.2 pav. Kompensuotos neutralės tinklo schema [2].....	11
1.3 pav. Neutralės poslinkis a) prieš įžemėjimą b) esant įžemėjimui [2].....	12
2.1 pav. Strimeris išilgai izoliatoriaus paviršiaus: 1, 2 – elektrodai, 3 – strimeris [5].....	13
2.1 lentelė. Vidutiniai izoliatorių savitieji laidžiai	14
2.2 pav. Elektros lanko susidarymas ant drėgno izoliatoriaus paviršiaus U_a – įtampa krintanti ant sausojo ploto, L_a – išdžiovinto plotelio ilgis, L – izoliatoriaus paviršiaus ilgis [13].....	15
2.3 pav. Obenau‘o modelis [7].....	17
2.2 lentelė. Elektros lanko atsinaujinimo konstantos. [11]	17
2.4 pav. DDG modelyje naudojamas nuosėdų surinkimo įrenginys. [13]	20
2.3 lentelė. DDG ir ESDD vertės esant įvairiems užterštumo lygiams [13].....	20
3.1 pav. Deguonies molekulių jonizacija.	21
4.1 pav. Atraminis izoliatorius IO-10/3,75	22
4.2 pav. Atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 3D modelis Comsol Multiphysics programoje	23
4.3 pav. Smaiginis izoliatorius ŠF-20	23
4.4 pav. Smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 3D modelis.	24
5.1 lentelė. Atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varža pagal užterštumo lygį ..	25
5.1 pav. Izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varžos priklausomybė nuo savitojo laidum.	25
5.2 lentelė. Smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus varža pagal užterštumo lygį	25
5.2 pav. Izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus varžos priklausomybė nuo savitojo laidumo ..	26
5.3 lentelė. Įtampos reikalingos išlydžiui ant izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus susiformuoti	27
5.4 lentelė. Įtampos reikalingos išlydžiui ant izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus susiformuoti.....	27
5.4 pav. U_a ir U priklausomybė nuo izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžos	28
5.4 pav. U_a ir U priklausomybė nuo izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus varžos.....	28
5.6 pav. U_F priklausomybė nuo izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžos R	30
5.7 pav. U_a ir U priklausomybė nuo IO-10/3,75 paviršiaus varžos, kai tinkle yra įžemėjimas	30
5.8 pav. U_a ir U priklausomybė nuo ŠF – 20 paviršiaus varžos, kai tinkle yra įžemėjimas.....	31
5.9 pav. U_F priklausomybė nuo izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžos R	31

5.10 pav. U_F priklausomybė nuo izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus varžos R	32
5.4 lentelė. Išlydžio ant užteršto atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 skaičiavimo rezultatai	32
5.5 lentelė. Izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varžos pramušamos fazinės įtampos	32
5.6 lentelė. Išlydžio ant užteršto atraminio izoliatoriaus ŠF-20 skaičiavimo rezultatai	33
5.7 lentelė. Izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus varžos pramušamos fazinės įtampos	33
5.11 pav. Išlydžio formavimosi įtampos priklausomybė nuo IO-10/3,75 paviršiaus varžos	34
5.12 pav. Išlydžio formavimosi įtampos priklausomybė nuo ŠF-20 paviršiaus varžos	35
6.1 pav. Potencialo pasiskirstymas ant izoliatoriaus IO-10/3,75, normaliu režimu	36
6.2 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus IO-10/3,75, normaliu režimu	37
6.3 pav. Potencialo pasiskirstymas ant izoliatoriaus IO-10/3,75, su įžemėjimu tinkle	37
6.4 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus IO-10/3,75 su įžemėjimu tinkle	38
6.5 pav. Potencialo pasiskirstymas ant izoliatoriaus IO-10/3,75, normaliu režimu	38
6.6 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus IO-10/3,75, normaliu režimu	39
6.7 Potencialo pasiskirstymas smaiginio izoliatoriaus ŠF-20, normaliu režimu	39
6.8 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus ŠF-20, su įžemėjimu	40
6.1 lentelė. Vainikinių išlydžių formavimasis	40

Įvadas

Skirstomuosiuose vidutinės įtampos elektros tinkluose dažnai naudojama izoliuotos arba kompensuotos neutralės konfigūracija, kai transformatorių neutralės taškas nėra tiesiogiai sujungtas su žeme. Tokio tipo elektros tinkluose galimas ne vien trumpojo jungimo gedimo tipas, tačiau ir įžemėjimas. Įžemėjimas – tai gedimo tipas, kai fazinis laidininkas liečiasi prie žemės ar žemės potencialą turinčių konstrukcijų ir gedimo vietoje teka viso, galvaninį ryšį turinčio, tinklo talpinė srovė.

Toks gedimo tipas, kaip įžemėjimas, pasitaiko gana dažnai. Jį oro linijose sukelti gali nutrauktas fazinis laidas dėl nuvirtusio medžio ant oro linijos, vėjo numauto izoliatoriaus nuo traversos ar kitų stichinių reiškinių ar pašalinių asmenų poveikio. Kabelinėse linijose įžemėjimo priežastys kitokios – tai gali būti kabelių izoliacijos susidėvėjimas arba pažeidimai padaryti kasimo darbų metu.

Įžemėjant vienam faziniam laidininkui, atsiranda neutralės poslinkis, kurio metu nepažeistų fazių fazinė įtampa padidėja. Įtampos padidėjimas priklauso nuo įžemėjimo vietos varžos ir gali padidėti net iki 1,73 karto. Toks įtampos padidėjimas žemės atžvilgiu sukelia didesnę, negu įprastai, apkrovą elektros tinklo izoliaciniams įrenginiams, kurie skiria neįžemėjusių fazių laidininkus nuo žemės potencialą turinčių konstrukcijų. Nauji elektros įrenginiai, prieš pradėdami juos eksploatuoti, būna išbandomi paaukština įtampa, tad jiems toks fazinės įtampos padidėjimas nesukelia pavojaus, tačiau įrenginiai, kurie eksploatuojami gana ilgai, o jų izoliacinės savybės dėl aplinkos poveikio arba išorės pažeidimų susilpnėjusios, gali ir neatlaikyti įtampos ir nebeužkirsti kelio įvairių išlydžių formavimuisi. Dėl šios priežasties dar labiau prastėja izoliacinės savybės arba net atsiranda galimybė išsivystyti įžemėjimui kitoje tinklo vietoje.

Esant įžemėjimui tinkle, priešingai negu esant trumpam jungimui, pažeistoji linija nėra iškart atjungiama. Pažeista tinklo vieta gali būti laikoma su įjungta įtampa iki kol nustatomas pažeistas tinklo ruožas. Šis laiko tarpas taip pat gali lemti avarijos išsiplėtimą, nes padidėjusios fazinės įtampos gali neatlaikyti izoliaciniai įrenginiai. Dėl padidėjusios įtampos galimas įvairių išlydžių formavimasis ant izoliatorių paviršiaus, tai gali sukelti ir kitos fazės įžemėjimą. Įžemėjus dviem skirtingoms fazėms tinkle, galimas dvifazis trumpasis jungimas, dėl kurio elektros linijų apsaugos atjungia pažeistas linijas. Jei trumpojo jungimo srovė pakankamai didelė, o trumpasis jungimas formuojasi tarp dviejų skirtingų linijų, relinė apsauga gali atjungti net visą pastotės šynų sekciją.

Šiame darbe naudojant kompiuterinę programą atliekamas elektrinio lauko pasiskirstymo modeliavimas ant 3D izoliatorių modelių normaliomis sąlygomis ir esant fazinės įtampos padidėjimui. Gauti duomenys panaudojami vertinant išlydžių atsiradimo tikimybę.

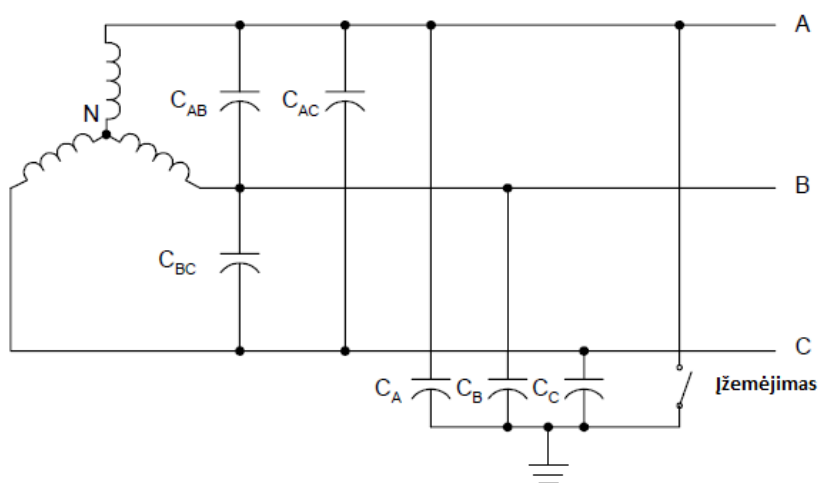
Darbo tikslas – apskaičiuoti 3D izoliatoriaus modelio elektrinio potencialo ir elektrinio lauko stiprio pasiskirstymą įžemėjimo elektros tinkle metu esant skirtingoms aplinkos sąlygoms ir įvertinti išlydžių formavimosi galimybę matematiniais metodais.

Darbo uždaviniai:

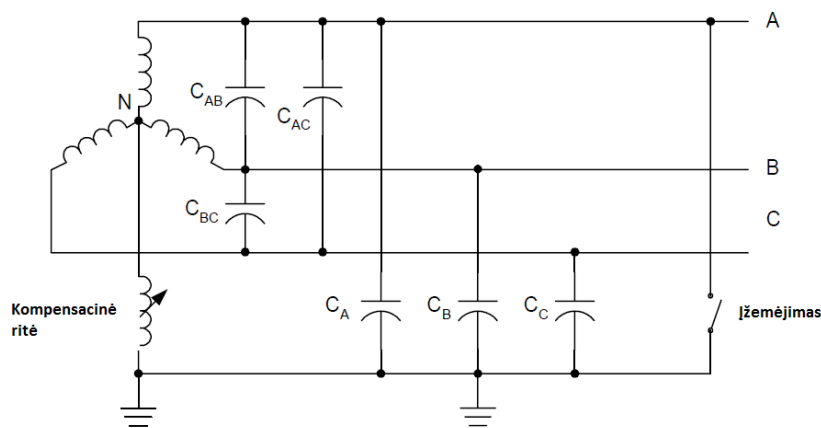
1. Nubraižyti 3D izoliatorių modelius;
2. sumodeliuoti elektrinio potencialo pasiskirstymą 3D modelyje esant normalioms sąlygoms;
3. sumodeliuoti elektrinio potencialo pasiskirstymą 3D modelyje esant įžemėjimui tinkle skirtingomis sąlygomis;
4. nustatyti izoliatoriaus paviršiaus varžas, esant užterštam izoliatoriaus paviršiui;
5. įvertinti įvairių išlydžių atsiradimo galimybę dėl pakitusio potencialų pasiskirstymo esant įžemėjimui tinkle.

1. Įžemėjimas izoliuotos arba kompensuotos neutralės tinkle

Skirstomajame tinkle, siekiant padidinti elektros energijos tiekimo patikimumą, naudojama izoliuotos arba kompensuotos neutralės tinklo konfigūracija. Tai tinklo konfigūracija, kai neutralė neturi tiesioginio ryšio su žeme, t. y. nėra įžeminta arba sujungta per kompensacinę ritę (žr. 1.1 pav., 1.2 pav.).



1.1 pav. Izoliuotos neutralės tinklo principinė schema [2]



1.2 pav. Kompensuotos neutralės tinklo schema [2]

Tokiame tinkle, atsiradus kontaktui tarp vienos fazės ir žemės, teka, palyginti, nedidelė įžemėjimo srovė, kuri daug kartų mažesnė už trumpojo jungimo, todėl pažeistą tinklo vietą nebūtina atjungti akimirksniu. Jei įžemėjusios fazės laidininko vientisumas nenutrauktas, vartotojams elektros energija įmanoma tiekti, o nutrūkus ir įžemėjus laidininkui, vartotojams elektros energija tiekama likusiomis dvejomis fazėmis.

Įžemėjimo vietoje teka įžemėjimo srovė, kuri priklauso nuo įžemėjimo tinklo talpos žemės atžvilgiu, įtampos ir sistemos kampinio dažnio ir įžemėjimo varžos. Priimant, kad įžemėjimo varža lygi nuliui, įžemėjimo srovę galima gauti taip:

$$I_{e0} = \pi \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_e \cdot U \quad (1)$$

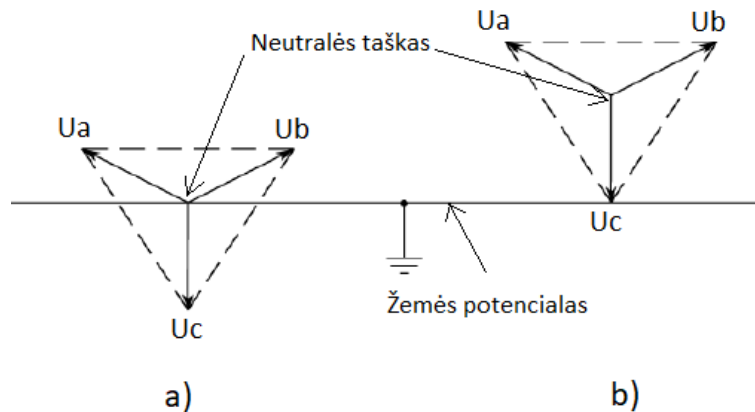
čia ω – yra sistemos kampinis dažnis; U – tinklo įtampa; C_e – tinklo talpa žemės atžvilgiu [1].

Tinklo talpis priklauso nuo tinklo linijų tipų ir ilgių. Įvertinant įžemėjimo vietos varžą, įžemėjimo srovė apskaičiuojama taip:

$$I_e = \frac{I_{e0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_{e0}}{U} \cdot Z_e\right)^2}} \quad (2)$$

čia Z_e – įžemėjimo vietos varža; I_{e0} – įžemėjimo srovė nevertinant varžos [1].

Įžemėjimo metu atsiranda neutralės poslinkis ir pasikeičia įžemėjusios fazės fazinė įtampa. Tuo metu linijinė įtampa tarp pažeistos ir nepažeistų fazių nepakinta (žr. 1.3 pav.).



1.3 pav. Neutralės poslinkis a) prieš įžemėjimą b) esant įžemėjimui [2]

Šis poslinkis sveikų fazių įtampą žemės atžvilgiu gali padidinti net iki 1,73 karto [4]. Įžemėjus fazei, sukuriama nulinės sekos įtampa, kurią galima apskaičiuoti pagal (3) formulę:

$$U_0 = \frac{U}{\sqrt{1 + (3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot Z_e)^2}} \quad (3)$$

Formulėje (3) matoma, kad didžiausia nulinės sekos įtampa yra, kai įžemėjimo varža lygi nuliui [1].

1.1 Įžemėjimo žala elektros įrenginiams

Įžemėjimo procesą elektros tinkle gali sukelti daugybė veiksnių, stichinės nelaimės, pašaliniai asmenys ar pasenusi elektros įrenginių izoliacija. Toks gedimo tipas, Lietuvos skirstomajame tinkle pasitaiko ganėtinai dažnai, to priežastis – ganėtinai prasta skirstomojo tinklo būklė. Seni elektros įrenginiai, daugybė oro linijų miškingose teritorijose, neatsakingai atliekami kasimo darbai prie elektros kabelių trasų.

Vykstant įžemėjimui tinkle galimas įvairus fazinės ir linijinės įtampų pokytis, kuris priklauso nuo įžemėjimo tipo ir įžemėjimo vietos varžos. Įžemėjimas gali būti tiesioginis ir per elektros lanką. Tiesioginio (metalinio) įžemėjimo metu įtampa nepažeistose fazėse padidėja iki 1,73 karto. [4] Žemiau pateikiamas galimas įtampų pokytis tinkle įžemėjus A fazei (žr. 1.4 pav.)

a)	A-0=6,3 kV B-0=6,3 kV C-0= 6,3 kV	A-B=10,5 kV B-C=10,5 kV C-A= 10,5 kV.
b)	A-0=2 kV B-0=8,5 kV C-0= 8,1 kV	A-B=10,5 kV B-C=10,5 kV C-A= 10,5 kV.

1.4 pav. Fazinės ir linijinės įtampos tinkle a) normalus režimas b) įžemėjusi A fazė [4]

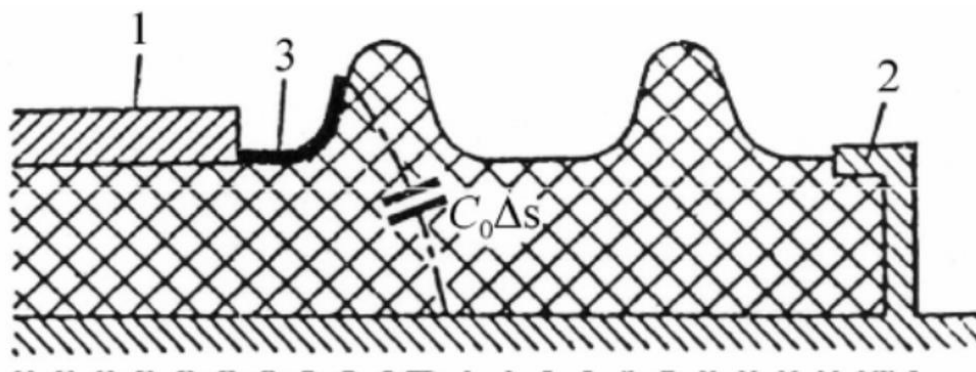
Kadangi įžemėjimo vietos varža nebuvo lygi nuliui, A fazės fazinė įtampa sumažėjo iki 2 kV, o B ir C fazių fazinės įtampos pakilo iki 8,5 kV ir 8,1 kV. Tuo tarpu linijinės įtampos liko nepakitusios. Esant nusistovėjusiam įžemėjimui padidėjusi įtampa gali pramušti įrenginių izoliaciją kitose silpnesnėse vietose. Jei izoliacija pažeidžiama ir įžemėjimas atsiranda kitoje fazėje, tuomet įvyksta trumpasis jungimas per žemę ir viena kuri nors linija išsijungia. Silpnosiomis elektros tinklo vietomis tampa kabeliai su pasenusia izoliacija, pažeisti arba užteršti oro linijų bei pastočių izoliatoriai. Taip pat pramušimą gali sukelti ir didesnė nei įprastai drėgmė ant izoliatoriaus paviršiaus, kuriai izoliatorius nebuvo pritaikytas.

2. Išlydžiai ant izoliatoriaus paviršiaus

2.1 Išlydis išilgai izoliatoriaus paviršiaus

Susidaryti išlydžiui ant izoliatoriaus paviršiaus reikalingas didelis elektrinio lauko stipris. Netolygus elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas palengvina išlydžio susidarymo sąlygas. Elektrinio lauko netolygumas ant izoliatoriaus paviršiaus priklauso nuo paviršiaus savitosios talpos C_0 , kuo didesnė talpa, tuo netolygesnis elektrinis laukas. Savitoji izoliatoriaus paviršiaus talpa priklauso nuo izoliatoriaus formos ir medžiagos santykinės dielektrinės skvarbos ϵ_r .

Paviršiaus talpa taip pat įtakoja ir išlydžio susidarymą ore virš izoliatoriaus paviršiaus. Ore, prie pat izoliatoriaus paviršiaus, susidaro elektrai laidus kanalas – strimeris. Dėl elektrinio lauko išilginės dedamosios strimeriu tekanti elektros srovė virsta slinkties srove talpose. Strimeris keliauja izoliatoriaus paviršiumi, kurio varža daug mažesnė nei oro. Toks strimeris vadinamas šliaužiamuoju. [5] Strimerio formavimasis pavaizduotas paveikslėlyje (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Strimeris išilgai izoliatoriaus paviršiaus: 1, 2 – elektrodai, 3 – strimeris [5]

Išlydžio formavimasis ant izoliatoriaus paviršiaus priklauso nuo tokių faktorių kaip izoliatoriaus paviršiaus forma, išlydžio kelias išilgai izoliatoriaus, paviršiaus užterštumas. Izoliatoriaus forma

kuriama tokia, kad sumažintų išlydžių atsiradimo tikimybę. Ji pritaikoma taip, kad ją mažiau veiktų išorės veiksniai (lietus, tarša), padidėtų išlydžio kelias. Tačiau išlydžių formavimuisi didelę įtaką daro aplinkos poveikis, dėl kurio užteršiamas izoliatoriaus paviršius elektros srovei laidžiomis dalelėmis, kurios padidina izoliatoriaus paviršiaus laidumą.

2.2 Izoliatoriaus paviršiaus varža

Esant izoliatoriaus paviršiaus užterštumui, svarbu įvertinti užterštojo sluoksnio varžą, kuri priklauso nuo užteršto paviršiaus laidumo, izoliatoriaus geometrinės formos ir teršalų sluoksnio storio. Užteršto paviršiaus varžą nusako (4) formulė:

$$R_p = \frac{\rho \cdot L}{\pi \cdot D \cdot \Delta} \quad (4)$$

čia D – paviršiaus skersmuo; Δ – teršalų sluoksnio storis; ρ – savitoji teršalų sluoksnio varža [3].

Kadangi izoliatoriaus forma nėra tolygus cilindras, o teršalų sluoksnis ant jo paviršiaus nusėda nevienodai, tai varžą galima įvertinti suskaidant izoliatoriaus paviršių į atitinkamus elementus ir panaudojant tai formulėje (5):

$$dR_p = \frac{dl}{\pi \cdot \sigma_p(l) \cdot D(l)} \quad (5)$$

čia l – izoliatoriaus paviršiaus koordinatė; $\sigma_p(l)$ – paviršiaus savitasis laidis koordinatėje l ; $D(l)$ – izoliatoriaus skersmuo ties koordinate l [5].

To paties izoliatoriaus paviršiaus varža kinta, priklausomai nuo teršalų savitojo laidžio ir užteršto sluoksnio storio. Jei izoliatoriaus paviršius užterštas, bet ant jo paviršiaus nepastebimi jokie išlydžių požymiai, padidėjus teršalų kiekiui ant jo paviršiaus, paviršinė varža dar labiau sumažėja, o tai gali įtakoti išlydžio formavimąsi [7]. Izoliatoriaus paviršiaus laidžių pavyzdžiai pateikiami lentelėje 2.1

2.1 lentelė. Vidutiniai izoliatorių savitieji laidžiai

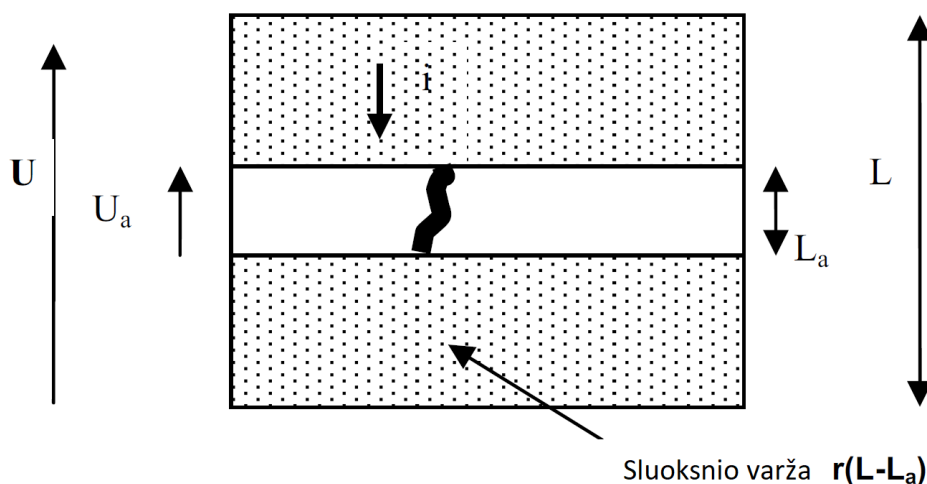
Izoliatorių užterštumo lygiai	σ , μS
Švarūs	≤ 2
Mažai užteršti	≤ 4
Smarkiai užteršti	10-20
Ypač užteršti	20-40

2.3 Drėgnas izoliatoriaus paviršius

Izoliatoriaus paviršiaus varžos sumažėjimą gali įtakoti ir vandens plėvelė ar lašeliai susiformavę ant jo paviršiaus dėl lietaus, rūko ar labai didelės drėgmės. Vandens savitasis laidumas labiausiai priklauso nuo mineralų ištirpusių jame pavyzdžiui, geriamo vandens laidumas gali būti 0.005 – 0.05 S/m, o jūros vandens, dėl didelės ištirpusių mineralų koncentracijos, gali siekti net 5 S/m.

Izoliatorių gamintojai taiko įvairias gamybos technologijas, kad sumažintų vandens kaupimąsi ant izoliatoriaus paviršiaus, pritaiko jų formą, kad lyjant lietaus sušlaptų kuo mažesnis paviršiaus plotas. Taip pat dengia jų paviršius įvairiomis elektra nelaidžiomis hidrofobinėmis medžiagomis. Tokios technologijos netaikomos izoliatoriams naudojamiems uždaroje patalpose, nes nuo lietaus ar rūko juos turi apsaugoti patalpų sandarumas. Senstantys pastatai saugantys elektros įrenginius ne visuomet užtikrina sausą aplinką vidaus tipo izoliatoriams ir atsiranda galimybė jiems būti padengtiems elektros srovei laidžia vandens plėvele.

Išlydis drėgnu izoliatoriaus paviršiumi pradeda formuotis vietose, kur srovės tankis didesnis. Tose vietose išsiskiria šiluma ir išdžiovina izoliatoriaus paviršiaus plotelį, tuomet toje vietoje krinta įtampa, susidaro didelis elektrinio lauko stipris, kuris gali sukelti nedidelį elektros lanką. Šis lankas toliau džioviną plėvelę ir slenka izoliatoriaus paviršiumi [5]. Lanko ant drėgno izoliatoriaus paviršiaus susidarymas pavaizduotas paveikslėlyje (žr. 2.2 pav.)



2.2 pav. Elektros lanko susidarymas ant drėgno izoliatoriaus paviršiaus U_a – įtampa krintanti ant sausojo ploto, L_a – išdžiovinto plotelio ilgis, L – izoliatoriaus paviršiaus ilgis [13]

Išdžiovinto plotelio ilgis apskaičiuojamas pagal formulę (7):

$$L_a = \frac{r \cdot L}{r + \frac{A - N}{i^{m+1}}} \quad (7)$$

Čia r – izoliatoriaus paviršiaus varža tenkanti ilgio vienetui; L – nuotėkio izoliatoriaus paviršiumi ilgis; A, N – elektros lanko konstantos

2.4 Išlydžių ant izoliatoriaus paviršiaus vertinimo modeliai

Išlydžių ant užteršto izoliatoriaus paviršiaus įvertinimui yra sukurta nemažai matematinių modelių. Jų panaudojimo galimybės priklauso nuo skirtingų modeliavimo aplinkybių. Toliau pateikiami keli pagrindiniai matematiniai modeliai

Vilkinso modelis

Vilkinso modelyje vertinama tai, kad elektros lankas plėsdamasis keičia paviršiaus teršalų varžą dėl išskiriamos šilumos. Šiuo modeliu lanko užsidegimo įtampa apskaičiuojama formule (8):

$$U = x \cdot N \cdot I^{-n} + U_e + 2 \cdot I \cdot R(L) \quad (8)$$

Čia x – lanko ilgis, $R(L)$ – teršalų varža išilgai paviršiaus, U_e – įtampos kritimas, I – nuotėkio srovė, N – statinė elektros lanko konstanta, n – statinės elektros lanko konstantos charakteristika

Svarbiausias šio modelio kriterijus, kad išvestinė $di/dx > 0$, tokiu atveju elektros lankas ant izoliatoriaus paviršiaus plečiasi tol, kol pasiekia priešingą elektrodą [7].

Claverie'o modelis

Claverie'o modelis paremtas eksperimentu kurio metu elektros lankas, užsidegantis ant keramikinio izoliatoriaus paviršiaus, buvo stebimas greitaveike kamera [7]. Šiame modelyje elektrodo įtampa pateikiama formulėje (9):

$$U = \frac{100x}{\sqrt{I}} + R_p(m) \cdot I \quad (9)$$

Čia U – elektrodo įtampa; $\frac{100x}{\sqrt{I}}$ – elektros lanko įtampa; $R_p(m)$ – paviršiaus varža taške m ; I – nuotėkio srovės pikinė reikšmė.

Elektros lanko tęsimosi sąlyga yra $V > \frac{940x}{\sqrt{I}}$, o didžiausias ilgis, kurį gali pasiekti lankas išreiškiamas formule (10):

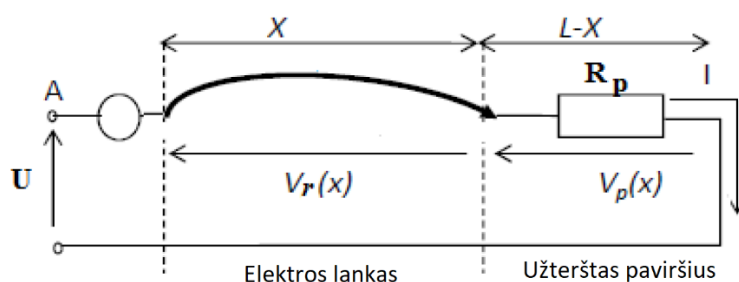
$$x_m = \frac{V\sqrt{I_M}}{940} \quad (10)$$

Obenau'o modelis

Obenau'o modelis paremtas kriterijumi – $E_p > E_{arc}$, t.y. elektrinis lauko stipris užterštame paviršiuje turi būti stipresnis negu elektros lanko gradientas [8]. Lanko gradientas apskaičiuojamas pagal užteršto paviršiaus nuotėkio srovę ir statistiškai išvestas konstantas (11) :

$$E_{arc} = N \cdot I^{-n} \quad (11)$$

Čia N – elektros lanko atsinaujinimo konstanta; n – elektros lanko atsinaujinimo eksponentė; I – nuotėkio srovė.



2.3 pav. Obenau'o modelis [7]

Įtampos pasiskirstymas ant izoliatoriaus paviršiaus Obenau'o modelyje išreiškiamas šitaip:

$$U = V_r(X) + V_p(X) \quad (12)$$

Čia U – šaltinio įtampa; $V_r(X)$ – elektros lanko įtampa priklausanti nuo lako ilgio; $V_p(X)$ – užteršto paviršiaus įtampa priklausanti nuo elektros lanko ilgio.

Obenau'o modelyje naudojamų lanko atsinaujinimo konstantų vertės yra pateikiamos lentelėje 2.2

2.2 lentelė. Elektros lanko atsinaujinimo konstantos. [11]

	N, elektros lanko atsinaujinimo konstanta	n, elektros lanko atsinaujinimo eksponentė
Porcelianas	980	0,454
Polimeras	980	0,417
HC2-HC7 polimeras	980	0,417
Porcelianas dengtas RTV	980	0,418

Neumarkerio modelis

Neumarkerio modelis paremtas Obenau'o modeliu, tačiau šiame modelyje priimamas kitoks užteršto paviršiaus varžos vertinamas. Priimama, kad užterštumas pasiskirstęs tolygiai visame paviršiuje ir taip išvedama varžos priklausomybė nuo nuotėkio ilgio. Šis modelis išreiškiamas formule (13):

$$U = XNI^{-n} + r_p(L - X) \cdot I \quad (13)$$

čia X – elektros lanko ilgis; N ir n – Obenau'o modelyje naudojamos lanko konstantos; I – nuotėkio srovė; r_p – užteršto paviršiaus varža tenkanti ilgio vienetui; L – nuotėkio ilgis izoliatoriaus paviršiumi.

Išlydis išdžiovintame izoliatoriaus paviršiaus plote

Izoliatoriaus paviršiumi tekanti nuotėkio srovė išdžiovina mažą plotelį vandens plėvelėje, kur srovės tankis didžiausias. Šio plotelio ilgis apskaičiuojamas pagal formulę (7). Įtampa krentanti ant elektros lanko apskaičiuojama pagal formulę [13] (14):

$$U_a = \frac{N \cdot L_a}{i^n} \quad (14)$$

Čia N ir n – elektros lanko konstantos; L_a – išdžiovinto plotelio ilgis; i – nuotėkio srovė

Įtampa U_a per išdžiovintą plotelį yra tik viena sąlygos reikalingos išlydžiui per išdžiovintą plotą susiformuoti. Susidarant išlydžiui, srovė teka per elektros lanką ir užterštą paviršių, tad įtampa krenta ant abiejų grandinės dalių. Pastoviam išlydžiui palaikyti tenkinanti sąlyga [13] (15):

$$U = U_a + i \cdot r \cdot (L - L_a) \quad (15)$$

Čia i – nuotėkio srovė, r – paviršiaus varža tenkanti ilgio vienetui, L – nuotėkio izoliatoriaus paviršiumi ilgis.

Patikrinus sąlygą ar ant išdžiovinto plotelio susikuria stabilus išlydis, galima apskaičiuoti kokia įtampa U_F reikalinga, kad šis išlydis peraugtų į lankinį išlydį visu izoliatoriaus paviršiumi [13]. Ši įtampa apskaičiuojama pagal formulę paremtą Claverie'o eksperimentiškai nustatytomis konstantomis (16):

$$U_F = B \cdot r^{\frac{m}{m+1}} \cdot L \quad (16)$$

Čia r – paviršiaus varža ilgio vienetui; m – Claverie koeficientas 0,5; L – nuotėkio ilgis

Koeficientas B apskaičiuojamas pagal formulę (17):

$$B = \frac{A}{m+1} \cdot \left(\frac{m}{A-N}\right)^{\frac{m}{m+1}} \quad (17)$$

2.5 Izoliatoriaus paviršiaus tarša

Elektros įrenginiams būnant atviroje aplinkoje, ant jų paviršiaus nuolatos nusėda įvairaus tipo nuosėdos. Dalelių sudarančių nuosėdas tipas priklauso nuo įrenginio geografinės padėties, klimato ypatybių, aplinkos taršos. Teritorijose, kuriose didesnė negu įprastai kietųjų dalelių koncentracija ore, projektuojant elektros linijas ar kitus įrenginius, naudojamos izoliacinės medžiagos su lygesniais paviršiais ir formomis kurios sumažina kietųjų dalelių nusėdimo tikimybę ant izoliacinės medžiagos paviršiaus. Puikus to pavyzdys, oro linijų izoliatoriai naudojami perdavimo tinkle. Mažiau užterštoje aplinkoje oro linijose naudojami izoliatoriai kurie turi briaunas apačioje. Dėl šių briaunų sumažinamas izoliatoriaus skersmuo, tačiau srovės nuotėkio kelias išlieka pakankamas. Labiau užterštose teritorijose, naudojami izoliatoriai be briaunų, nes ant briaunoto paviršiaus lengviau kaupiasi teršalai. Tai naudojama statant elektros įrenginius aplinkoje, kurioje yra daug pramonės objektų ar netoli jūrų, vandenynų.

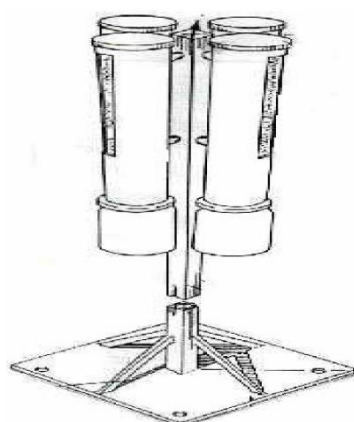
Izoliatorių tarša vertinama keliais skirtingais modeliais. Vienas iš jų NSDD (*Non-soluble Deposit Density*). Tai netirpių medžiagų tankio ekvivalentas, juo remiantis įvertinamas izoliatoriaus paviršiaus užterštumas kietosiomis dalelėmis, kurios nedisocijuoja vandenyje t. y. jų molekulės vandenyje neskyla į laidžius jonus ir nesudaro elektrai laidaus tirpalo. NSDD izoliatorių užterštumas tiriamas juos nuplaunant, o vanduo naudotas plovimui perleidžiamas per specialius filtrus. Filtrai išdžiovinami ir sveriami. Tokiu būdu sužinoma nuosėdų sudėtis ir masė. Tuomet vertinama netirpių medžiagų masė tenkanti izoliatoriaus paviršiaus plotui. Nuosėdų ekvivalento matavimo vienetas mg/cm² [10].

Kitas užterštumo vertinimo modelis yra ESDD (*equivalent salt deposit density*) t. y. druskos nuosėdų tankio ekvivalentas. Juo vertinamas izoliatoriaus paviršiaus užterštumas druskomis, kurios tirpdamos vandenyje disocijuoja ir sudaro elektros srovei laidų tirpalą. ESDD taip pat vertinamas mg/cm². ESDD vertinamas ištirpinant dalį izoliatoriaus paviršiaus teršalų distiliuotame vandenyje ir vertinant gauto tirpalo laidumą.

Esant intensyviai ir gana dažnai pasitaikančiam lietuvi, teršalų koncentracija ant izoliatoriaus paviršiaus, didėja lėčiau nei vietovėse kuriose pasitaiko nedažni ir vidutinio intensyvumo lietūs, nes didelis vandens kiekis tiesiog nuplauna izoliatorių paviršių. Vidutinio intensyvumo ir rečiau pasitaikantys lietūs sudaro palankesnes sąlygas nešvarumam kauptis ant izoliatoriaus paviršiaus, nes kietosios dalelės lengviau prikimba prie drėgno paviršiaus, o vandeniui išgaravus suformuoja

tolygesnį, geriau prisitvirtinusių teršalų sluoksnį [11]. Didžiausią įtaką izoliatoriaus paviršiaus laidumui sudaro ESDD, nes sudrėkus izoliatoriaus paviršiui, iš disocijuojančių druskų ir vandens sudarytas tirpalas visuomet būna laidesnis nei NSDD vertinamos kietosios dalelės [12].

Vertinti paviršiaus laidumą pagal ESDD arba NSDD įmanoma tik tiksliai žinant teršalų savitąjį laidumą. Tai padaryti labai sudėtinga, nes reikalinga tiksli teršalų sudėties ir koncentracijų analizė. Apytiksliam užteršto paviršiaus vertinimui naudojamas DDG vertinimas, kuris susietas su ESDD modeliu. DDG modelio esmė – nesudėtingas mechanizmas, kuris susideda iš keturių plačiabriaunių vamzdžių nukreiptų į keturias geografines kryptis – šiaurę, vakarus, pietus ir rytus. Šiame prietaise, kaip ir ant izoliatorių paviršių, nusėda kietosios dalelės (žr. 2.4 pav.)



2.4 pav. DDG modelyje naudojamas nuosėdų surinkimo įrenginys. [13]

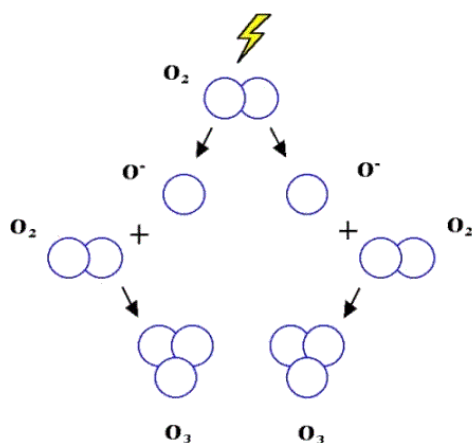
Įvertinus surinktų dalelių savitąjį laidumą, buvo nustatyta tiesiška koreliacija tarp ESDD ekvivalento ir DDG laidumo.

2.3 lentelė. DDG ir ESDD vertės esant įvairiems užterštumo lygiams [13]

Užterštumo lygis	DDG		ESDD
	Mėnesio vidurkis	Mėnesio maksimumas	Mėnesio maksimumas
	μS/cm		mg/cm ²
Lengvas	0 – 75	0 – 175	<0.06
Vidutinis	76 – 200	176 – 500	0.06 – 0.12
Stiprus	201 – 350	501 – 850	>0.12 – 0.24
Labai stiprus	>350	>850	>0.24

3. Vainikinis išlydis

Tai elektrinio išlydžio forma, kuri pasireiškia silpnu violetinės spalvos švytėjimu prie aukštos įtampos elektros įrenginių. Šie išlydžiai taip pat skleidžia ir žemo dažnio garsą. Esant silpniems vainikiniams išlydžiams, jie beveik nepastebimi plika akimi, o tipinis traškesys beveik nesigirdi, tačiau juos įmanoma aptikti fiksuojant jų skleidžiamą ultravioletinę šviesą arba ultragarsą [4]. Šie išlydžiai susidaro tada, kai stiprus elektrinis laukas jonizuoja netoli laidininko esančias dujas (orą), o jonizuotos dalelės ima nešti elektros krūvį. Atmosferos sąlygomis, vainikinis išlydžio metu, jonizuojamas deguonies molekulės, tuomet neigiami deguonies jonai, stumiami nuo elektrodo, kol pakankamai nutolsta nuo jonizuojančio elektrinio lauko. Elektrinio lauko nebeveikiami deguonies jonai jungiasi su kitomis deguonies molekulėmis ir sudaro ozono molekules O_3 (žr. 3.1 pav.)



3.1 pav. Deguonies molekulių jonizacija.

Vainikinio išlydžio susidarymo sąlyga pateikiama Peek'o dėsniumi [11]:

$$e_v = m_v \cdot g_v \cdot r \cdot \ln\left(\frac{S}{r}\right) \quad (17)$$

čia e_v – įtampa reikalinga matomam vainikiniam išlydžiui susiformuoti; m_v – laidininko netolygumo faktorius; r – laidininko skerspjūvio spindulys; S – atstumas tarp skirtingo potencialo laidininkų g_v – kritinė elektrinio lauko vertė [11].

Kritinė elektrinio lauko vertė apskaičiuojama taikant formulę (18):

$$g_v = g_0 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{c}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \quad (18)$$

Čia δ – oro tankumo faktorius, g_0 – ardantysis elektrinis laukas; c – empirinė konstanta.

Oro tankumo faktorius δ priklauso nuo atmosferos slėgio ir aplinkos temperatūros [17]. Apskaičiuojamas pagal formulę (19):

$$\delta = \frac{p}{101,3 \cdot 10^3} \cdot \frac{293}{237 + T} \quad (19)$$

Čia p – oro slėgis Pa; T – aplinkos temperatūra $^{\circ}C$

4. Tiriamieji objektai

Ižemėjimo įtakai išlydžiams įvertinti, naudojame dviejų tipų izoliatorių modelius. Vienas iš jų skirtas 10 kV oro linijoms ir pritaikytas lauko sąlygoms, o kitas naudojamas 10 kV uždaroje seno tipo skirstyklose, nepritaikytas lauko sąlygoms. Abiejų tipų izoliatoriams nubraižėme 3D modelius, kuriuos naudojame skaičiavimuose su programa Comsol Multiphysics.

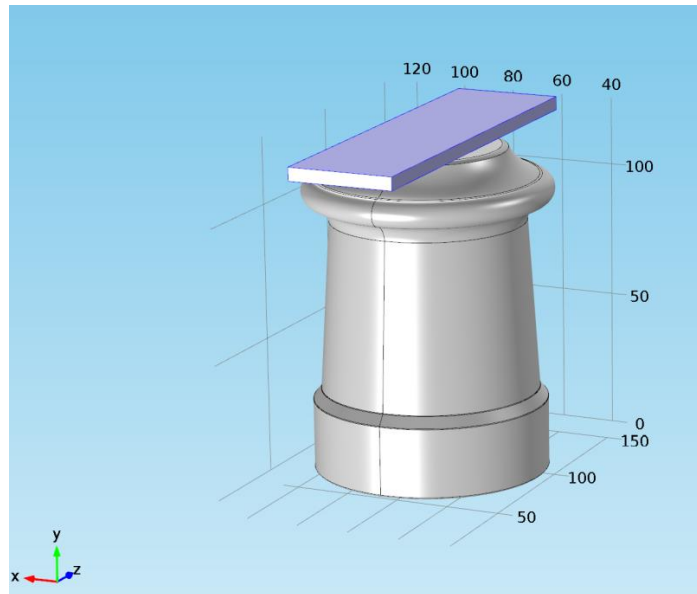
4.1 Tiriamasis objektas nr. 1

Tiriamasis objektas nr. 1, tai keramikinis atraminis izoliatorius IO-10/3,75 (žr. 4.1 pav.) [15]. Naudojamas seno tipo uždaroje 10 kV skirstyklose, transformatorinėse. Tokio tipo izoliatoriai plačiai naudojami Lietuvos skirstomojo tinklo elektros įrenginiuose.



4.1 pav. Atraminis izoliatorius IO-10/3,75

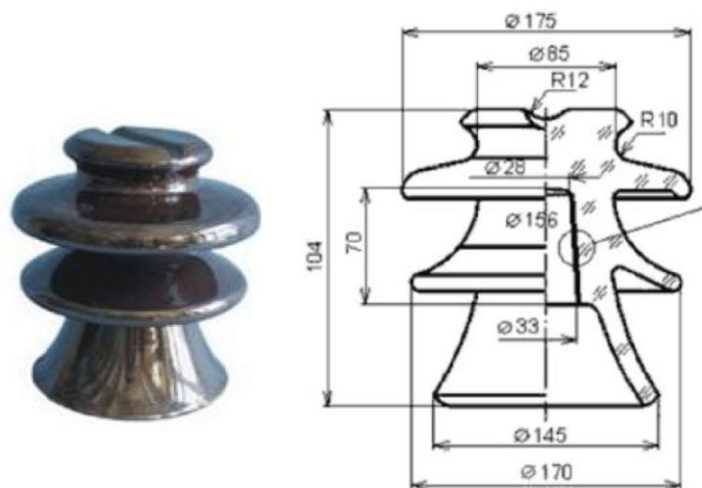
- Šio izoliatoriaus paviršius nepritaikytas lauko sąlygoms – lygus.
- Nominali įtampa: 10 kV;
- Masė: 1,4 kg;
- Srovės nuotėkio kelias: 137 mm;
- Naudojamas laidininkas – aliuminio šyna, 5 mm x 40 mm.



4.2 pav. Atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 3D modelis Comsol Multiphysics programoje

4.2 Tiriamasis objektas nr. 2

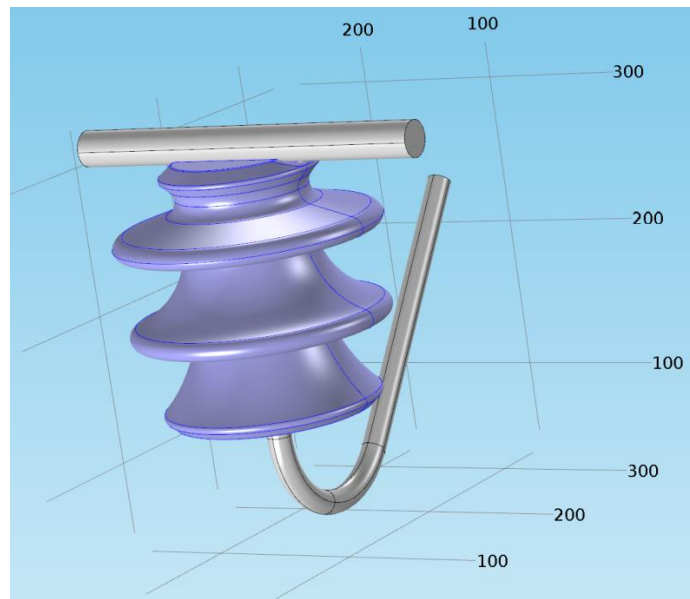
Tiriamasis objektas nr. 2 tai keramikinis smaiginis izoliatorius ŠF-20 (žr. 4.3 pav.) Šio tipo izoliatoriai naudojami 10 kV oro linijose. Tokio tipo izoliatoriai plačiai naudojami Lietuvos skirstomojo tinklo 10 kV oro linijose.



4.3 pav. Smaiginis izoliatorius ŠF-20

- Šio izoliatoriaus paviršius pritaikytas lauko sąlygoms – briaunuotas.
- Nominali įtampa: 20 kV;
- Masė: 3,5 kg;

- Srovės nuotėkio kelias: 386 mm;
- Naudojamas laidininkas – aliuminio laidas, 24 mm skersmens.



4.4 pav. Smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 3D modelis.

4.3 Tyrimo metu vertinamos sąlygos.

Tyrimo metu išlydžių formavimasis vertinamas dviem skirtingais elektros tinklo režimais – normaliu režimu, kai fazinė tinklo įtampa 6,06 kV ir esant metaliniam įžemėjimui tinkle, kai fazinė neįžemėjusių fazių įtampa pakyla 1,73 karto t.y. iki 10,5 kV.

Abiem tinklo režimais, izoliatorių paviršiai užteršti 2.3 lentelėje nurodytais ESDD užterštumo lygiais, ir padengti vandens plėvele. ESDD ir vandens plėvelės sudaryto tirpalo sluoksnio ant izoliatoriaus paviršiaus pagal Comsol Multiphysics storis 0,1 mm. Aplinkos temperatūra 20 °C, atmosferos slėgis 101 kPa.

5. Išlydžių ant izoliatoriaus paviršiaus tyrimas

5.1 Izoliatorių paviršių varža

Izoliatorių paviršių varžai apskaičiuoti naudojamas paviršiaus savitasis laidumas ir sudėtingi matematiniai modeliai įvertinantys izoliatoriaus formą ir jie pritaikomi būtent tam tikram izoliatoriaus tipui. Šiame tyrime izoliatoriaus paviršiaus varža apskaičiuojama naudojant *Comsol Multiphysics* programą.

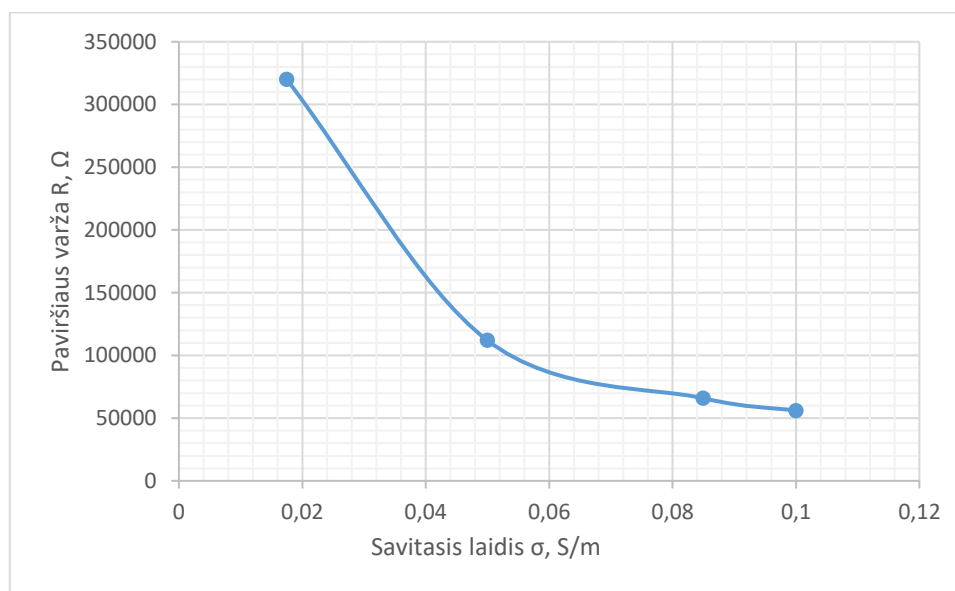
Į programą įkėlus 3D izoliatoriaus modelį, sukūriau 0,1 mm storio teršalų sluoksnį ant jo paviršiaus. Priklausomai nuo DDG užterštumo lygio, į užteršto sluoksnio parametrus įvedžiau atitinkamą savitąjį laidumą. Atsižvelgiant į tai, kad paviršius padengtas tolygia vandens plėvele, o tai įmanoma tik esant

labai drėgnomis aplinkos sąlygomis, todėl savitąjį laidumą iš 2.3 lentelės parenku mėnesio maksimumą. Galutinę rezultato išvestį parinkau paviršiaus varžą, Ω . Gautus rezultatus pateikiu 5.1 ir 5.2 lentelėse bei grafikuose (žr. 5.1, 5.2 pav.)

Atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varžos

5.1 lentelė. Atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varža pagal užterštumo lygį

Užterštumo lygis	ESDD	DDG	DDG	Paviršiaus varža
	mg/cm ²	μS/cm	S/m	Ω
Lengvas	0,06	175	0,0175	319850
Vidutinis	0,12	500	0,05	111950
Stiprus	0,24	850	0,085	65851
Labai stiprus	0,3	1000	0,1	55974

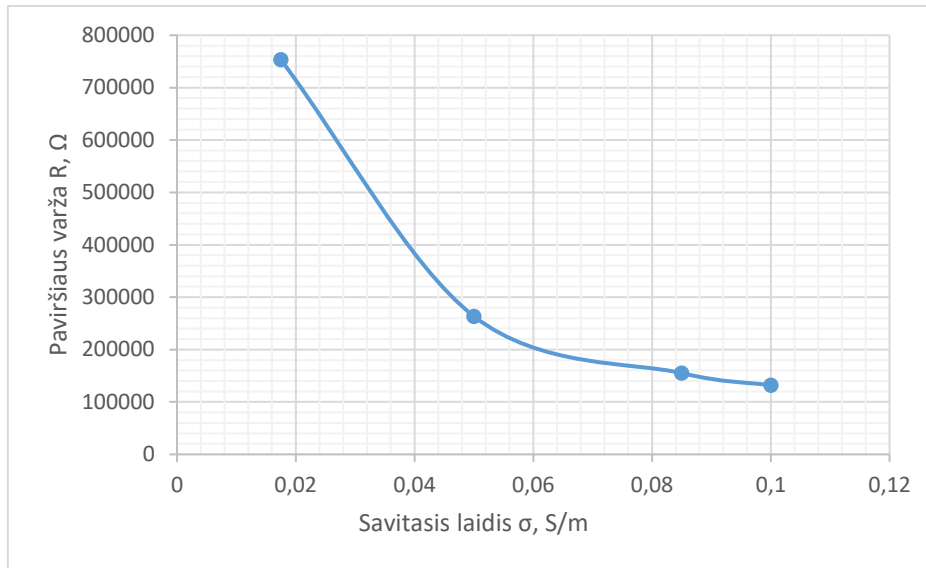


5.1 pav. Izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varžos priklausomybė nuo savitojo laidumo

Smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus varžos

5.2 lentelė. Smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus varža pagal užterštumo lygį

Užterštumo lygis	ESDD	DDG	DDG	Paviršiaus varža
	mg/cm ²	μS/cm	S/m	Ω
Lengvas	0,06	175	0,0175	753320
Vidutinis	0,12	500	0,05	263660
Stiprus	0,24	850	0,085	155090
Labai stiprus	0,3	1000	0,1	131830



5.2 pav. Izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus varžos priklausomybė nuo savitojo laidumo

Esant tam pačiam užterštumo lygiui ir savitajam paviršiaus laidumui, izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus varža gaunama didesnė, nei IO-10/3,75, nes ŠF-20 nuotėkio ilgis yra didesnis

5.3 Išlydžio ant izoliatoriaus paviršiaus formavimasis normaliu tinklo režimu

Tekant nuotėkio srovei užterštu, drėgnu izoliatoriaus paviršiumi, išsiskirianti šiluma išdžiovina nedidelį plotelį vandens plėvelės, ties ta vieta, kur srovės tankis didžiausias. Jei įtampa pakankama, per išdžiovintą plotą pradeda formuotis išlydis. Tačiau, kad šis išlydis būtų pastovus, reikalinga tenkinti kitą įtampos sąlygą. Išdžiovinto plotelio ilgis L_a skaičiuojamas pagal formulę (7):

$$L_a = \frac{r \cdot L}{r + \frac{A - N}{i^{m+1}}} \quad (7)$$

Čia r – izoliatoriaus paviršiaus varža tenkanti ilgio vienetui; L – nuotėkio izoliatoriaus paviršiumi ilgis; A , N – elektros lanko konstantos

Įtampa U_a reikalinga palaikyti elektros srovės tekėjimui per elektros lankelį L_a skaičiuojama pagal formulę [13] (14):

$$U_a = \frac{N \cdot L_a}{i^n} \quad (14)$$

Čia N ir n – elektros lanko konstantos; L_a – išdžiovinto plotelio ilgis; i – nuotėkio srovė

Įtampa reikalinga palaikyti išlydį U skaičiuojama pagal formulę (15):

$$U = U_a + i \cdot r \cdot (L - L_a) \quad (15)$$

Čia i – nuotėkio srovė, r – paviršiaus varža tenkanti ilgio vienetui, L – nuotėkio izoliatoriaus paviršiumi ilgis.

Skaičiavimuose naudojamos konstantos $N=10^4 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}/\text{A}$, $A=8\cdot 10^4$, $m=0,5$, $n=0,7$. [13]

Įtampos U_a ir U apskaičiuojamos abiem izoliatoriam, kai tinkle nėra įžemėjimo, o fazinė įtampa 6060 V. Rezultatai pateikiami 5.3 ir 5.4 lentelėse.

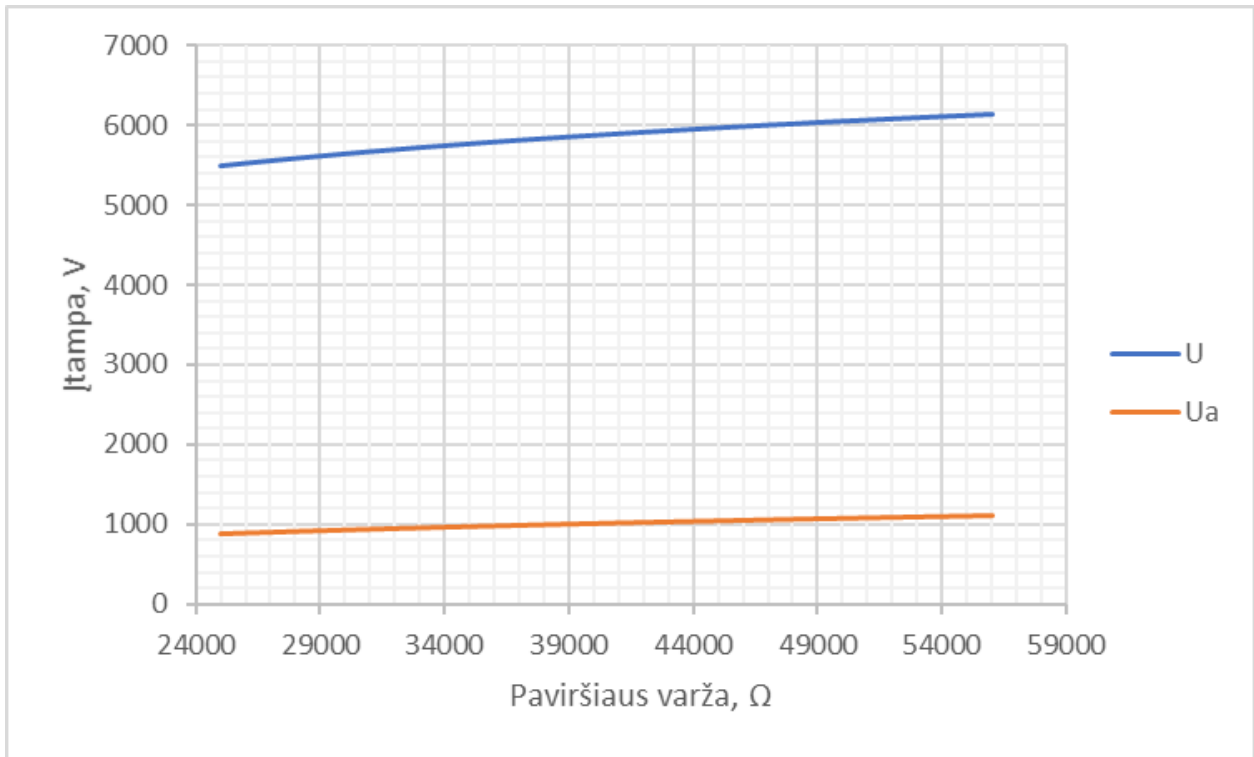
5.3 lentelė. Įtampos reikalingos išlydžiui ant izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus susiformuoti

Užterštumo lygis	R_{max}, Ω	$r, \Omega/\text{mm}$	L_a, mm	I, A	U_a, V	U, V
Lengvas	319850	2334,672	11	0,019	1760,548	7335,630
Vidutinis	111950	817,153	18	0,054	1352,426	6635,679
Stiprus	65851	480,664	22	0,092	1170,652	6255,849
Labai stiprus	55974	408,569	24	0,108	1117,993	6134,880

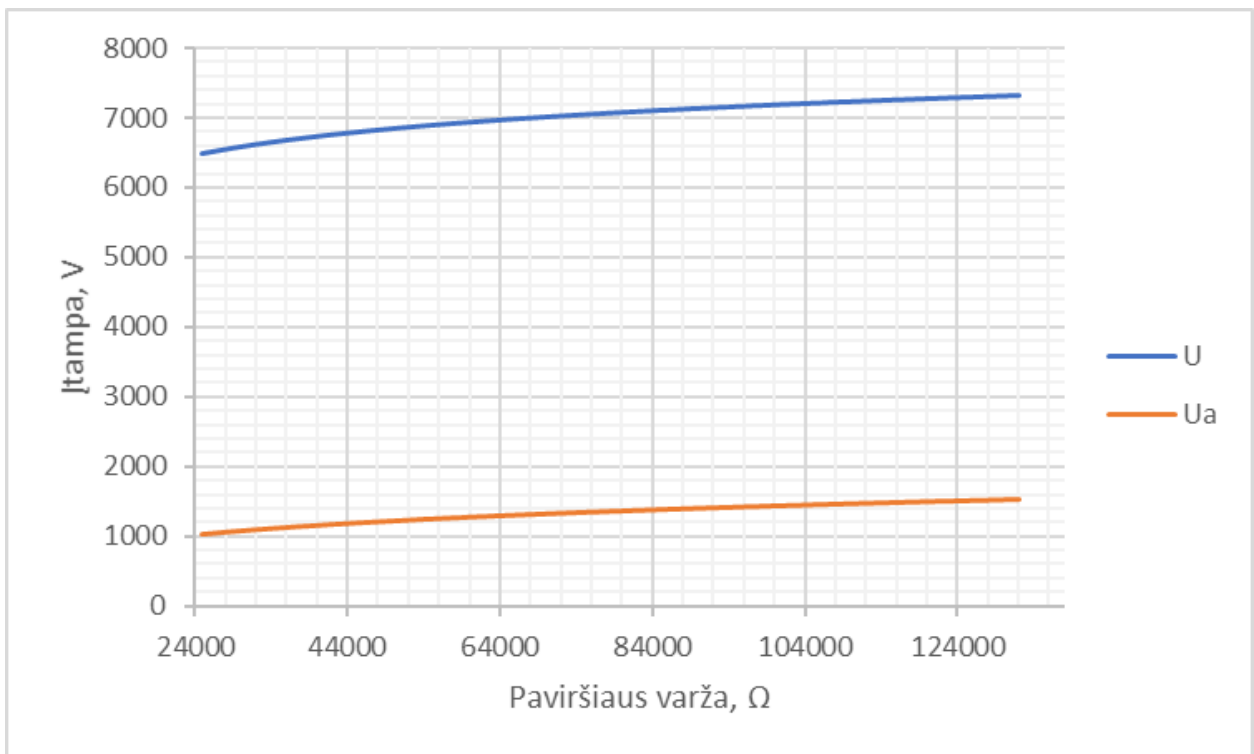
5.4 lentelė. Įtampos reikalingos išlydžiui ant izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus susiformuoti

Užterštumo lygis	R_{max}, Ω	$r, \Omega/\text{mm}$	L_a, mm	I, A	U_a, V	U, V
Lengvas	753320	1951,606	8	0,008	2226,520	8167,023
Vidutinis	263660	683,057	13	0,023	1780,605	7641,330
Stiprus	155090	401,788	16	0,039	1585,469	7388,213
Labai stiprus	131830	341,528	18	0,046	1529,277	7311,246

Skaičiavimuose naudota fazinė įtampa 6060 V, o pagal DDG užterštumo lygius skaičiuotos įtampos reikalingos išlydžiams formotis yra aukštesnės, abiejų izoliatorių atvejais, nei fazinė įtampa tinklui esant normaliaame režime. Kadangi paviršiaus varža, prie kurios įmanomas išlydžio formavimasis yra mažesnė nei nurodyta lentelėje 2.1 lygyje „Labai užterštas“ pagal DDG, toliau nustatinėjama maksimali varža atliekant skaičiavimus, mažinant varža 500 Ω žingsniu. Gauti rezultatai pateikiami grafikuose (žr 5.3, 5.4 pav.).



5.4 pav. U_a ir U priklausomybė nuo izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžos



5.4 pav. U_a ir U priklausomybė nuo izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus varžos

Atliekant skaičiavimus nustatyta, kad esant fazinei įtampai 6060 V, stabilus išlydis ant izoliatoriaus paviršiaus išdžiovinto plotelio gali susiformuoti, kai izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varža yra apie 51000 Ω, tuomet L_a lygus 25 mm, o ant izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus išdžiovinto plotelio, išlydis nesiformuoja net pasiekus varža 25000 Ω, tad skaičiavimus mažinant varža 500 Ω žingsniu, apskaičiuota, kad stabiliam išlydžiui susiformuoti reikalinga paviršiaus varža 11500 Ω, tuomet L_a lygus 54 mm.

Išlydis ant izoliatoriaus paviršiaus perauga į lankinį išlydį ir pramuša visą izoliatoriaus paviršių, kai išlydžio ilgis pasiekia $2L/2$. Tam reikalinga įtampa U_F kuri apskaičiuojama pagal formulę (16):

$$U_F = B \cdot r^{\frac{m}{m+1}} \cdot L \quad (16)$$

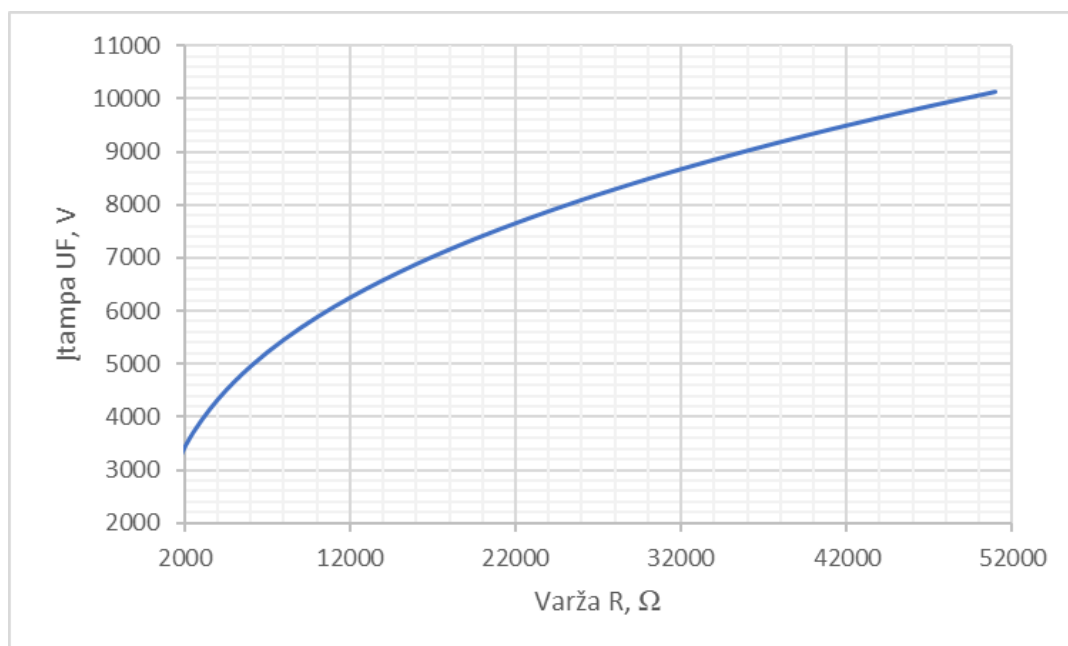
Čia r – paviršiaus varža ilgio vienetui; m – Claverie koeficientas 0,5; L – nuotėkio ilgis

Koeficientas B apskaičiuojamas pagal formulę (17):

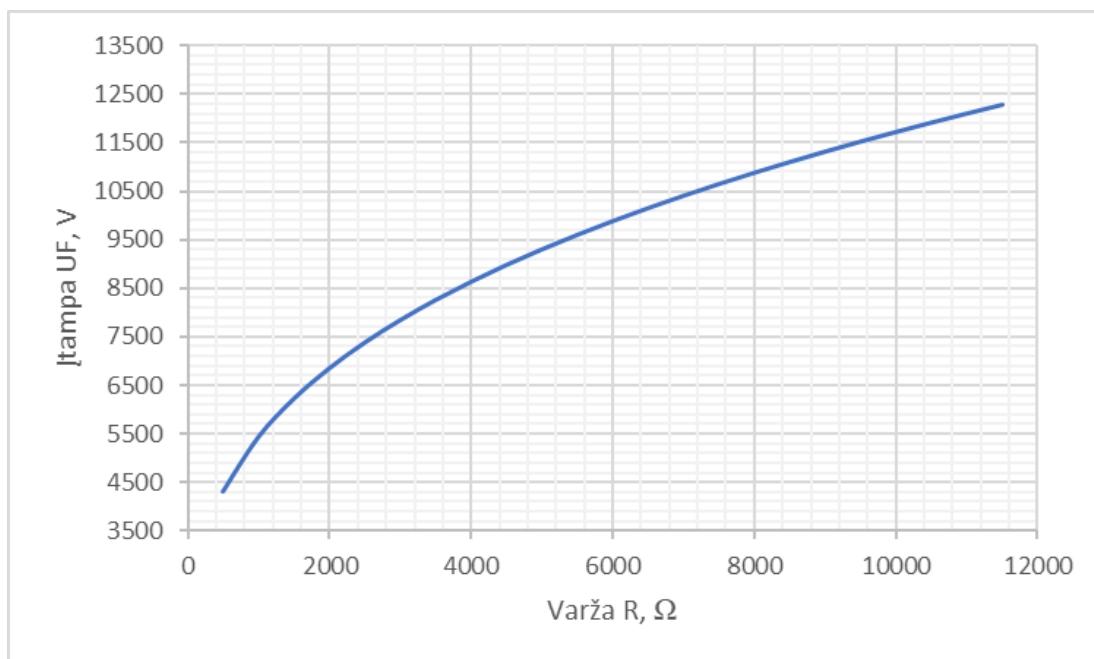
$$B = \frac{A}{m + 1} \cdot \left(\frac{m}{A - N} \right)^{\frac{m}{m+1}} \quad (17)$$

Čia m , A , N – anksčiau minėti koeficientai.

U_F apskaičiuoju tik atvejams, kai izoliatorių paviršiaus varža pakankamai maža, kad susiformuotų išlydis ant išdžiovinto vandens plėvelės plotelio. Apskaičiuotos vertės pateikiamos grafikuose (žr. 5.5, 5.6 pav.)



5.5 pav. U_F priklausomybė nuo izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžos R

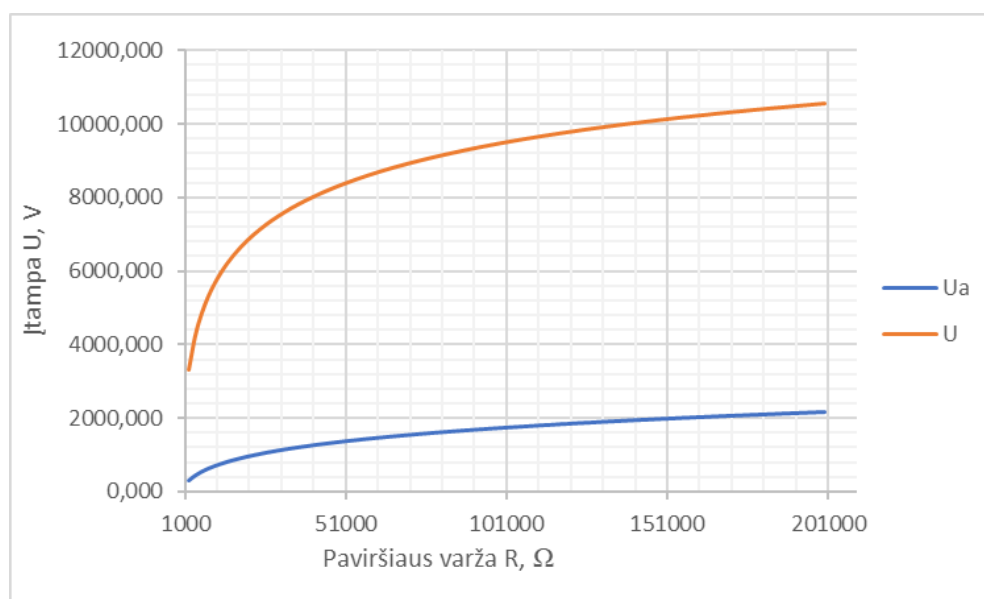


5.6 pav. U_F priklausomybė nuo izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžos R

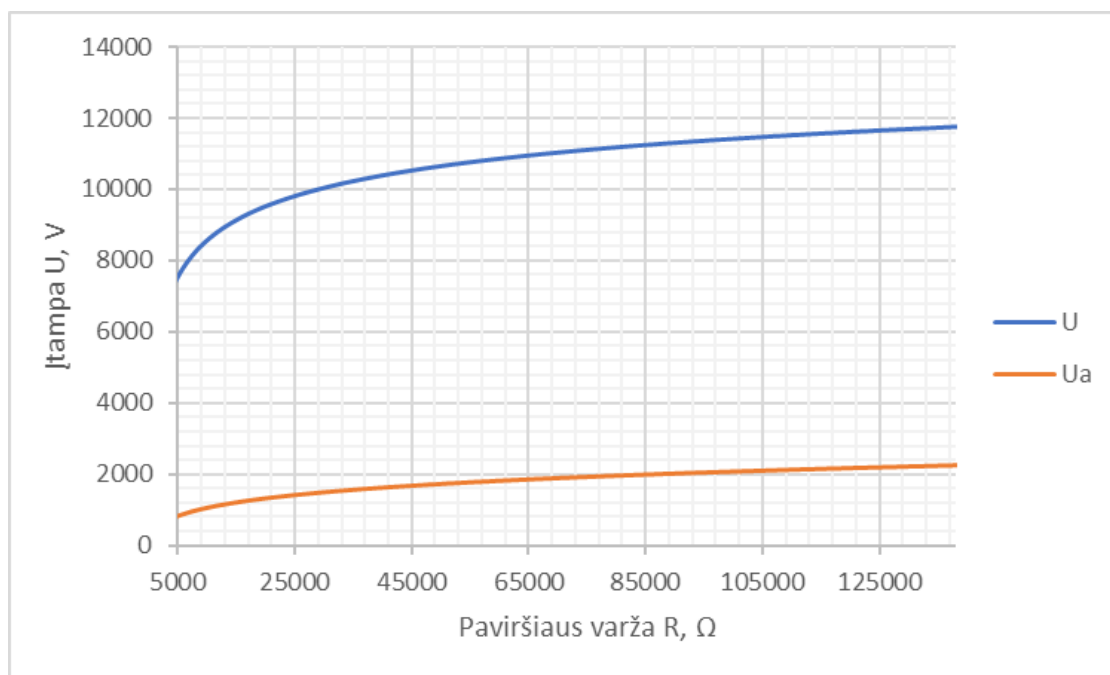
Normaliu tinklo režimu, kai fazinė įtampa lygi 6060 V, ant užteršto atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus susiformuoja lankinis išlydis, kai paviršiaus varža mažesnė nei 11000 Ω, o smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 – 1400 Ω.

5.4 Išlydžio ant izoliatoriaus paviršiaus formavimasis tinkle esant įžemėjimui

Žemiau pateikiami skaičiavimų rezultatai apskaičiuoti pagal metodiką 5.3 poskyryje tačiau įvertinus tai, kad metalinio įžemėjimo metu fazinė įtampa lygi 10500 V.

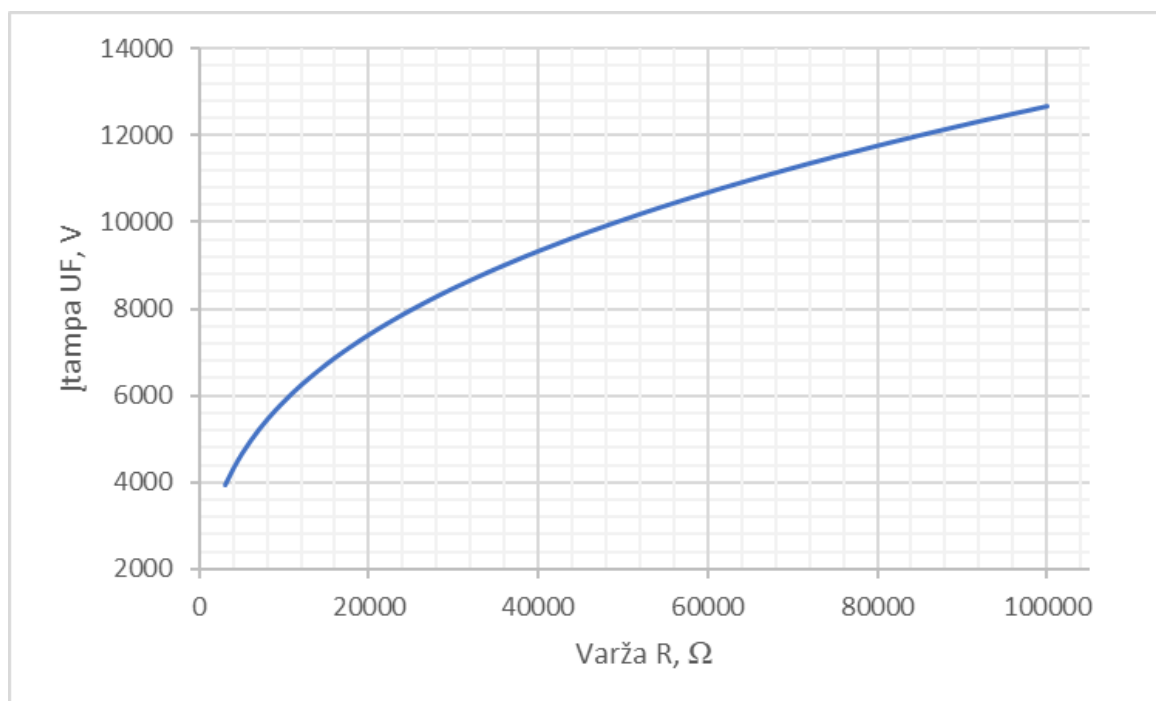


5.7 pav. U_a ir U priklausomybė nuo IO-10/3,75 paviršiaus varžos, kai tinkle yra įžemėjimas

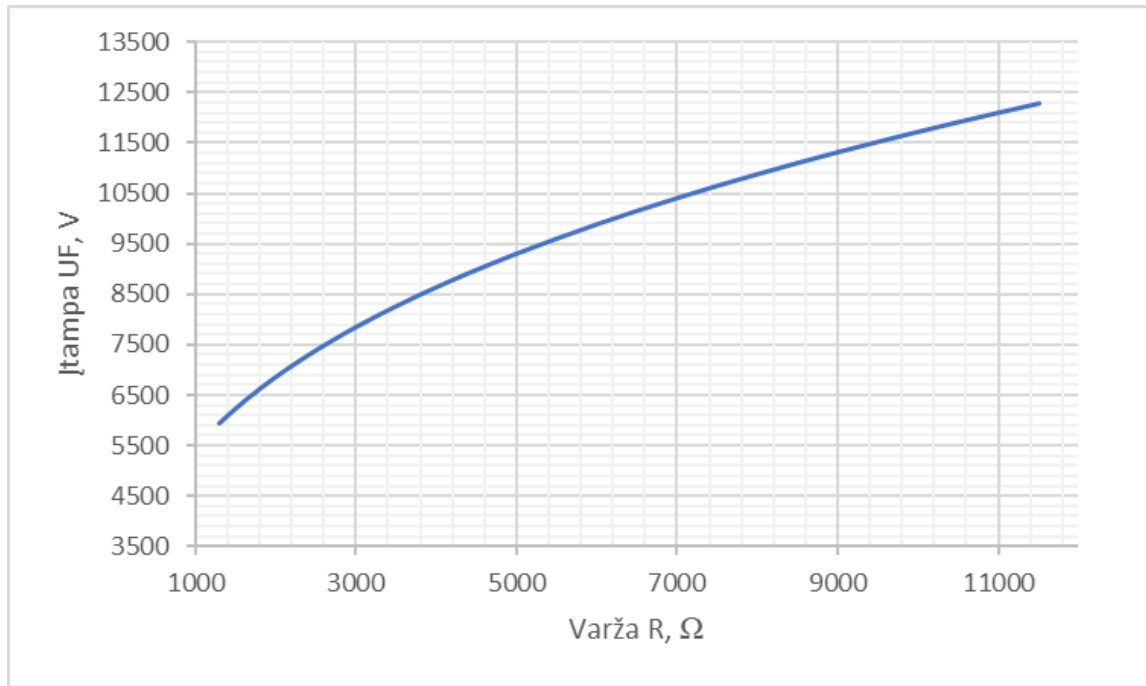


5.8 pav. U_a ir U priklausomybė nuo ŠF – 20 paviršiaus varžos, kai tinkle yra įžemėjimas

Toliau pateikiami izoliatorių užterštų paviršių pramušimo įtampos skaičiavimo rezultatų grafikai:



5.9 pav. U_F priklausomybė nuo izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžos R



5.10 pav. U_F priklausomybė nuo izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus varžos R

5.3 Apibendrinami išlydžio ant izoliatoriaus paviršiaus skaičiavimo rezultatai

Lentelėje 5.4 pateikiami išlydžio ant užteršto atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus, per nuotėkio srovės išdžiovintą plotelį, normaliomis sąlygomis, kai fazinė įtampa 6060 V ir kai tinkle yra įžemėjimas, o fazinė įtampa 10500 V.

5.4 lentelė. Išlydžio ant užteršto atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 skaičiavimo rezultatai

	U, V	R_{max}, Ω	$\sigma, \mu S$	L_a, mm	U_a, V
Normalios sąlygos	6060	51000	19,610	24,504	1089
Tinkle įžemėjimas	10500	192000	5,208	27,927	2136

Toliau lyginami gauti rezultatai skaičiuojant atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus varžą kurią gali pramušti fazinė įtampa, kai tinklas dirba normaliu režimu arba kai tinkle yra įžemėjimas.

5.5 lentelė. Izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus varžos pramušamos fazinės įtampos

	U, V	R_{max}, Ω	$\sigma, \mu S$	L, mm
Normalios sąlygos	6060	11000	90,909	137
Tinkle įžemėjimas	10500	57000	17,54	137

Lentelėje 5.6 pateikiami išlydžio ant užteršto smaginio izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus, per nuotėkio srovės išdžiovintą plotelį, normaliomis sąlygomis, kai fazinė įtampa 6060 V ir kai tinkle yra įžemėjimas, o fazinė įtampa 10500 V.

5.6 lentelė. Išlydžio ant užteršto atraminio izoliatoriaus ŠF-20 skaičiavimo rezultatai

	U, V	R_{max}, Ω	$\sigma, \mu S$	L_a, mm	U_a, V
Normalios sąlygos	6060	11500	86,957	54,045	846
Tinkle įžemėjimas	10500	44000	22,727	61,585	1679

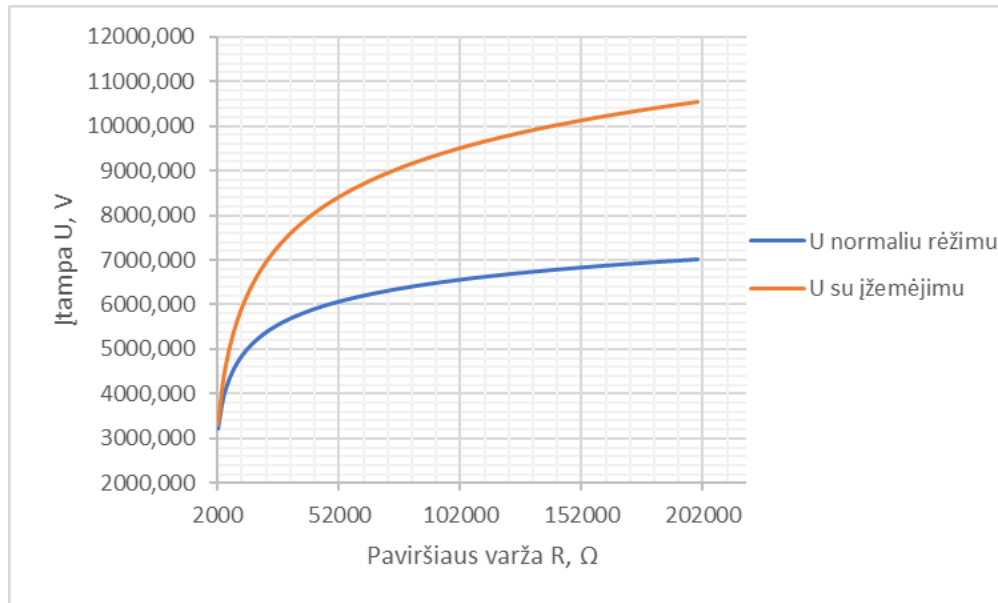
Toliau lyginami gauti rezultatai skaičiuojant smaginio izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus varžą, kurią gali pramušti fazinė įtampa, kai tinklas dirba normaliu režimu arba kai tinkle yra įžemėjimas.

5.7 lentelė. Izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus varžos pramušamos fazinės įtampos

	U, V	R_{max}, Ω	$\sigma, \mu S$	L, mm
Normalios sąlygos	6060	1400	714,286	386
Tinkle įžemėjimas	10500	7000	142,857	386

Izoliatorius IO-10/3,75

Lyginant užteršto izoliatoriaus paviršiaus laidumus su 2.1 lentelėje pateiktais užterštumo lygiais, matome, kad išlydis per srovės išdžiovintą plotelį formuotūsi ant atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75, tinkle esant normalioms sąlygoms, reikalingas „smarkiai užterštas“ lygis 19,610 μS . Tinkle esant įžemėjimui jau pakanka, kad izoliatoriaus paviršiaus užterštumo lygis būtų tarp „mažai užterštas“ ir smarkiai užterštas“ lygis 5,208 μS .



5.11 pav. Išlydžio formavimosi įtampos priklausomybė nuo IO-10/3,75 paviršiaus varžos

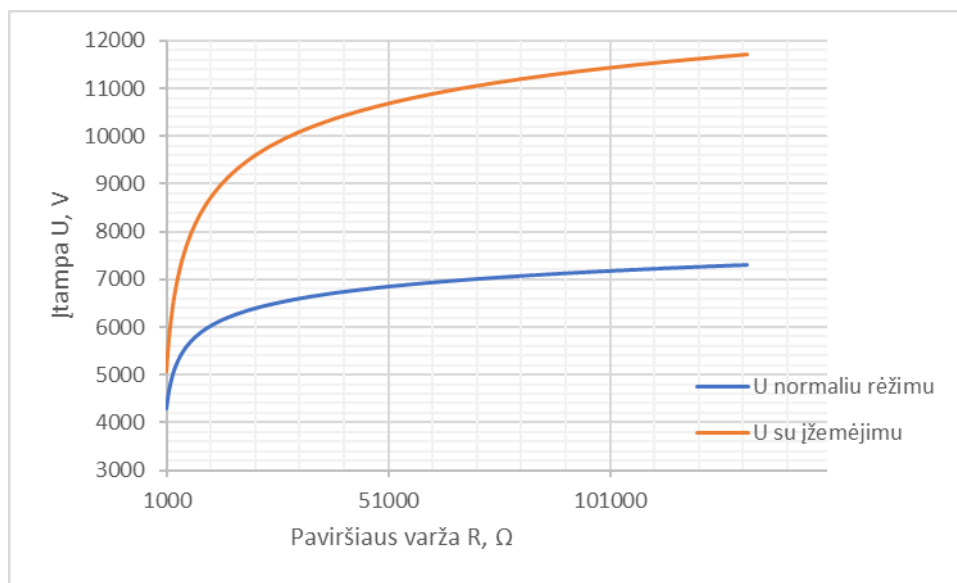
Vertinant izoliatoriaus paviršiaus pramušimui reikalingą užterštumo lygį, matome, kad izoliatoriaus IO-10/3,75 užterštas paviršius, normaliomis sąlygomis gali būti pramuštas, tik pasiekus dvigubai didesnę nei „ypač užterštas“ lygį 90,909 μS . Tinkle įžemėjus vienai fazei, užterštam izoliatoriaus paviršiui pramušti, jau pakanka „smarkiai užterštas“ lygio 17,54 μS .

Pagal gautus skaičiavimo rezultatus matome, kad įžemėjimas tinkle išlydžiui formuoti reikalingą laidumą ant atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 užteršto paviršiaus, sumažina beveik 3,77 karto, o pramušimui reikalingą laidumą sumažina net 5,18 karto. Ant „smarkiai užteršto“ tokio tipo izoliatoriaus paviršiaus galimas dalinių išlydžių formavimasis per srovės išdžiovintą plotelį, kuris nesukelia didelio pavojaus pačiam tinklui, tačiau jei tinkle įvyktų įžemėjimas, šis išlydis gali peraugti į visą paviršių dengiantį išlydį ir pramušti izoliatoriaus paviršių, taip išprovokuodamas linijų atjungimus ir avarijos elektros tinkle išplėtimą. Tai parodo, kad seno tipo transformatorinės, kuriose naudojami tokio tipo atraminiai izoliatoriai, reikalauja atitinkamos priežiūros, kad pačio pastato konstrukcijos užtikrintų izoliatorių apsaugą nuo išorės taršos kietosiomis dalelėmis ir drėgme, o pats užterštumo lygis ant izoliatorių paviršių turi būti nuolatos stebimas.

Izoliatorius ŠF-20

Pagal 2.1 lentelėje pateiktus paviršiaus užterštumo lygius vertinant gautus ŠF-20 smaiginio izoliatoriaus skaičiavimus matome, kad kai elektros tinkle yra standartinės sąlygos, daliniams išlydžiams per elektros srovės išdžiovintą plotelį formuoti reikalingas minimalus laidumas 86,957 μS , o tai net du kartus viršija „ypač užterštas“ lygį. Tinkle atsiradus įžemėjimui, reikalingas laidumas

sumažėja iki 22,727 μS , tai tebėra „ypač užterštas“ lygio ribose, nors reikiamas laidumas 3,83 karto mažesnis.



5.12 pav. Išlydžio formavimosi įtampos priklausomybė nuo ŠF-20 paviršiaus varžos

Vertinant smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 užteršto paviršiaus reikiamą laidumą, kad jis būtų pramuštas matome, kad tinkle esant normalioms sąlygoms reikalingas 714,286 μS laidumas, o tai beveik 20 kartų viršija „ypač užterštas“ lygį. Atsiradus tinkle įžemėjimui, reikiamas laidumas sumažėja net 5 kartus iki 142,857 μS , tačiau tai taip pat net 3,6 karto viršija „ypač užterštas“ ribą.

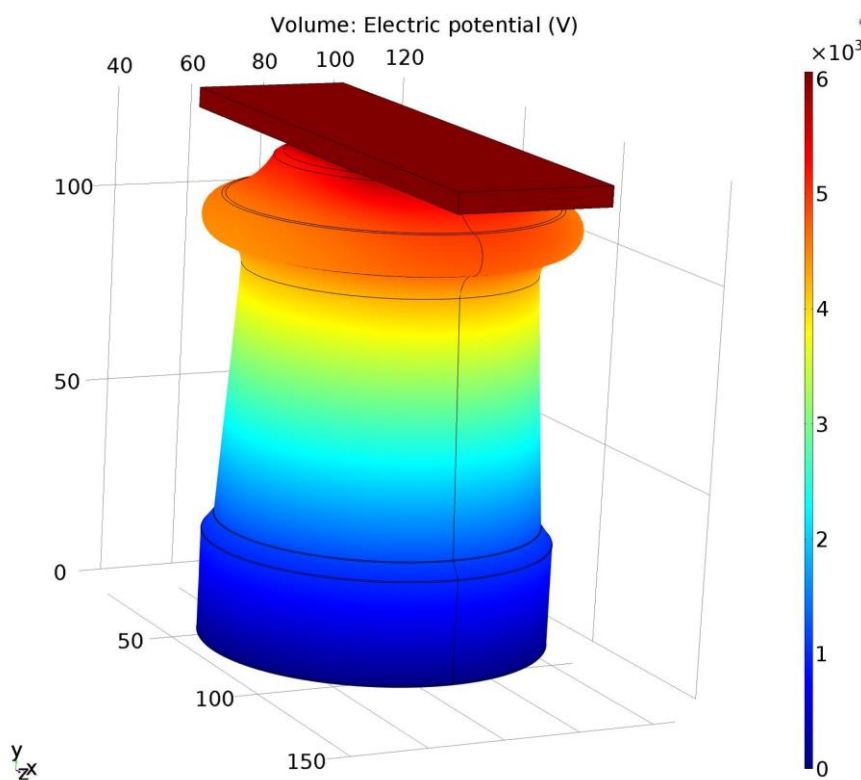
Pagal gautus skaičiavimo rezultatus matome, kad įžemėjimas tinkle, stipriai įtakoja išlydžių formavimuisi reikalinga užteršto paviršiaus laidumą ant ŠF-20 izoliatoriaus, tačiau net ir įžemėjus fazei tinkle, reikalingas ekstremalus užterštumas ant ŠF-20 paviršiaus, kad ant jo paviršiaus pradėtų formuotis išlydžiai.

6. Vainikinių išlydžių tyrimas

Dėl padidėjusios fazinės įtampos įžemėjimo metu, taip pat galimas ir vainikinių išlydžių formavimasis. Su Comsol Multiphysics programa sumodeliavau potencialo ir elektrinio lauko pasiskirstymą ant izoliatorių paviršių. Tuomet gautus rezultatus panaudojau vertinant vainikinių išlydžių susiformavimo galimybę pagal Peek'o dėsnį. Skaičiavimai atliekami, kada tinklas dirba normaliu režimu, o fazinė įtampa 6060 V ir kada tinkle yra įžemėjimas, o fazinė įtampa 10500 V.

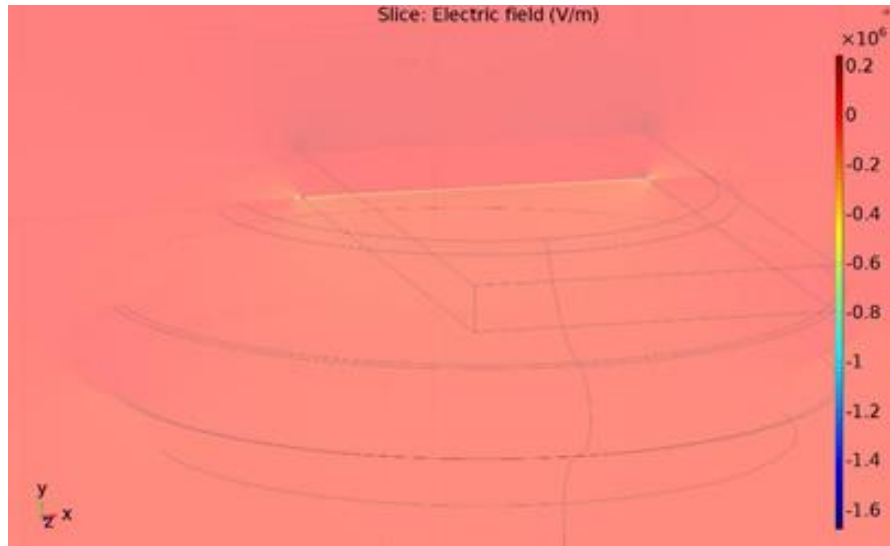
Atraminis izoliatorius IO-10/3,75

Žemiau pateikiamas elektrinio potencialo pasiskirstymas ant atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75, kai tinklas dirba normaliu režimu (žr. 6.1 pav.)



6.1 pav. Potencialo pasiskirstymas ant izoliatoriaus IO-10/3,75, normaliu režimu

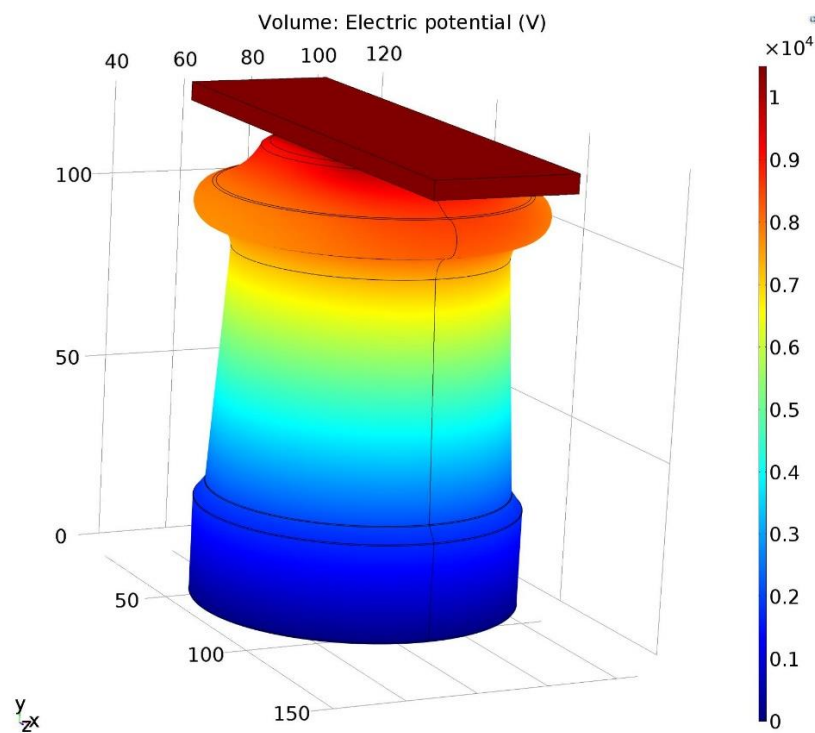
Toliau pateikiamas elektrinio lauko pasiskirstymas ore, prie atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75 (6.2 pav.), kai tinklas dirba normaliu režimu.



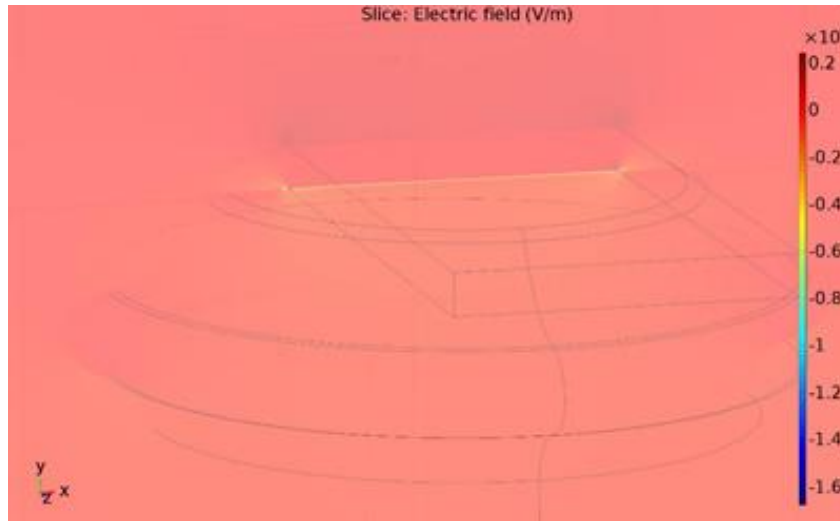
6.2 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus IO-10/3,75, normaliu režimu

Stipriausias elektrinis laukas ties šynos kampais, ties šiomis vietomis bus vertinama vainikinio išlydžio formavimosi galimybė. Elektrinis laukas šiose vietose yra apie 13,4 kV/m.

Toliau modeliuojamas elektrinis laukas ir potencialo pasiskirstymas, kai tinkle yra įžemėjimas ir fazinė įtampa pakyla iki 10500 V. Žemiau pateikiamas potencialo ir elektrinio lauko pasiskirstymas ant atraminio izoliatoriaus IO-10/3,75, kai tinkle yra įžemėjimas (žr. 6.3, 6.4 pav.)



6.3 pav. Potencialo pasiskirstymas ant izoliatoriaus IO-10/3,75, su įžemėjimu tinkle

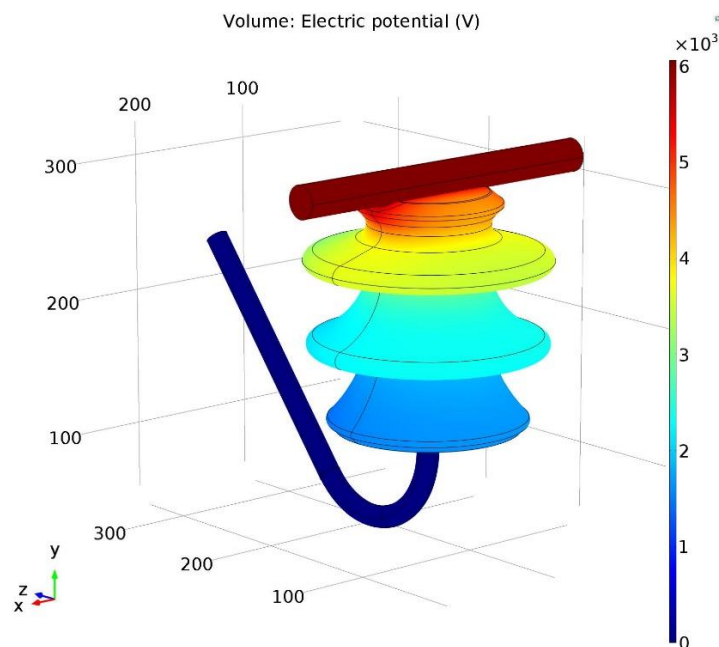


6.4 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus IO-10/3,75 su įžemėjimu tinkle

Stipriausias elektrinis laukas yra ties šynos kampais, ties šiomis vietomis bus vertinama vainikinio išlydžio formavimosi galimybė. Elektrinis laukas šiose vietose yra apie 24,2 kV/m.

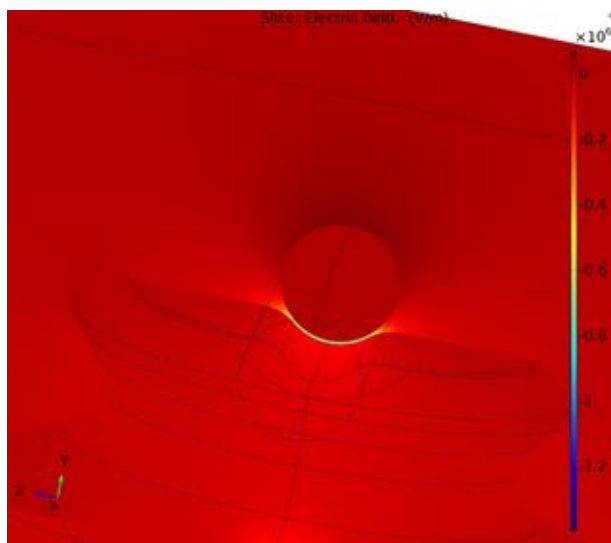
Smaiginis izoliatorius ŠF-20

Žemiau pateikiamas elektrinio potencialo pasiskirstymas ant smaiginio izoliatoriaus ŠF-20, kai tinklas dirba normaliu režimu (žr. 6.5 pav.)



6.5 pav. Potencialo pasiskirstymas ant izoliatoriaus IO-10/3,75, normaliu režimu

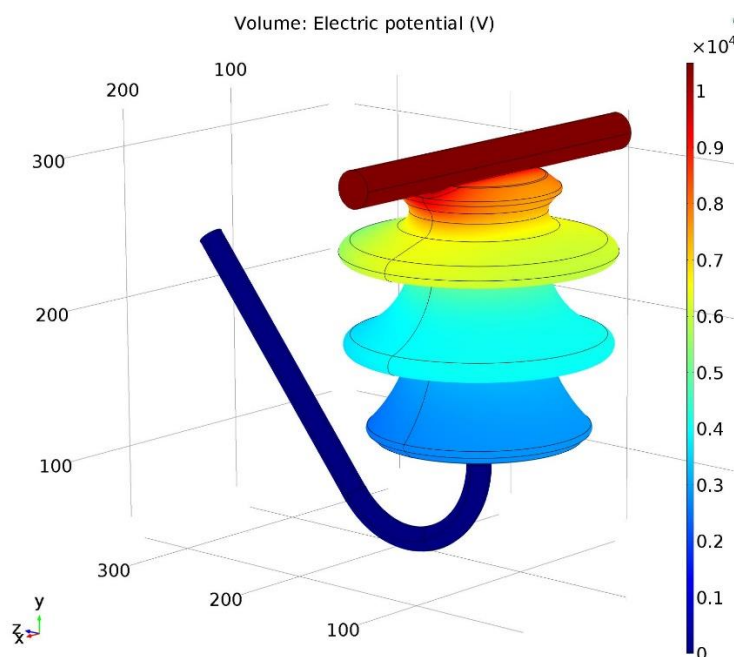
Toliau pateikiamas elektrinio lauko pasiskirstymas ore, prie smaiginio izoliatoriaus ŠF-20 (6.6 pav.), kai tinklas dirba normaliu režimu.



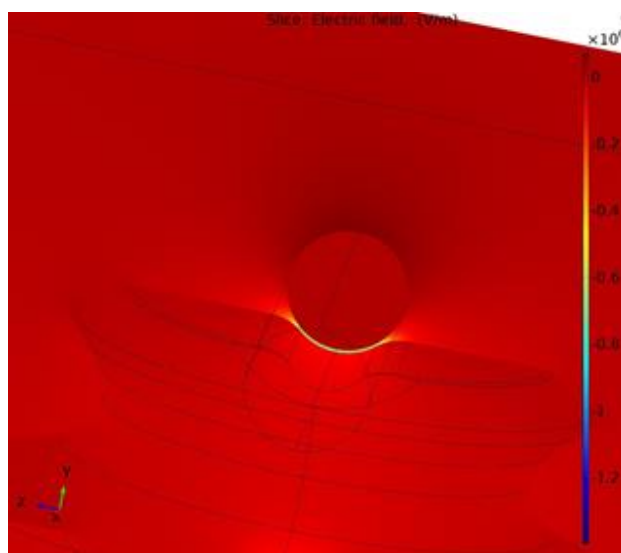
6.6 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus ŠF-20, normaliu režimu

Stipriausias elektrinis laukas ties aliuminio laido viršumi, ties šia vieta bus vertinama vainikinio išlydžio formavimosi galimybė. Elektrinis laukas šioje vietose yra apie 8,5 kV/m.

Modeliuojamas elektrinis laukas ir potencialo pasiskirstymas kai tinkle yra įžemėjimas ir fazinė įtampa pakyla iki 10500 V. Žemiau pateikiamas potencialo ir elektrinio lauko pasiskirstymas ant smaiginio izoliatoriaus, kai tinkle yra įžemėjimas (žr. 6.7, 6.8 pav.)



6.7 Potencialo pasiskirstymas smaiginio izoliatoriaus ŠF-20, normaliu režimu



6.8 Elektrinio lauko pasiskirstymas prie izoliatoriaus ŠF-20, su įžemėjimu

Stipriausias elektrinis laukas ties aliuminio laido viršumi, ties šia vieta bus vertinama vainikinio išlydžio formavimosi galimybė. Elektrinis laukas šioje vietose yra apie 15,3 kV/m.

Pagal formulę apskaičiuojama elektrinio lauko vertė reikalinga vainikinio išlydžio formavimuisi (18):

$$g_v = g_0 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{c}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \quad (18)$$

Skaičiavimų rezultatai pateikiami 6.1 lentelėje:

6.1 lentelė. Vainikinių išlydžių formavimasis

Izoliatorius	Reikalingas elektrinis laukas, kV/m	Elektrinis laukas normaliu režimu, kV/m	Elektrinis laukas su įžemėjimu, kV/m
IO-10/3,75	59 kV/m	13,4 kV/m	24,2 kV/m
ŠF-20	38 kV/m	8,5 kV/m	15,3 kV/m

Pagal apskaičiuotus rezultatus matome, kad vainikinis išlydis nesiformuoja prie abiejų izoliatorių normaliam režime ir esant įžemėjimui, tad įžemėjimas 10 kV tinkle vainikinių išlydžių formavimuisi įtakos neturi

Išvados

1. Aptartas įžemėjimo tinkle sukeliamas neutralės poslinkis ir jo įtaka fazinės įtampos padidėjimui. Apžvelgtos galimos pasekmės, kurias gali sukelti fazinės įtampos padidėjimas, įžemėjimo tinkle
2. Aprašytas išlydžio formavimasis ant užteršto izoliatoriaus paviršiaus. Įvertinta užteršto paviršiaus varžos įtaka jo formavimuisi.
3. Apžvelgti izoliatorių užteršto vertinimo kriterijai, teršalų tipai ir užterštumo lygiai. Palyginti skirtingų užterštumo lygių paviršiaus laidumai.
4. Aprašyti keli skirtingi matematiniai modeliai vertinantys išlydžio ant izoliatoriaus paviršiaus formavimąsi ir paviršiaus taršos pramušimo galimybę.
5. Aprašytas vainikinis išlydis ir jo formavimosi kriterijus.
6. Įvertinta įžemėjimo įtaka išlydžiams ant užterštų izoliatorių paviršių.
7. Apskaičiuota maksimalus laidumas, kuriam esant formuojasi išlydis ant izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus elektros srovės išdžiovinto plotelio, normaliomis sąlygomis ir kai tinkle yra įžemėjimas. Gauti rezultatai normaliomis sąlygomis 19,61 μS , o tinkle esant įžemėjimui 5,2 μS .
8. Nustatytas maksimalus laidumas, kuriam esant izoliatoriaus IO-10/3,75 užterštas paviršius gali būti pramuštas. Normaliomis sąlygomis 90,91 μS , o tinkle esant įžemėjimui 17,54 μS .
9. Apskaičiuota maksimalus laidumas, kuriam esant formuojasi išlydis ant izoliatoriaus ŠF-20 paviršiaus elektros srovės išdžiovinto plotelio, normaliomis sąlygomis ir kai tinkle yra įžemėjimas. Gauti rezultatai normaliomis sąlygomis 86,96 μS , o tinkle esant įžemėjimui 22,72 μS .
10. Nustatyta, kad įžemėjimas daro didelę įtaką išlydžių ant užteršto izoliatoriaus IO-10/3,75 paviršiaus formavimuisi, bet ant ŠF-20 izoliatoriaus paviršiaus išlydžių formavimąsi įtakoja tik esant ekstremaliam užterštumui.
11. Nustatytas maksimalus laidumas, kuriam esant izoliatoriaus IO-10/3,75 užterštas paviršius gali būti pramuštas. Normaliomis sąlygomis 714,29 μS , o tinkle esant įžemėjimui 142,86 μS .
12. Comsol Multiphysics baigtinių elementų programos pagalba sumodeliuoti elektrinio lauko ir potencialo pasiskirstymai su 3D izoliatorių modeliais.
13. Įvertinta galimybė formuotis vainikiniams išlydžiams kai tinklas dirba normaliu režimu ir kai tinkle yra įžemėjimas. Elektrinio lauko stipris padidėja, padidėjus įtampai, tačiau vainikinio išlydžio formavimosi sąlygai tenkinti, nei vienu atveju jo nepakako.

Literatūros sąrašas

1. Pillai P. Grounding and ground fault protection of multiple generator installations on medium-voltage industrial and commercial power systems II. Grounding methods. Charleston, USA 2003 [žiūrėta 2018-02-21]. Prieiga per internetą:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1216901&newsearch=true&queryText=Grounding%20and%20ground%20fault%20protection%20of%20multiple%20generator%20installations%20on%20medium->
2. Elektros įrenginių įrengimo bendrosios taisyklės [žiūrėta 2018-02-20]. Prieiga per internetą:
<https://www.e-tar.lt/portal/legalAct.html?documentId=TAR.6AF8895BD875>
3. Roberts, J. Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems. Pullman, USA 2001 [žiūrėta 2018-03-15]. Prieiga per internetą:
<https://cdn.selinc.com//assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6123.pdf?v=20151125-104914>
4. ESO Avarių ir technologinių sutrikimų likvidavimo instrukcija.
5. Baublys J.; Jankauskas P.; Markevičius L.; Morkvėnas A. Izoliacija ir viršįtampiai. Kaunas 2008
6. Lan L.; Gorur R. S. Computation of ac Wet Flashover Voltage of Ceramic and Composite Insulators. Tempe, USA, 2008 [žiūrėta 2018-03-22] Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4656243>
7. Salem A. A.; Rahman R. A.; Kamarudin M. S.; Othman N. A. Factors and models of pollution flashover on high voltage outdoor insulators: review. Kuala Lumpur, Malaysia, 2017 [žiūrėta 2018-03-22] Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8262491>
Venkataraman S.; Gorur R. S. Prediction of Flashover Voltage of Non-ceramic Insulators Under Contaminated Conditions. Tempe, USA, 2006 [žiūrėta 2018-04-10] Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1667747>
8. Peek, F. W. Dielectric phenomena in high-voltage engineering. University of Michigan, USA 1929. [žiūrėta 2018-04-12] Prieiga per internetą:
<https://archive.org/details/dielectricpheno00peekgoog>
Lee L.; Yunpeng J.; Ming L.; Zehiui L.; Kui H.; Zhe L. Study on the difference of chemical composition of insulator contamination on UHV-AC and -DC transmission lines. The institution of Engineering and Technology, 2017. [žiūrėta 2018-04-12] Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8249970>
11. Chuyan Z.; Junyi H.; Jianchao L.; Dong L.; Liming W.; Ming L.; Experimental study on the contamination deposition characteristics of insulators in a fog-haze environment. The institution of Engineering and Technology, 2017. [žiūrėta 2018-04-12] Prieiga per internetą:
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8281306>
12. Montoya G.; Ramirez I.; Montoya J. Correlation among ESDD, NSDD and leakage current In distribution insulators. IET 2004 [žiūrėta 2018-04-18] Prieiga per internetą:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1306702>

14. Nabavi S.; Gholami A.; Kazemi A.; Masoum M. Evaluation of Leakage Current Measurement for Site Pollution Severity Assessment. Tehran, Iran, 2007

15. Waters R.; Haddad A.; Griffiths H.; Harid N.; Sarkar P. Partial-arc and Spark Models of the Flashover of Lightly Polluted Insulators. Cardiff, UK, 2010 [žiūrėta 2018-04-25] Prieiga per internetą:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5448096>

16. <https://www.viltesa.lt/produktas/elektros-valdymo-ir-kontroles-iranga/saugikliai-saugikliu-blokai-izoliatoriai/izoliatoriai/atraminis-izoliatorius-io-10375-3344/> [žiūrėta 2018-02-10]

17. Phillips D.; Olsen R.; Pedrow P. Corona Onset as a Design Optimization Criterion for High Voltage Hardware. Pullman, USA, 2000 [žiūrėta 2018-03-10] Prieiga per internetą:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=891984>

18. Claverie P. Predetermination of the behavior of polluted insulators. Paris, France 1971 [žiūrėta 2018-05-02] Prieiga per internetą:

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4074540>