



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Vilius Valantinas

**ORO LINIJŲ IZOLIACIJOS UŽTERŠTUMO ĮTAKOS
ATSPARUMUI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**ORO LINIJŲ IZOLIACIJOS UŽTERŠTUMO ĮTAKOS
ATSPARUMUI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (621H63005)

Vadovas

Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas
2017 06 05

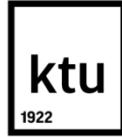
Recenzentas

Lekt. dr. Povilas Valatka
2017 06 05

Projektą atliko

Vilius Valantinas
2017 06 05

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Vilius Valantinas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemų programa, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Oro linijų izoliacijos užterštumo įtakos atsparumui tyrimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. Birželio 5 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Viliaus Valantino** baigiamasis projektas tema „Oro linijų izoliacijos užterštumo įtakos atsparumui 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)

Valantinas, Vilius. Oro linijų izoliacijos užterštumo įtakos atsparumui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Alfonsas Morkvėnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, elektros energetikos sistemų katedra.

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

Reikšminiai žodžiai: *oro linija; izoliatorius; žaibas; trumpoji impulsinė banga; atsparumas.*

Kaunas, 2017. 42 p.

SANTRAUKA

Viena iš svarbių elektros perdavimo linijų sudedamųjų dalių yra izoliatoriai. Dauguma Lietuvoje eksploatuojamų perdavimo linijų yra orinės, tad jas veikia atmosferiniai reiškiniai – žaibai, lietus, dulkės ir žmonių veikla – įvairūs teršalai išmetami automobilių, pramonės. Šiame darbe tiriamas linijinių izoliatorių elektrinis atsparumas veikiant trumposioms $2\mu\text{s}$ impulsinėms bangoms atsiradusioms dėl žaibo išlydžio į liniją. Tiriama kaip kinta izoliatorių elektrinis atsparumas kai jie padengti įvairiais teršalais, kai nešvarūs izoliatoriai sudrėksta ir kai izoliatoriai yra švarūs. Visais šiais atvejais bandoma imituoti realias izoliatorių darbo aplinkos sąlygas.

Valantinas, Vilius. Research of Contamination Effect of Overhead Lines Insulation on Resistance: *Master's thesis in title qualification degree* / supervisor assoc. prof. Alfonsas Morkvėnas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power System.

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

Key words: *overhead line; isolator; lightning; short impulse wave; resistance.*

Kaunas, 2017. 42 p.

SUMMARY

One of a few very important components of power transmission line is isolator. Majority of power transmission lines in Lithuania are overhead lines. As a result, they are affected by atmospheric phenomena like lightning, rain, dust and remains of human activity - car and factory emission. Resistance of overheadline insulators on short $2\mu\text{s}$ impulse after lightning strike to a transmission line is being researched in this thesis. Electrical resistance changes of isolators is also being researched under different circumstances like when they are covered in various contaminants, when dirty isolators get moist and when the isolators are completely clean. All these cases are tested in order to replicate realistic conditions of working with isolators.

TURINYS

SANTRUMPOS	7
ĮVADAS	8
1. IZOLIATORIŲ UŽTERŠTUMAS	9
1.1. Izoliatorių teršalų pobūdis	9
1.2. Izoliatorių užteršimo lygiai.....	10
1.3. Izoliatorių tyrimų metodai	10
1.3.1. Nanomedžiagų naudojimas	11
1.3.2. Teršalų išsidėstymo įtaka	12
1.3.3. Druskos nuosėdų įtaka atsparumui	13
2. ŽAIBO ELEKTROMAGETINĖ BANGA.....	17
2.1. Žaibo išlydžio formavimasis.....	17
2.2. Žaibo charakteristika	19
2.3. Žaibo išlydis į liniją.....	20
2.4. Žaibo bangos sklidimas linijoje	22
2.5. Trumpoji banga.....	23
3. TYRIMAS	25
3.1. Bandymų stendas	25
3.2. Tiriamieji objektai.....	27
3.3. Tyrimo rezultatai.....	32
3.3.1. Užterštų izoliatorių tyrimo rezultatai	32
3.3.2. Nuvalytų izoliatorių tyrimo rezultatai.....	34
3.3.3. Rezultatų palyginimas	35
IŠVADOS	40
LITERATŪRA.....	42

SANTRUMPOS

ESDD – druskos nuosėdų tankio ekvivalentas

NSDD – netirpių medžiagų tankio ekvivalentas

IVADAS

Šiuolaikinę elektros energetikos sistemą sudaro keturi komponentai – generavimo šaltiniai, perdavimo tinklas, skirstymo tinklas, vartotojai. Lietuvoje didžioji dalis elektros energijos perduodama oro linijomis. Viena iš pagrindinių oro linijų sudedamųjų dalių – izoliatoriai.

Izoliatoriai atlieka dvi funkcijas – laiko laidininkus ir, tuo pačiu, izoliuoja juos nuo ryši su žeme turinčių geležinių dalių. Priklausomai nuo geografinės padėties ir aplinkos, ant izoliatorių paviršių kaupiasi įvairūs teršalai. Dėl ant izoliatorių paviršių nusėdusių teršalų ir drėgmės ar lietaus, kinta izoliatorių elektrinis atsparumas. Taip pat į elektros perdavimo linijas (laidininkus, atramas, žaibosaugos trosus) trenkia žaibai, dėl ko susidaro pavojingi viršįtampiai, dėl kurių gali tekti trumpam išjungti liniją. Šiame darbe bus tiriamas užterštų ir švarių izoliatorių elektrinis atsparumas žaibo sukeltai trumpajai elektromagnetinei bangai.

Darbo tikslas – ištirti linijų izoliatorių elektrinį atsparumą veikiant trumpiesiems žaibo išlydžiams.

Uždaviniai tikslui pasiekti:

1. Izoliatorių atsparumo impulsinei įtampai charakteristikų analizė.
2. Eksperimento eigos planavimas ir schemos paruošimas.
3. Atsparumo trumpiesiems impulsams tyrimas su eksploatacijoje buvusiais izoliatoriais.
4. Atsparumo trumpiesiems impulsams tyrimas su eksploatacijoje buvusiais nuplautais izoliatoriais.
5. Atsparumo trumpiesiems impulsams tyrimas su eksploatacijoje buvusiais sudrėkintais izoliatoriais.
6. Lyginamoji analizė.

Literatūros analizė, darbo tikslas ir uždaviniai komisijai pristatyti trečiojo semestro metu.

Komisija supažindinta su tyrimo metodais ir gautais rezultatais trečiojo semestro sesijos metu.

1. IZOLIATORIŲ UŽTERŠTUMAS

1.1. Izoliatorių teršalų pobūdis

Autoriai teršalus ant izoliatorių įvardina kaip vieną iš pagrindinių problemų. Teršalai nusėda ant izoliatorių, sudrėksta ir taip sudaro laidų sluoksnį. Dėl tos priežasties sumažėja izoliatoriaus paviršiaus varža, dėl ko padidėja pramušimo tikimybė. Išskiriami užterštumo kontrolės metodai: užterštumo lygio matavimas ir užterštumo geografinių zonų sudarymas; izoliatorių užterštumo lygio stebėjimas ir plovimas; lyginti skirtingų (forma, ilgis, medžiaga) izoliatorių galimybes dirbti užterštoje aplinkoje.

Sąlygos, kuomet įvyksta izoliacijos pramušimas: teršalai, kurių pagrindinis nešėjas vėjas, nusėda ant izoliatorių ir sudaro teršalų sluoksnį; teršalų sluoksnis sušlampa ir pasidaro laidus; sluoksnis džiūsta, didėja laidumas ir nuotėkio srovės; atsiranda strimeriai dėl šylančio izoliatoriaus paviršiaus; atsiranda girdimi daliniai išlydžiai; galų gale įvyksta pramušimas.

Pagrindiniai teršalai ir jų kilmė: druska (pajūrio zonos, druskos kasyklos, automobilių keliai); cementas (cemento gamyklos, statybvietės, karjerai); žemės (dirbami laukai); trąšos (tręšiami laukai, trąšų gamyklos); metalai (mineralų kasyklos, perdirbimo gamyklos); anglis (anglių kasyklos, šiluminės elektrinės, plytų gamyklos); vulkaniniai pelenai; paukščių išmatos; chemija (pramoniniai rajonai); smogas (tinklų sankirtos su greitkeliais, tinklų sankirtos su geležinkelio bėgiais); dūmai (gamtos gaisrai, pramoniniai rajonai).

Išskiriami trys pagrindiniai užterštumo tipai: pramoninis, jūrinis, dykumų. Tinkamiausias būdas prižiūrėti izoliatorius pramoniniuose rajonuose – stebėti nuotėkio srovių dydį atsižvelgiant į laiką. Susiejus išlydžio stovių dydį su metų laiku, lietaus gausa, galima spręsti, ar izoliatoriams pakanka savaiminio valymosi, ar reikalingas papildomas. Šis būdas taikomas dėl to, jog nuotėkio srovės amplitudė tiesiogiai susijusi su pramušimo tikimybe.

Jūrinuose regionuose didžiausią taršos dalį sudaro druska. Druskos sluoksnis neblogina izoliatorių paviršių elektrinių savybių, kol nesušlampa ir netampa laidžiu. Sluoksnio laidumas priklauso nuo druskos tipo. Užterštumo lygis gali būti nustatomas matuojant druskos nuosėdų tankio ekvivalentą (ESDD). Tam reikalingi penki parametrai: temperatūra, drėgmė, slėgis, lietus ir vėjo greitis. Atlikus šį matavimą sprendžiama, ar reikalingas papildomas izoliatorių plovimas. Pastebėta, jog kartais jūrinių teršalų randama regionuose, kurie yra pakankamai toli (~80km) nuo jūros.

Dykumų regionuose ant izoliatorių nusėda dideli kiekiai dulkių. Taip pat daug žalos gali pradaryti stiprūs vėjai ir smėlio audros, kuomet dideliu greičiu lekiančios dalelės atsitrenkia į izoliatorių ir negrįžtamai suardo jo paviršių. [1]

Norint kuo labiau sumažinti teršalų įtaką reikia: parinkti tinkamo tipo izoliatorius; juos prižiūrėti; pašalinti teršalų šaltinius.

1.2. Izoliatorių užteršimo lygiai

Išlydis užterštuose aukštos įtampos izoliatoriuose yra viena didžiausių perdavimo tinklo problemų. Taip yra todėl, kadangi sudėtinga sumodeliuoti įvairių formų izoliatorius, nevienodą užterštumo lygį skirtinguose regionuose, nevienodų teršalų įvairių pasiskirstymą ant izoliatorių paviršiaus, drėgmės įtaką. Straipsnio autoriai užterštumo lygį, priklausomai nuo aplinkos, kurioje yra izoliatorius, skirsto į keturias dalis:

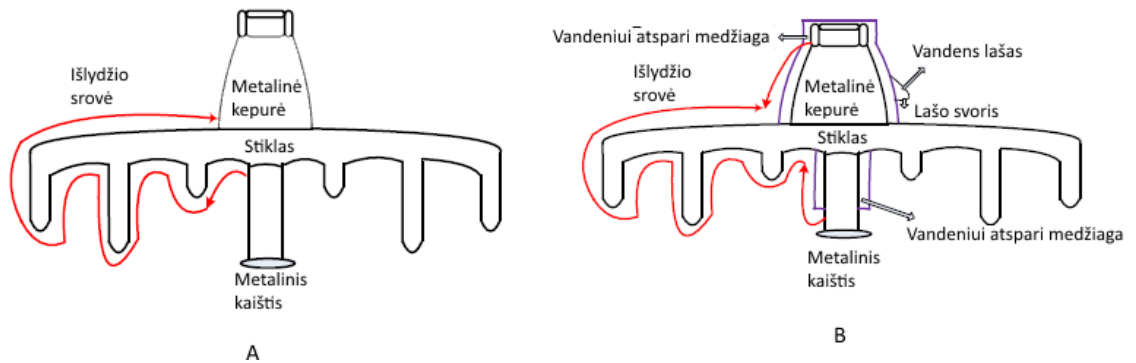
- Lengvas – vietovės, kuriose visai nėra, arba yra nedaug pramonės; retai apgyvendintos vietovės; kalnų vietovės; jūra turėtų būti bent 10-20km atstumu, be to neturėtų būt tiesioginio vėjo iš jūros pusės;
- Vidutinis – vietovės, kuriose esanti pramonė neišmeta kenksmingų teršalų į aplinką; vidutiniškai ar tankiai apgyvendintos vietovės, kuriose vyrauja vėjai, lietus; jūra turėtų būti bent kelių kilometrų atstumu;
- Sunkus – vietovės, kuriose daug pramonės ir gyvenamųjų namų, turinčių dūmus išmetančių šildymo elementų; vietovės esančios šalia jūros, kuriose vyrauja vėjai nuo jūros pusės;
- Labai sunkus - vietovės, kuriose yra dideli pramonės centrai išmetantys teršalus į atmosferą; vietovės esančios šalia jūros, kuriose vyrauja stiprus, teršalus nešantis vėjas iš jūros pusės; smėlingos vietovės, kuriose retai lyja, stiprūs vėjai neša druskos ir smėlio daleles.

1.3. Izoliatorių tyrimų metodai

Anksčiau buvo bandymų kurti įvairius statinius ir dinامينius modelius, kurie padėtų išspręsti šią problemą. Šiuo atveju pristatomas dinaminis lanko modelis. Jame izoliatorius padalinamas yra trikampes dalis, tada naudojamas baigtinių elementų metodas (FEM) ir, galiausiai, apibrėžiamas potencialų pasiskirstymas izoliatoriaus paviršiuje, skirtingų varžų plotai ir išlydžių įtampa. Gauti rezultatai lyginami su rezultatais, gautais naudojant statinius modelius, atliekant eksperimentus, ar apskaičiuotus teoriškai. [2]

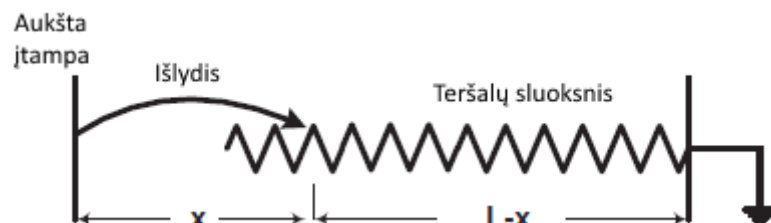
1.3.1. Nanomedžiagų naudojimas

Šiame straipsnyje aprašomas modelis, kurio pagalba skaičiuojama dalinių išlydžių įtampa ant stiklo bandinių, kurie padengti skirtingų charakteristikų nanomedžiagomis. Panaudojus šias medžiagas siekiama padidinti dalinių išlydžių įtampą, dėl to padidėtų bendra aukštos įtampos izoliatorių pramušimo įtampa. Naudojant šią technologiją padengiama tik izoliatoriaus geležinė dalis. 1.1 pav. pavaizduotas tokio pat tipo izoliatorius: A – specialiomis medžiagomis nepadengtas izoliatorius; B – izoliatoriaus metalinė kepurė ir metalinis kaištis padengtas specialiomis medžiagomis. Tyrinėjant šio metodo rezultatus pastebėta, jog naudojant RTV silikoninę gumą, pramušimo įtampa, vidutiniškai, padidėja 200%. Kitu atveju, padengus geležines konstrukcijos dalis plonu sluoksniu netiesinės charakteristikos nanomedžiaga, pramušimo įtampa, vidutiniškai, padidėja 235%.



1.1 pav. Tikėtinas išlydžio srovės kelias.

Pristatomas Obenau`'s modelis skirtas pramušimo įtampai skaičiuoti 1.2 pav. Šiuo modeliu gauti rezultatai yra artimi eksperimentiniams rezultatams. [3]



1.2 pav. Obenau`'s modelis skirtas skaičiuoti pramušimo įtampai.

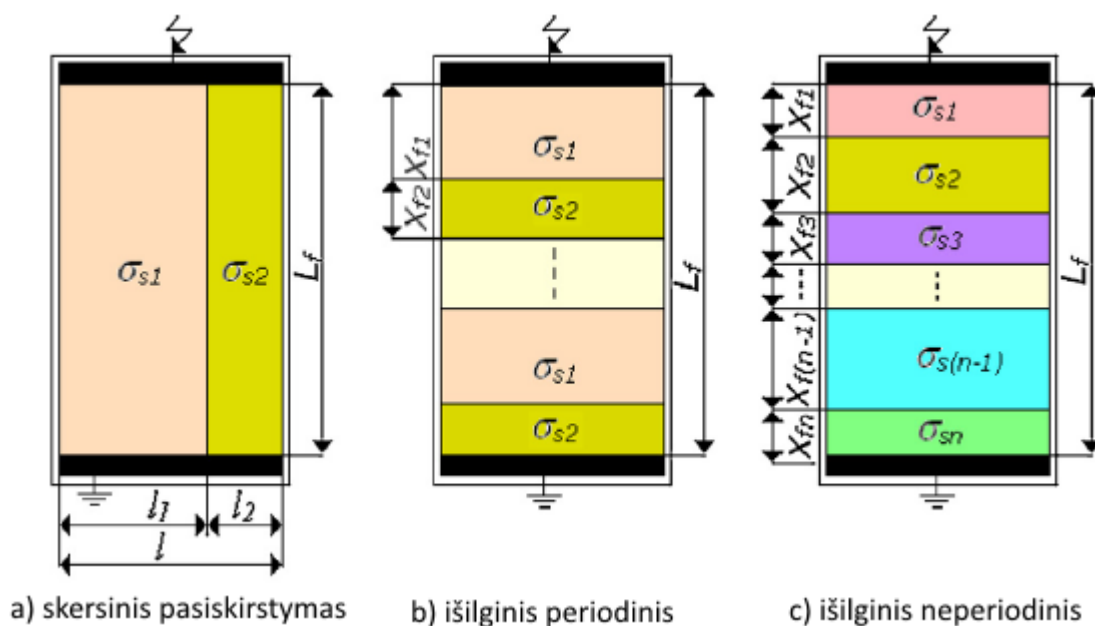
Šiame modelyje taršalų sluoksnio varža skaičiuojama:

$$R(x) = r_p(L - x) = \frac{L - x}{2\pi r - 2r_0} \frac{\rho}{d} \ln\left(\frac{\pi r}{r_0}\right) \quad (1)$$

Čia: ρ – bandymuose naudojamo vandens varža, d – vandens sluoksnio storis, r – izoliatoriaus metalinės kepurės spindulys, r_0 – išlydžio srovės spindulys.

1.3.2. Teršalų išsidėstymo įtaka

Šiame straipsnyje autoriai nagrinėja teršalų poveikį pramušimo įtampai, kuomet teršalai pasiskirstę įvairiais išsidėstymais. Buvo nagrinėjami trys nevienodo užterštumo pasiskirstymo atvejai: skersinis, išilginis periodinis ir išilginis neperiodinis 1.3 pav. Kiekviena teršalų sritis turi savąjį laidį σ_s . Būtent tokie atvejai pasirinkti neatsitiktinai. Tokios sąlygos dažnai sutinkamos ant izoliatorių, kurie įrengti netoli teršalų šaltinių ir regionuose, kuriuose vyrauja vėjai.



1.3 pav. Teršalų pasiskirstymo tipai.

Pirmuoju atveju izoliatoriaus pramušimo įtampa, kuomet užterštumas buvo skersinis ir nevienodas, buvo 21% aukštesnė lyginant su vienodu užterštumo pasiskirstymu. Tokiu atveju izoliatorius gali lengviau atlaikyti viršįtampius, lyginant su atveju, kuomet teršalai pasiskirstę vienodai.

Pramušimo įtampa izoliatoriaus, kurio paviršius padengtas išilgine periodine tarša, kuri sudaryta iš dviejų, skirtingų laidumų medžiagų, yra daugiausia 30% mažesnė lyginant su tuo

atveju, kai tarša pasiskirsčiusi vienodai. Trečiuoju atveju minimali pramušimo įtampa gaunama net 42% mažesnė lyginant su vienodu užterštumu. Laboratorijoje eksperimentiškai gauti duomenys rodo, jog mažiausia pramušimo įtampa gali būti susieta su trumpiausiu silpnai užterštos vietos nuotėkio srovės keliu izoliatoriaus paviršiumi, prieš pilnai jį pramušant. [4]

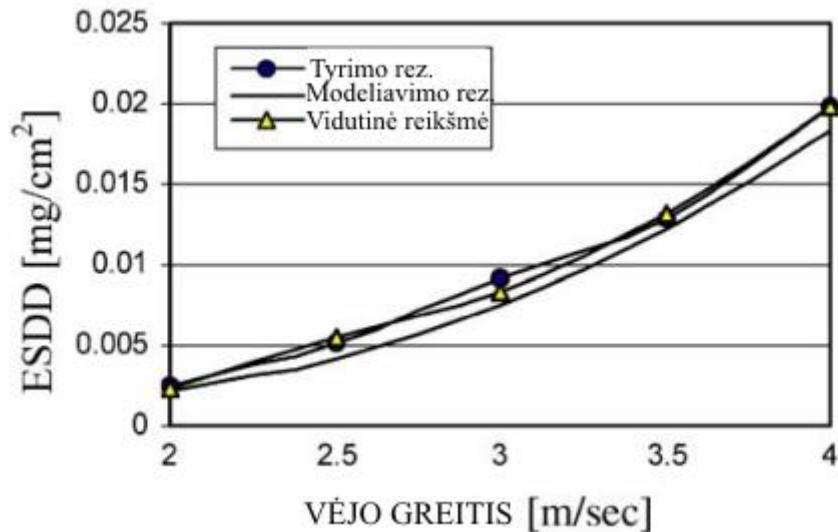
1.3.3. Druskos nuosėdų įtaka atsparumui

Šio straipsnio autoriai pabrėžia, jog net vieno izoliatoriaus gedimas gali sukelti didelių problemų, kaip, pavyzdžiui, linijos atjungimą. Patikimumas yra viena pagrindinių elektros energetikos užduočių. Renkant izoliatorių tipą ir kiekį, svarbu atsižvelgti ir į aplinkos parametrus. Šiuo atveju buvo tyrinėjamas teršalų kaupimasis ir natūralus jų plovimas skirtingų tipų izoliatoriams jūrinio klimato zonoje. Kaip užterštumo lygio matas buvo naudojamas druskos nuosėdų kiekio ekvivalentas (ESDD), kurio matas – mg/cm^2 . Druskos nuosėdų kiekio ekvivalentas apskaičiuojamas ištirpdant dalį teršalų tam tikrame kiekyje vandens ir išmatuojant tirpalo laidumą. Taip pat reikia įvertinti teršalų kiekį, temperatūrą. Išmatavus laidumą tirpalas buvo panaudotas antram testui – netirpių medžiagų tankiui (NSDD) nustatyti. Šis testas parodo kokie netirpūs teršalai nusėda ant izoliatorių. Testo metu tirpalas yra perleidžiamas per specialius filtrus. Po to filtrai džiovinami ir sveriami, taip sužinant koks kiekis ir kokių netirpių medžiagų yra teršaluose.

Didelės įtakos izoliatorių užterštumui turi lietus. Norint tiksliau įvertinti jo poveikį, matavimai buvo atlikti kelis kartus metuose. Pirmasis matavimas buvo atliktas po ilgo lietaus sezono. Šis matavimas parodo, kaip veikia savaiminio nusiplovimo efektas kiekvienam izoliatoriui. Buvo prieita prie išvados, jog druskos nuosėdų kiekio ekvivalentas (ESDD) po lietingo sezono buvo mažesnis, lyginant su matavimais atliktais sausuoju sezonu. Tačiau reikia įvertinti ir tai, jog svarbu ir lietaus stiprumas bei trukmė. Pastebėta, jog lengvas lietus ar dulksna tiesiog sudrėkina izoliatorių paviršių, taip jo nenuplaudamas, o padidindamas paviršiaus laidumą.

Kitas svarbus aspektas – temperatūra. Šie matavimai buvo atliekami teritorijoje, kurioje vidutinė temperatūra lietaus sezonu svyruoja nuo 13 iki 18°C, o sausuoju sezonu – nuo 25 iki 30°C. Būtent temperatūra turi didelę įtaką korozijos procesams ant izoliatorių paviršių, kadangi nuo jo priklauso izoliatoriaus paviršiaus džiovimo laikas ir teršalų klampa.

Taip pat reikia įvertinti ir drėgmę. Priklausomai nuo geografinės padėties, sezono, paros laiko, drėgmė nuolat kinta. Ji nusėda ant izoliatorių paviršių, suformuoja ploną, permatomą sluoksnį ir kondensuojasi, kai izoliatoriaus paviršiaus temperatūra nukrenta žemiau rasos susidarymo taško temperatūros.

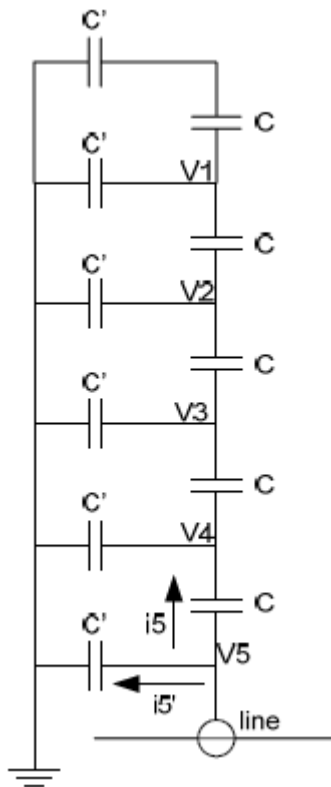


1.4 pav. ESDD priklausomybė nuo vėjo greičio.

Vėjo greitis bei kryptis irgi turi įtakos izoliatorių užterštumui. Šiuo atveju, kuomet matavimai atliekami jūrinio klimato zonoje, vėjas buvo druskos nešėju iš jūros. 1.4 pav. matyti, jog kuo didesnis vėjo greitis, tuo daugiau druskos nuosėdų buvo randama ant izoliatorių paviršiaus. Tačiau vėjo įtaka nėra vienareikšmiška, kadangi jis gali prisidėti ir prie savaiminio valymo efekto nupučiant teršalus nuo izoliatorių. [5]

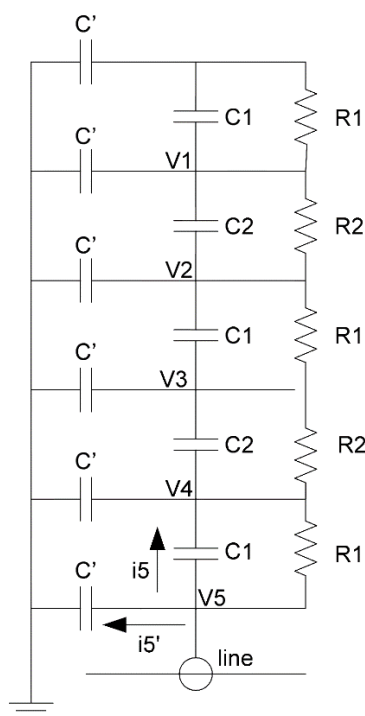
1.3.4. Įtampų pasiskirstymas girliandose

Straipsnio autoriai išskiria izoliatorius kaip ypatingai svarbią tinklų dalį, dėl kurios pažeidimų gali nutrūkti elektros energijos tiekimas. Izoliatorių pramušimo įtampos dydžiui didelės įtakos turi teršalai, kurie sudrėkę sudaro laidų sluoksnį ant izoliatorių paviršių. Taip pat svarbus aspektas – nevienodas įtampos pasiskirstymas izoliatorių girliandose. Pagrindinės išvados: lyginant su porcelianiniais, tokio paties tipo stikliniai izoliatoriai turi geresnes savybes kalbant apie teršalų poveikį; pramušimo įtampai užterštuose izoliatoriuose įtakos turi izoliatorių girliandos izoliatorių medžiaga, ir pačių izoliatorių forma.



1.5 pav. Švarių izoliatorių girliandos ekvivalentinė schema.

1.5 pav. pavaizduota izoliatorių girliandos ekvivalentinė schema. Joje matyti, kad kiekvienas izoliatorius turi savo talpumą - C , talpumą žemės atžvilgiu – C' , įtampos kritimą ties kiekvienu izoliatoriumi – V , nuotėkio srovės - I . Anot autorių, teršalai sumažina izoliatorių elektrinį atsparumą. Kuomet teršalai sudrėksta, izoliatoriaus paviršiaus atsparumas gali sumažėti iki 20%. Pagrindinis įvairaus tipo teršalų nešėjas – vėjas. Dėl susidariusio teršalų sluoksnio atsiranda nuotėkio srovės, kurios sumažina įtampos pasiskirstymo netolygumus izoliatorių girliandoje, tačiau tuo pačiu sumažėja girliandos elektrinis atsparumas.



1.6 pav. Užterštos izoliatorių girliandos ekvivalentinė schema.

1.6 pav. pavaizduota užterštų izoliatorių ekvivalentinė schema. Nuo švarių izoliatorių ekvivalentinės schemos ji skiriasi tuo, jog atsiranda teršalai, kurie vaizduojami kaip varžos – R. Straipsnyje taip pat nagrinėjamas ir nevienodas įtampų pasiskirstymas izoliatorių girliandoje. Iš gautų skaičiavimų matyti, jog įtampų pasiskirstymą tarp izoliatorių bėgų galima padaryti vienodesnį padidinant talpumų santykį (talpumo tarp izoliatoriaus ir laidininko santykis su talpumu tarp izoliatoriaus ir žemės). Yra nemažai būdų tai padaryti, tačiau dauguma jų yra brangūs ir neefektyvūs. Straipsnio autoriai kaip sprendimą siūlo pakeisti dalį izoliatorių. Kaip pavyzdžiui, pirmasis, o toliau kas antras, bėgų didesnio diametro, o likusieji – mažesnio. Taip pirmasis izoliatorius veiktų kaip skėtis ir dalinai apsaugotų žemiau esantį izoliatorių nuo lietaus ir teršalų. Taip pat labai svarbu, kad tokia konstrukcija padidintų talpumų santykį, kuris priklauso ir nuo izoliatorių dydžio. Šį talpumų santykį, priklausomai nuo geografinės padėties ir aplinkos ypatumų, bėgų galima reguliuoti keičiant izoliatorius. [6]

2. ŽAIBO ELEKTROMAGETINĖ BANGA

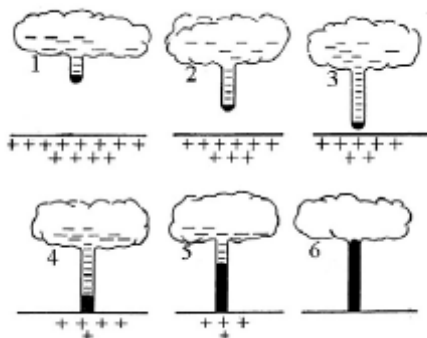
2.1. Žaibo išlydžio formavimasis

Žaibas – labai galingas, aukšto potencialo elektros energijos išlydis. Žaibo išlydžiai susidaro dėl skirtingų potencialų tarp krūvius turinčių debesų, tarp debesų ir žemės, pačiame debesyje.

Debesyje esantys atšalę vandens lašai, dėl žemės paviršiuje esančio įelektrinto oro, įsielektrina priešingais krūviais – teigiamu ir neigiamu.

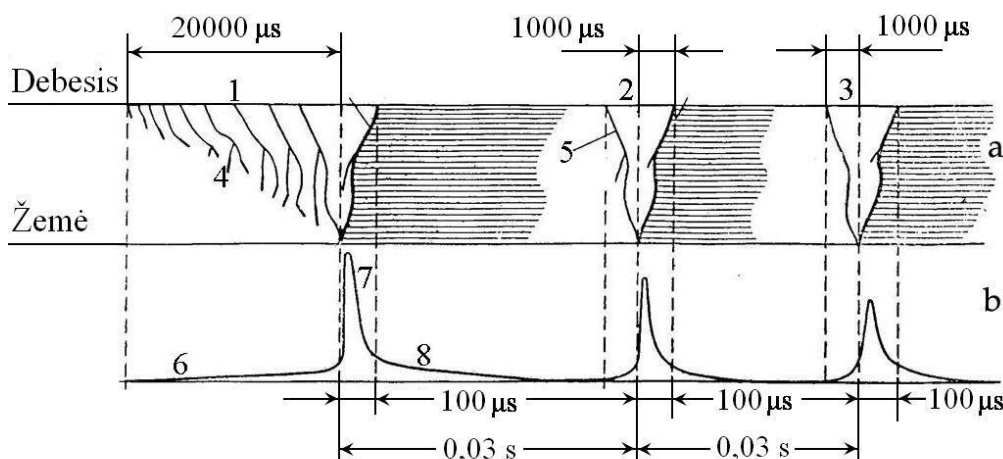
Žemės paviršiaus elektrinis laukas siekia maždaug 100 – 120 V/m. Kylant aukštyn nuo žemės paviršiaus, elektrinis oro laidumas, dėl didėjančio kiekio įelektrintų oro dalelių, didėja. Paskaičiuota, jog 80km aukštyje oro elektrinis laidumas yra maždaug 3×10^9 kartų didesnis nei žemės paviršiuje. Dėl to žemės rutulį su 80km aukštyje esančiu laidžiu sluoksniu galima vaizduoti kaip kondensatorių.

Maždaug 1 – 8km nuo žemės paviršiaus esantys vandens lašai poliarizuojasi: apatinėje dalyje susikaupia teigiamo krūvio, viršutinėje – neigiamo. Tačiau gali būti ir atvirkščiai. Nustatyta, jog elektros krūvių susidarymas debesyse tiesiogiai priklauso nuo šaltų vandens lašų ir ledo kristalų judėjimo. Ledo kristalai būna įelektrinti teigiamai, o krušos dalelės – neigiamai. Lengvesni ledo kristalai vėjo srovių pagalba pakyla į viršutinius debesų sluoksnius, o stambesni – į centrinę dalis. Vykstant tokiems procesams susiformuoja priešingų polių krūviai. Apatinė debesies dalis būna įelektrinta pagrinde neigiamai, o viršutinė – priešingai. Toks susidariusių krūvių pasiskirstymas debesyje nebūna tolygus. Elektriniam laukui pasiekus kritinę vertę, apie 25 – 30kV/cm, prasideda žemyn sklindantis išlydis.



2.1 pav. Žaibo lyderio formavimasis: 1, 2, 3 – pagr. stadijoje; 4, 5, 6 – pasiekus žemę.

Išlydis, pasiekęs žemės paviršiu, nušvinta. Taip yra dėl to, nes susidaro elektrinė grandinė, kuria teko didelė elektros srovė. Žaibo išlydžio kanalas gali būti iki kelių kilometrų ilgio. Žaibo išlydis susideda iš kelių impulsų. Kiekvienas iš impulsų sudarytas iš dviejų stadijų: pirminės (lyderio) ir antrinės (pagrindinio išlydžio). 2.2 pav. pavaizduotas žaibo išlydžio susidarymas. Iš pradžių lyderio kanalas būna trumpas, tačiau palaipsniui ilgėja kol galų gale pasiekia žemės paviršiu. Išlydžio trukmė apie 50 - 100 μ s.

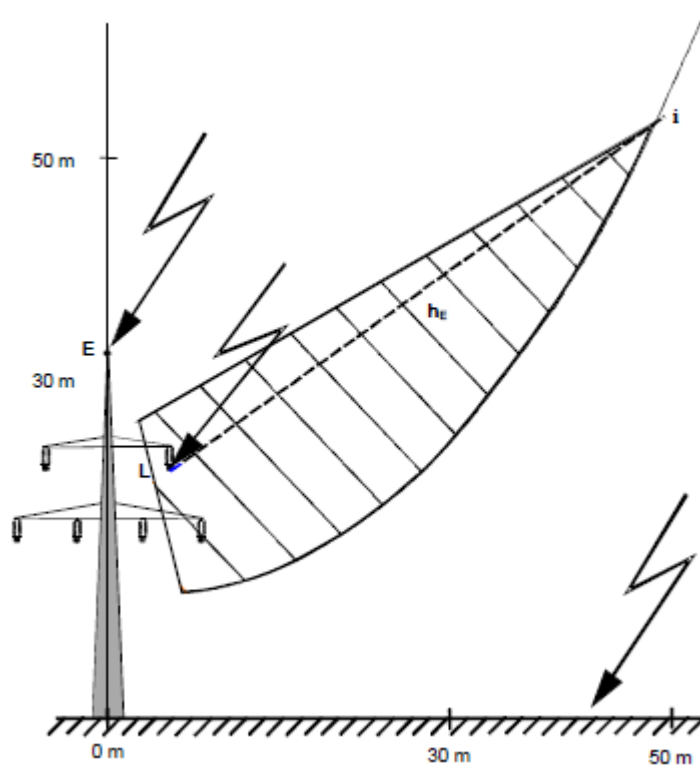


2.2 pav. Žaibo išlydžio susidarymo procesas: a – optinis vaizdas; b – impulsinės srovės pokytis.

2.2 pav. pavaizduotas žaibo išlydžio susidarymo procesas. 1, 2, 3 – impulsai, trunkantys tam tikrą laiko tarpą. 4 – trumpiausiu ir laidžiausiu keliu besiformuojantis laiptuoto lyderio kanalas, kurio trukmė – 20 000 μ s. 5 – strėlinis lyderis. 6 – lyderio srovė. 7 – pagrindinio išlydžio srovė. 8 – srovė pasibaigus švytėjimui.

Jeigu žaibo išlydis trenkia ne tiesiai į žemę, o kažkokį objektą žemės paviršiuje, tai lyderis renkasi trumpiausią kelią. Kelias dar gali būti sutrumpinamas dėl objekto geometrinių savybių. Kuo objektas, į kurį trenkia žaibas, smalesnis, tuo stipresnis teigiamų dalelių krūvis susidaro aplink smaigalį. Dėl to susidaro ilgesnis ir plonesnis lyderio kanalas nuo objekto. Abiejų lyderių kanalams susijungus susidaro laidus kanalas ir įvyksta žaibo išlydis. Dažniausiai žaibai pataiko į aukštesnius, mažą įžeminimo varžą turinčius objektus. Žaibo išlydis, priklausomai nuo krūvių poliarškumo žemės paviršiuje ir debesyse, gali būti teigiamas arba neigiamas.

Didžioji dalis žaibų būna neigiami. Taip yra dėl to, jog paprastai debesų apatinėje dalyje būna susikaupusios neigiamą krūvį turinčios dalelės, o žemės paviršius turi teigiamą krūvį. Daug rečiau, vos apie 5% visų atvejų žaibo išlydis būna teigiamas. Teigiamo žaibo išlydžio kanalo ilgis tęsiasi nuo viršutinių debesų sluoksnių, kur būna susikaupusios teigiamą krūvį turinčios dalelės, iki žemės paviršiaus, kur būna susikaupęs neigiamas elektrinis krūvis. Teigiamų žaibų išlydziai būna gerokai galingesni už neigiamų. [7]

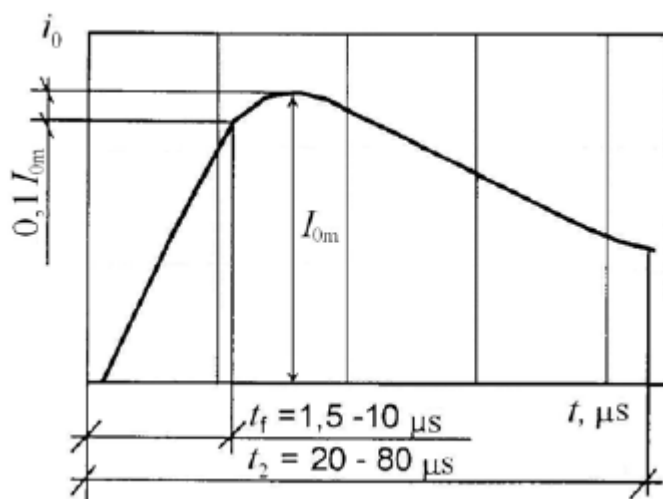


2.3 pav. Galimi žaibo išlydžiai.

2.3 pav. vaizduojami trys galimi žaibo išlydžio susidarymai. Žaibo kanalui formuojantis kairėje užbrūkšniuotos zonos pusėje, išlydis visuomet įvyks į su žeme sujungtą žaibosaugos trosą E. Jeigu išlydis formuojasi dešinėje užbrūkšniuotos zonos pusėje – išlydis įvyks tiesiai į žemę. Trečiuoju atveju, žaibui formuojantis užbrūkšniuotoje zonoje, bus didžiausia rizika, jog žaibas pataikys tiesiai į fazinį laidininką. [8]

2.2. Žaibo charakteristika

Žaibo srovės impulsai gamtoje būna įvairių formų, tačiau skaičiavimuose ir laboratoriniuose bandymuose naudojama standartinė impulsinės srovės forma.



2.4 pav. Impulsinės bangos parametrai: t_f – bangos fronto trukmė, μs ; t_2 – impulso trukmė, μs .

Pagrindiniai žaibo parametrai: srovės impulso amplitudė I_{0m} , srovės bangos fronto trukmė t_f (1,5 – 10 μs), viso impulso trukmė t_2 (20 - 100 μs). Žaibui pataikius į elektros perdavimo liniją, laidininke susidaro viršįtampis. Susidariusi impulsinė viršįtampio banga sklinda į abi puses nuo žaibo trenkimo vietos. Oro linijose sklindančių tokių bangų greitis yra artimas šviesos greičiui, o bangos sklidimo greitis priklauso nuo linijos banginės varžos.[7]

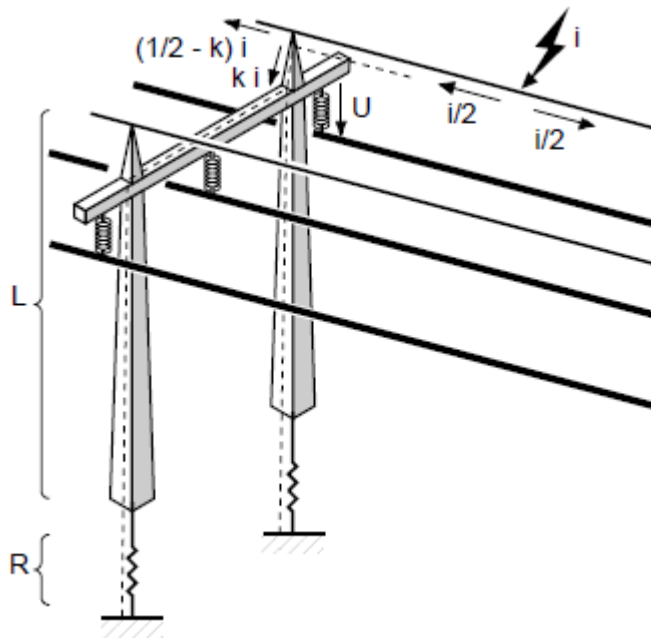
2.3. Žaibo išlydis į liniją

Žaibas – elektromagnetinė banga. Žaibo bangos srovės formai įtaką daro vietos, į kurią trenkė žaibas, varža. Tiriant šio proceso pereinamuosius vyksmus reikia atsižvelgti į įvykio vietą. Paprastai aukštos įtampos perdavimo tinklo linija susideda iš gelžbetoninės arba metalinės atramos, fazinių laidų ir žaibosaugos trosas. Galimi trys atvejai, kuomet žaibo išlydis į liniją ar jos dalis sukelia pereinamuosius procesus linijose:

- Žaibo išlydis į žaibosaugos trosą, po kurio impulsinė banga perdengia oro tarpą taip trosas ir fazinio laidininko;
- Žaibo išlydis į atramą, po kurio impulsinė banga perdengia izoliatorių girliandą;
- Žaibo išlydis į fazinį laidininką, po kurio impulsinė banga perdengia izoliatorių girliandą.

Žaibui pataikius į žaibosaugos trosą, impulsinės įtampos fronto trukmė būna proporcinga izoliatorių girliandos perdengimo trukmei. Tokios bangos forma – nupjautinė. Iš žaibo trenkimo vietos į abi puses pasklis elektromagnetinės bangos $i/2$. Dalis jų, dėl skirtingų banginių varžų ties

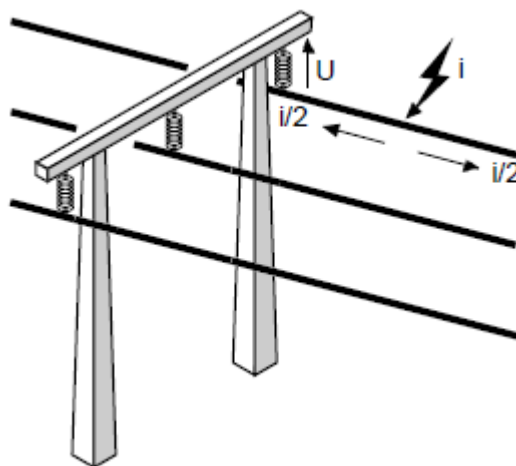
trošų sujungimais su atramomis, atsispindės ir grįš, kita dalis – nutekės į žemę per prie atramos prijungtą įžeminimo kontūrą. Dalis bangos sklis tolyn link kitos atramos. Impulso trukmė laikomas laiko tarpas, kol banga nusklinda ir atsispindėjusi grįžta.



2.5 pav. Žaibo išlydis į žaibosaugos trosą. [9]

Žaibui pataikius į atramą, jos atrama didės palaipsniui iki kol pasieks reikiamą vertę izoliatorių girliandai perdengti. Toks atramos įtampos didėjimas aiškinamas atspindžiais nuo įžeminimo kontūro. Laidininke susiformavusios bangos fronto trukmė bus proporcinga izoliatorių girliandos perdengimo trukmei.

Žaibui pataikius tiesiai į fazinį laidininką susiformuoja impulsinė banga, kurios fronto trukmė lygi žaibo srovės frontui, bangos forma – nupjautinė. Impulso trukmė – nuo žaibo išlydžio iki izoliatorių girliandos perdengimo. [10]



2.6 pav. Žaibo išlydis į fazinį laidininką. [9]

2.4. Žaibo bangos sklidimas linijoje



2.7 pav. Impulsinės bangos sklidimas linijoje.

2.7 pav. pavaizduotas žaibo impulsinės bangos sklidimas linija, kuri sudaryta iš dviejų, skirtingą banginę varžą turinčių, dalių. Banga, kurios potencialas φ_1 , sklinda linijos dalimi 1, kurios banginė varža – Z_1 . Taške A sklindanti banga pereina į kitą linijos dalį 2, kuri turi kitokią banginę varžą Z_2 . Taške A dalis sklindančios bangos atsispindi ir grįžta į liniją 1. Tai vadinama – atspindėtoji banga, kurios potencialas φ_1' . Kita bangos dalis toliau sklinda į linijos dalį 2. Tai vadinama – lūžusioji banga, kurios potencialas φ_1'' .

Potencialo pasiskirstymas užrašomas formule:

$$\varphi_1 + \varphi_1' = \varphi_1'' \quad (2)$$

Iš formulės galima daryti išvadą, jog atsispindėjusi banga sumažina pirminės impulsinės bangos potencialą φ_1 .

Atspindėtosios bangos potencialą galima apskaičiuoti:

$$\varphi_1' = \beta * \varphi_1 \quad (3)$$

β – atspindžio koeficientas, apskaičiuojamas:

$$\beta = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \quad (4)$$

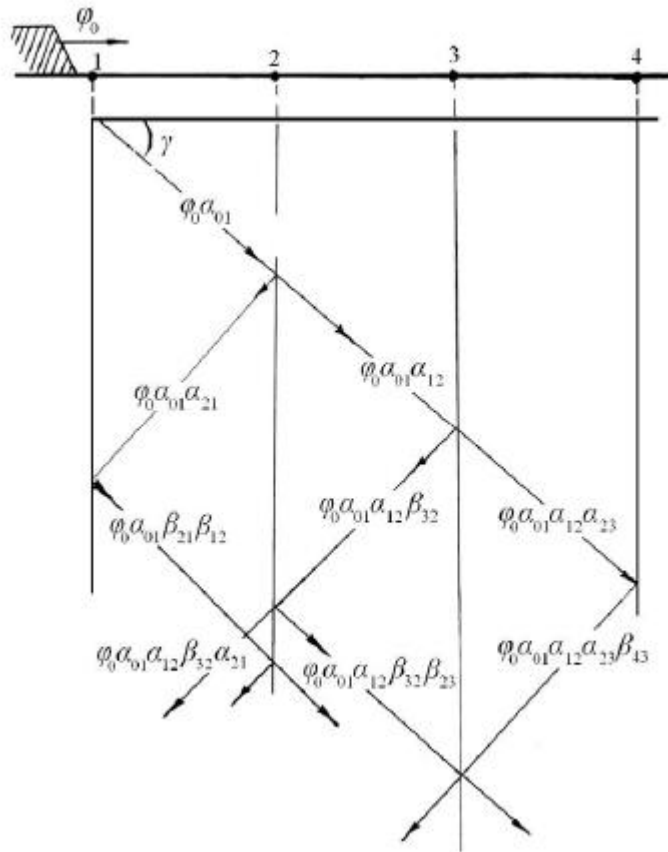
Lūžusios bangos potencialas apskaičiuojamas:

$$\varphi_1'' = \alpha * \varphi_1 \quad (5)$$

α – lūžio koeficientas, apskaičiuojamas:

$$\alpha = (2 * Z_2) / (Z_2 + Z_1) \quad (6)$$

Panašūs procesai vyksta ir linijose, kurios turi daugiau nei dvi skirtingų banginių varžų dalis 2.8 pav. Lūžtančių bangų potencialai vis mažėja, o atspindėtosios bangos vis atsispindi skirtingų linijos dalių susijungimo taškuose. [7]

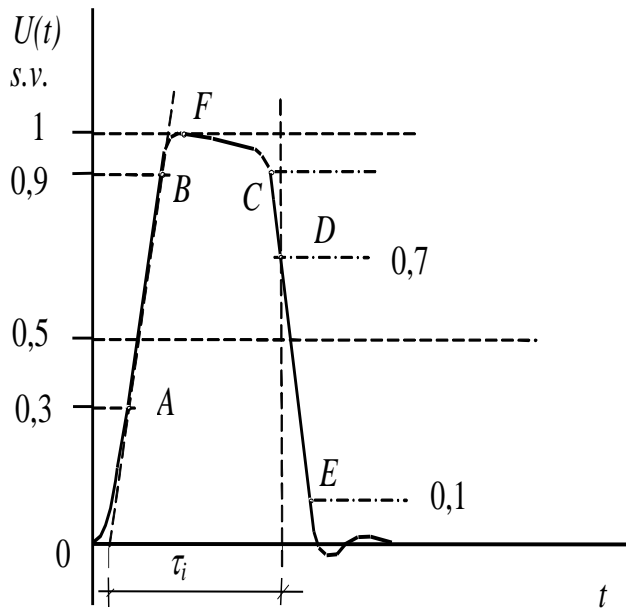


2.8 pav. Žaibo impulsinės bangos sklidimo grafinis vaizdas.

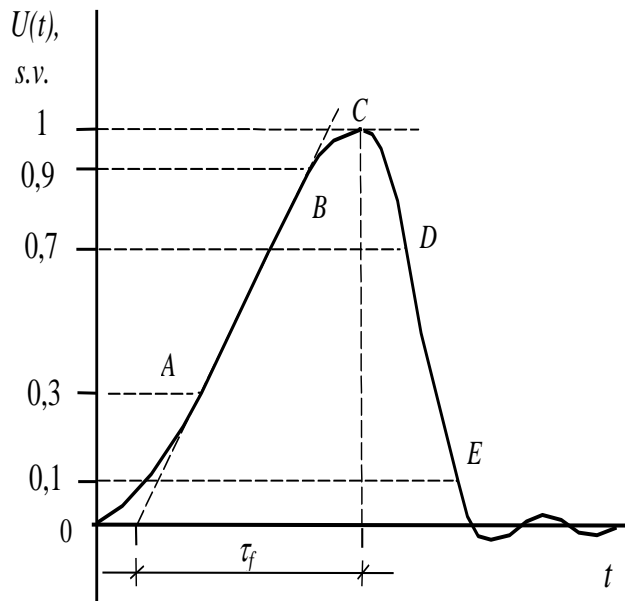
2.5. Trumpoji banga

Žaibui pataikius į perdavimo linijos žaibosaugos trosą jame susiformuoja impulsinė elektromagnetinė banga, pavaizduota. Ši banga nuo išlydžio vietos sklinda į abi puses. Šiai impulsinei bangai pasiekus atramą iškyla pavojus, jog bus pramuštas oro tarpas tarp atramos ir fazinio laidininko, kuris yra laikomas izoliatorių girliandos. Būtent perdengus tokį kibirkštinį oro tarpą laidininke susiformuoja ir, nuo perdengimo vietos, į abi puses sklinda trumpoji impulsinė elektromagnetinė banga, kurios frontas - $1,2\mu\text{s}$, pačio impulso ilgis – $2-4\mu\text{s}$.

Šios trumposios impulsinės bangos amplitudės dydis priklauso nuo to, kokio dydžio buvo pilnosios bangos amplitudė kibirkštinio tarpo pramušimo metu. Priklausomai nuo pilnosios bangos amplitudės dydžio, izoliatorių girliandos, oro tarpo elektrinio atsparumo, pramušimas gali įvykti bet kurioje bangos fazėje – fronte, slopstančioje dalyje.



2.9 pav. Pramušimas slopstančioje dalyje. [10]



2.10 pav. Pramušimas fronte. [10]

3. TYRIMAS

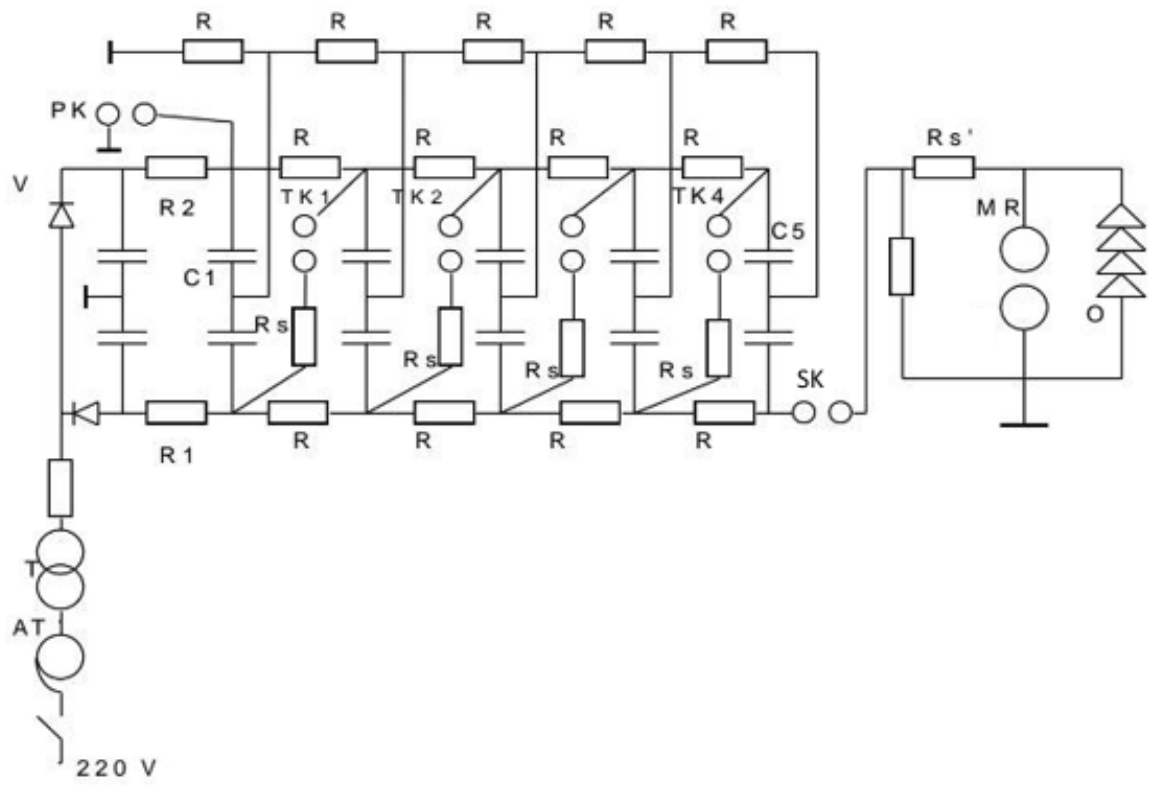
3.1. Bandymų stendas

Tyrimas atliekamas aukštųjų įtampų laboratorijoje. Bandymo metu imituojamas žaibo išlydis į perdavimo liniją. Po žaibo išlydžio susidariusi pilnoji impulsinė banga perdengusi kibirkštinį tarpą tampa trumpąja. Bandomajam impulsui gauti naudojamas impulsinis auštosios įtampos generatorius. Šiuo metodu tikrinamas pasirinkto objekto izoliacinis atsparumas trumpajai bangai.

Aukštosios įtampos impulsinio generatoriaus veikimas paremtas lygiagrečiai sujungtų ir įkrautų kondensatorių greitu persijungimu į nuoseklų tarpusavio jungimą. Suminės įtampos krūvis iškraunamas impulso formavimo grandinėje. Kondensatorių užkrovimo etape transformatorius T per ventilį V, apsaugines varžas R_1 ir R_2 bei užkrovimo varžas R įkrauna lygiagrečiai sujungtus kondensatorius. Varžos R_1 ir R_2 skirtos transformatoriaus ir ventilio apsaugai nuo perkrovų.

Kondensatorių iškrovimo procesas prasideda automatiškai tada, kai C_1 įtampa pasiekia kibirkštiklio PK iškrovos įtampą. Įvykus pramušimui PK tarpe, padidėja įtampa tarp rutulių TK_1 , dėl ko iškrova įvyksta ir tarp jų. Toliau iškrovos seka TK_2 , TK_3 ir likusiuose tarpuose. Įvykus iškrovoms visuose tarpuose, visi kondensatoriai būna sujungti nuosekliai ir mazge B_n potencialas pasidaro artimas dydžiui nU_0 . Čia n yra kondensatorių skaičius, o U_0 – kondensatorių įtampa išsikrovimo proceso pradžioje. Pramušus SK rutulių tarpą, kondensatoriai per impulso formavimo rezistorių r_s užkrauna tiriamąjį objektą O krūviu ligi impulso amplitudinės įtampos reikšmės. Iš pradžių pramušamas tarpas tarp rutulinių iškroviklių. Pramušimo vietoje susiformuoja trumpoji banga, kuri sklinda link tiriamojo objekto. Taip gaunamas trumpasis $2\mu s$ impulsas. Impulso bangos ilgį apsprendžia varžos r dydis, kadangi vėliau per šį rezistorių nuteka kondensatoriuose ir tiriamajame objekte susikaupęs krūvis. Varžos r_x slopina aukštesnių dažnių elektromagnetinius virpesius iškrovos grandinėje.

Rutuliniiais iškrovikliais trumposios bangos įtampą galima matuoti plačiose ribose. Išlydžio įtampos amplitudė priklauso nuo atstumo tarp rutulių, rutulių skersmens ir atmosferinių parametru (temperatūra, slėgis, drėgmė). Kuo didesnis tarpas tarp rutulių – tuo didesnė įtampos amplitudė. Nuo jo vidinės iškrovos įtampos priklauso kondensatorių įkrovimo įtampa. TK tarpai nustatomi didesni, kad jų iškrovos įtampa būtų didesnė už PK tarpo pramušimo įtampą. Kondensatorių išsikrovimo procesą apibūnantys parametrai: impulso fronto trukmė, impulso ilgis, amplitudė. [



3.1 pav. Impulsinės įtampos generatoriaus principinė schema.[11]



3.2 pav. Bandomasis objektas bandymų stende.

3.2. Tiriamieji objektai

Bandymams buvo naudojami šeši skirtingų tipo linijų izoliatoriai naudojami Lietuvos elektros perdavimo tinkle: PS70, PS6B, PSD70E, PSV120B, ПPSS120, Sediver 120. Eksploatacijoje naudoti izoliatoriai surinkti iš Vilniaus zonos, padengti įvairiais teršalais – gamtiniais, degėsiais. Kiekvienu atveju, bandant izoliatorių atsparumą trumpajai 2μs impulsinei bangai, buvo keičiama trumposios bangos amplitudė. Amplitudė keičiama reguliuojant tarpą tarp matavimo rutulių. Siekiant kuo tikslesnių rezultatų, atstumas tarp rutulių buvo keičiamas mažais žingsniais. Pasiėkus įtampos amplitudę, prie kurios kibirkščiavimas pereidavo į pilną pramušimą, atstumas tarp rutulių būdavo užfiksuojamas. Tuomet dar kelis kartus sugeneravus trumpąją bangą būdavo tikrinama ar rezultatas nėra atsitiktinis. Taip buvo randama ribinė įtampa. Bandymas laikomas pavykusių, kuomet užfiksavus atstumą tarp rutulių, iš keleto kartų maždaug pusė baigdavosi pramušimu trumpąja banga. 3.1 lentelėje pateikti gamintojų nurodomi pagrindiniai elektrinio izoliatorių atsparumo parametrai.

3.1 lentelė. Pagrindiniai izoliatorių atsparumo parametrai.

Eil. Nr.	Tipas	Sausų izoliatorių atsparumas prie 50Hz įtampos, kV	Šlapių izoliatorių atsparumas prie 50Hz įtampos, kV	Impulsinės bangos 1,2/50 μs, kV
1.	PS70	70	40	105
2.	PS6B	65	40	105
3.	PSD70E	85	45	110
4.	PSV120B	82	50	125
5.	PSS120	-	45	75
6.	Sediver 120	60	50	90

Izoliatorių gamintojai be įvairių mechaninių ir geometrinių izoliatorių savybių, kaip pagrindinius elektrinio atsparumo parametrus pateikia sausų izoliatorių atsparumą pramoninei 50Hz įtampai, šlapių (nuo lietaus) izoliatorių atsparumą pramoninei 50Hz įtampai ir izoliatorių elektrinį atsparumą pilnajai 1,2/50μs žaibo impulsinei bangai. Atsparumas pilnajai impulsinei bangai dažniausiai nurodomas tiek teigiamo, tiek neigiamo žaibo atvejais, kuris paprastai būna panašus.

Penki iš šešių bandymuose naudotų izoliatorių buvo rusiški, vienas – prancūziškas.

Kiekvienas izoliatorius buvo bandomas šešiais skirtingais atvejais:

- kai izoliatorius užterštas ir sausas;
- kai izoliatorius užterštas, o jo viršutinė dalis sudrėkinama distiliuotu vandeniu;
- kai izoliatorius užterštas, o jo viršutinė ir apatinė dalis sudrėkinama distiliuotu vandeniu;
- kai izoliatorius švarus, nuplauti distiliuotu vandeniu;
- kai izoliatorius švarus, o jo viršutinė dalis sudrėkinama distiliuotu vandeniu;
- kai izoliatorius švarus, o jo viršutinė ir apatinė dalis sudrėkinama distiliuotu vandeniu.

Bandymų metu distiliuotas vanduo naudojamas imituojuant gamtoje esančias sąlygas – lietu, rasą. Distiliuoto vandens sluoksnis ant izoliatorių paviršių sukuria pusiau laidų sluoksnį.



3.3 pav. Izoliatorius PS70, eil. Nr.1.



3.4 pav. Izolatorius PS6B, eil. Nr.2.

Standartinio tipo izoliatoriai. Dėl savo geometrinės formos nuotėkio srovės kelias yra pakankamai ilgas. Nevienodas apatinių briaunų aukštis užtikrina gerą savaiminį valymąsi lietaus ar vėjo pagalba. Šių izoliatorių nuotėkio srovės kelio ir tarpų tarp briaunų santykis – 2.2. Jie tinkami vietose, kuriose nėra didelio teršalų kiekio, kur ESDD neviršija 0.1 mg/cm^2 . [12]



3.5 pav. Izolatorius PSD70E, eil. Nr.3.

Išorinės briaunos tipo izoliatorius. Dėl išorėje esančios briaunos ypač padidinamas nuotėkio srovės kelias, tad šie izoliatoriai tinkamiausi darbui ypatingai užterštoje aplinkoje. Apačioje yra tik neaukšta briauna, dėl ko sumažėja teršalų kaupimasis bei pagerėja sąlygos savaiminiam valymuisi. [12]



3.6 pav. Izoliatorius PSV120B, eil. Nr.4.

Rūko tipo izoliatorius. Šio tipo izoliatoriai pasižymi dideliais tarpais tarp apatinių briaunų, dėl ko sumažėja galimybė atsirasti vainikiniams išlydžiams tarp jų. Šių izoliatorių nuotėkio srovės kelio ir tarpų tarp briaunų santykis – 3.2. Tikslingiausia izoliatorių panaudojimo vieta – jūrinė aplinka, taip pat vietovės, kuriose būtinas didesnis nuotėkio srovės kelias.[12]



3.7 pav. Izoliatorius PSS120, eil. Nr.5.

Sferinio tipo izoliatorius. Šio tipo izoliatorių nuotėkio srovės kelias panašus kaip standartinio tipo izoliatorių. Dėl sferinės formos ir apatinių briaunų nebuvo savaiminis valymas yra pakankamai efektyvus. [12]



3.8 pav. Izoliatorius Sediver 120, eil. Nr.6.

Atviro tipo izoliatorius. Tokių izoliatorių nuotėkio srovės kelio ir tarpų tarp briaunų santykis - 2.4. Juose nėra apatinių briaunų, tad apatinėje dalyje nesikaupia teršalai. Tokie izoliatoriai tinkami naudoti tiek kaminėse, tiek tarpinėse atramose. Ypatingai atsparūs dulkėtoms, dykumų tipo aplinkoms, kur vyrauja stiprūs vėjai, nėra lietaus. Taip pat, dėl savo matmenų, gali būti naudojami kaip skėtis žemiau esantiems kitų tipų girliandos izoliatoriams. [12]

3.3. Tyrimo rezultatai

3.3.1. Užterštų izoliatorių tyrimo rezultatai

3.2 lentelė. Rezultatų lentelė.

Nr.	Užteršti, sausi		Užteršti, sudrėkintas viršutinis paviršius		Užteršti, sudrėkinti abu paviršiai	
	cm	kV	cm	kV	cm	kV
1.	7,4	200	7,5	203	7,7	207
2.	7,35	198	7,4	200	-*	-*
3.	8,18	219	8,55	230	9	240
4.	8,39	226	8,7	233	9,2	245
5.	7,3	197	7,7	206	7,72	207
6.	7,75	209	7,85	214	8,35	224

* - izoliatoriai bandymų metu sudužo.

Atlikus eksperimentus gauti rezultatai pateikti 3.2 lentelėje. Pirmoji eksperimento dalis – ištirti eksploatacijoje buvusių, užterštų izoliatorių elektrinį atsparumą trumpajai bangai. Iš pradžių bandymai atliekami su užterštais, sausais izoliatoriais.

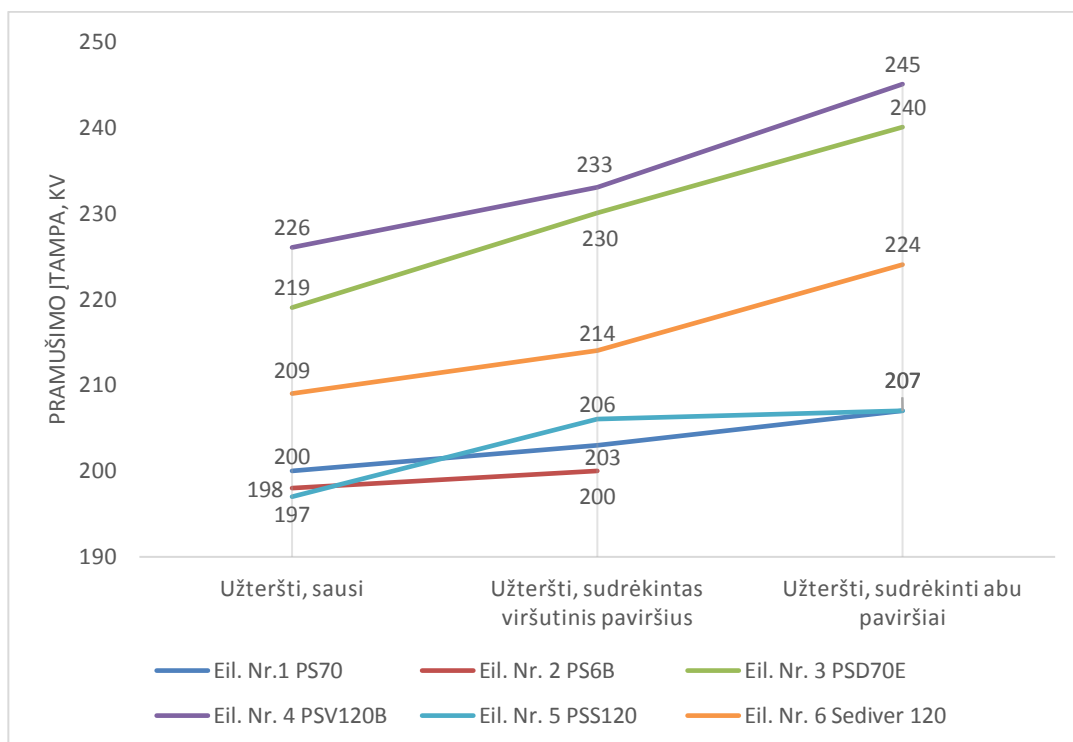
Kitas bandymų etapas – užterštų izoliatorių paviršiaus sušlapinimas distiliuotu vandeniu. Distiliuotas vanduo naudojamas imituojuant realias sąlygas, kuomet izoliatorius aplyjamas. Lietuje, kaip ir distiliuotame vandenyje, praktiškai nėra ištirpusių druskų, tad jo varža yra sąlyginai didelė. Sudrėkę teršalai ant izoliatoriaus paviršiaus sudaro pusiau laidų sluoksnį. Pakartojus bandymus paaiškėjo kaip pasikeičia izoliatorių elektrinis atsparumas trumpajai bangai. Visų šešių bandomųjų izoliatorių elektrinis atsparumas padidėjo 2 – 11kV. Toks atsparumo padidėjimas aiškinamas dėl pusiau laidaus sluoksnio izoliatoriaus paviršiuje. Dėl to elektrinis laukas tampa vienalytiškesnis, padidėja izoliatoriaus savitoji talpa.

Trečiasis etapas – distiliuotu vandeniu sušlapinamas ir užteršto izoliatoriaus apatinis paviršius, taip imituojuant rasos tašką. Elektrinis laukas, lyginant su antruoju bandymu, pasikeičia, atsiranda pusiau laidus sluoksnis ir apatinėje izoliatoriaus dalyje, padidėja talpumai. Atlikus bandymus šiomis sąlygomis galima pastebėti, jog penkių izoliatorių elektrinis atsparumas

trumpajai bangai dar labiau išaugo. Lyginant su antruoju bandymu, atsparumas padidėjo 1 – 12kv. Lyginant su pirmojo bandymo rezultatais, elektrinis atsparumas padidėjo 7 – 21kV. Verta pastebėti, jog trečiojo bandymo metu izoliatorius eil. Nr.2 sudužo. Galima priėti prie išvados, jog veikiant trumpajai bangai izoliatoriai patiria pavojingą mechaninį poveikį. Linijoje radus galimai žaibo pažeistą izoliatorių girliandą būtina apžiūrėti izoliatorių girliandas esančias gretimose atramose į abi puses. Nors trumpoji banga užgęsta maždaug po 2μs, tačiau to pakanka pasiekti gretimoms atramoms.



3.9 pav. Bandymų metu sudužę izoliatoriai.



3.10 pav. Užterštų izoliatorių atsparumas.

3.3.2. Nuvalytų izoliatorių tyrimo rezultatai

3.3 lentelė. Rezultatų lentelė.

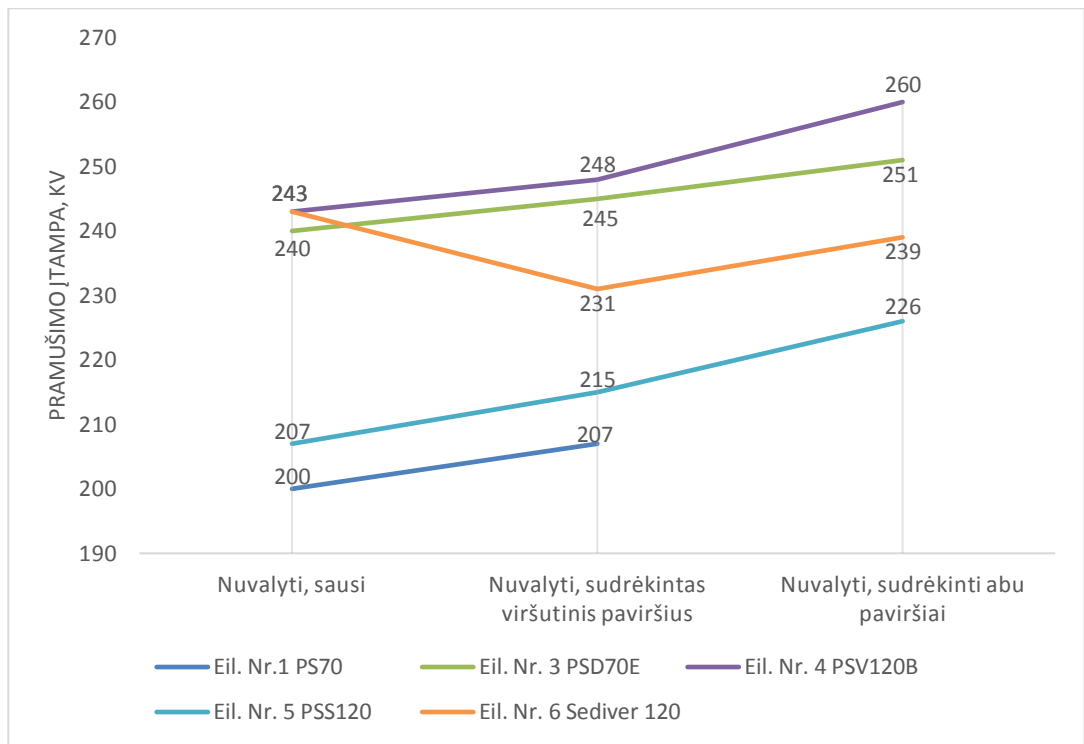
Nr.	Nuvalyti, sausi		Nuvalyti, sudrėkintas viršutinis paviršius		Nuvalyti, sudrėkinti abu paviršiai	
	cm	kV	cm	kV	cm	kV
1.	7,4	200	7,7*	207*	_*	_*
2.	_*	_*	_*	_*	_*	_*
3.	9	240	9,2	245	9,4	251
4.	9,1	243	9,3	248	9,75	260
5.	7,7	207	8	215	8,4	226
6.	9,1	243	8,6	231	8,9	239

* - izoliatoriai bandymų metu sudužo.

Ketvirtojo etapo metu izoliatoriai buvo švariai nuplauti distiliuotu vandeniu, taip pašalinant visus ant paviršių esančius nešvarumus. Po to buvo nustatomas švarių izoliatorių elektrinis atsparumas trumpajai bangai. Lyginant su užterštais izoliatoriais, švarių izoliatorių atsparumas trumpajai bangai padidėjo keturiais atvejais, o izoliatoriaus Nr.1 – nepakito. Atsparumo padidėjimą lėmė pusiau laidaus teršalų sluoksnio pašalinimas.

Penktojo etapo metu tirtas švarių izoliatorių elektrinis atsparumas trumpajai bangai imituojuant lietu, t. y. sušlapinus tik viršutinį paviršių. Visų penkių izoliatorių atsparumas, lyginant su užterštų izoliatorių atsparumu lietaus sąlygomis, padidėjo: nuo 4kV izoliatoriui Nr.1 iki 15kV izoliatoriui Nr.3. Lyginant su ketvirtuoju bandymu, beveik visų, išskyrus eil. Nr.6, izoliatorių elektrinis atsparumas trumpajai bangai padidėjo. Tai galima paaiškinti padidėjusia savitąja izoliatoriaus talpa dėl pusiau laidaus sluoksnio jo paviršiuje. Šio bandymo metu dar kartą įrodytas trumposios bangos mechaninis poveikis – bandymo neatlaikė izoliatorius Nr.1.

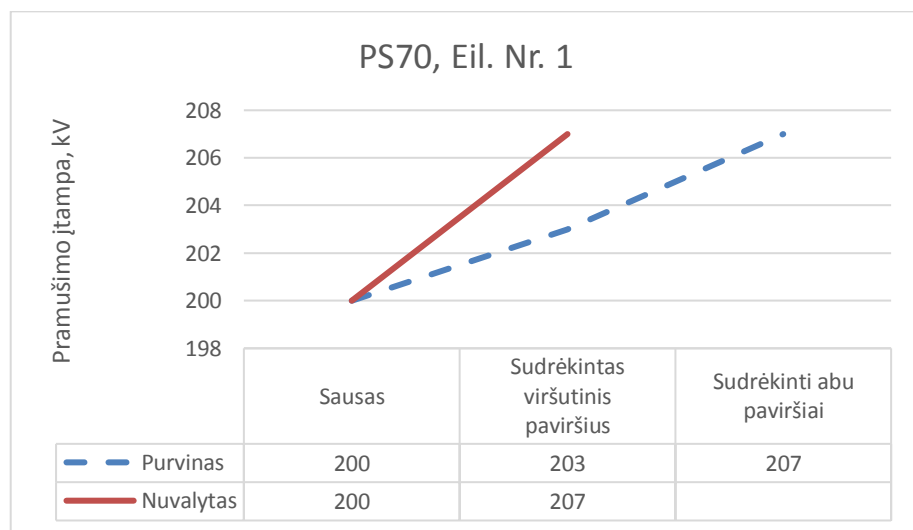
Šeštuoju bandymu buvo sušlapinami abu švarių izoliatorių paviršiai, taip imituojuant rasos tašką. Lyginant su trečiuoju bandymu, izoliatorių elektrinio atsparumo trumpajai bangai padidėjimas siekė 11 – 19kV. Taip pat pastebimas padidėjimas lyginant su penktuoju bandymu, kuomet sušlapinus viršutinį paviršių buvo imituojuama rasa. Padidėjimas siekė nuo 6kV izoliatoriui Nr.3 iki 12kV izoliatoriui Nr.4.



3.11 pav. Nuvalytų izoliatorių atsparumas.

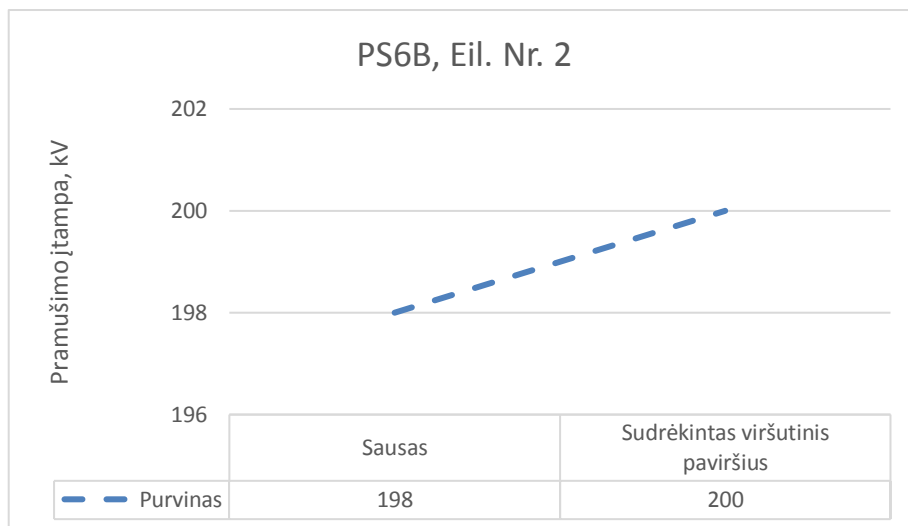
3.3.3. Rezultatų palyginimas

Atlikus bandymus su oro linijose eksploatuotais izoliatoriais, buvo nustatytas jų atsparumas trumpajai žaibo impulsinei bangai, kuri susiformuoja pilnosios žaibo impulsinės bangos kelyje atsiradus kibirkštiniam oro tarpui. Viso buvo bandomi šeši, skirtingų tipų aukštos įtampos perdavimo linijų izoliatoriai, naudoti Vilniaus regione.



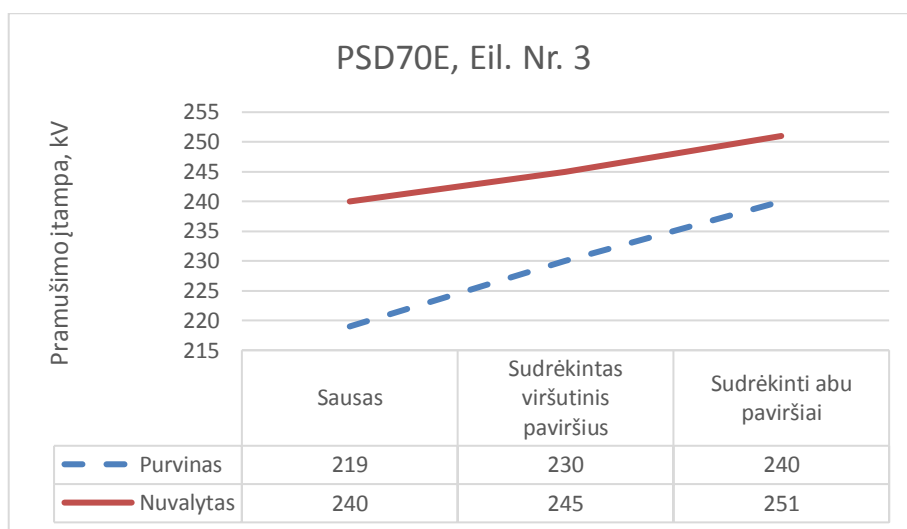
3.12 pav. Izoliatoriaus eil. Nr.1. atsparumas trumpajai impulsinei bangai.

Izoliatoriaus Nr.1 atsparumas pavaizduotas 3.12 pav. Lyginant bandymų rezultatus pastebėta, jog nepaisant susikaupusių teršalų, sauso izoliatoriaus atsparumas trumpajai bangai yra vienodas – 200kV. Sudrėkinus izoliatoriaus viršutinį paviršių distiliuotu vandeniu gaunami skirtingi rezultatai – nuvalyto izoliatoriaus elektrinis atsparumas išaugo 4kV. Atliekant bandymus su nuvalytu izoliatoriumi, kurio viršutinis paviršius buvo sušlapintas, izoliatorius neatlaikęs impulsinės įtampos sudužo. Galima prieiti prie išvados, jog veikiant trumpajai impulsinei bangai izoliatoriai patiria pavojingą mechaninę apkrovą, kuri visiškai sugadina izoliatorių.



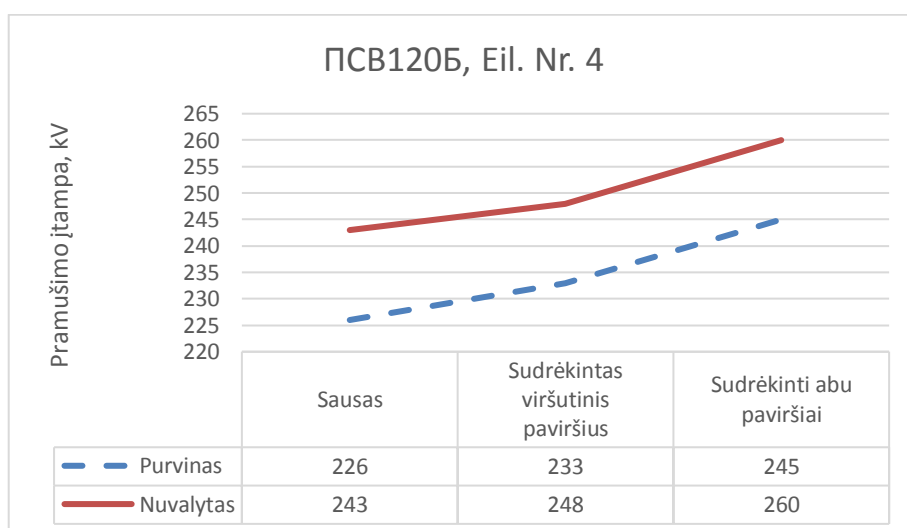
3.13 pav. Izoliatoriaus eil. Nr.2. atsparumas trumpajai impulsinei bangai.

Izoliatoriaus Nr.2 atsparumas pavaizduotas 3.13 pav. Pavyko nustatyti izoliatoriaus Nr.2 atsparumą trumpajai impulsinei žaibo bangai dvejais atvejais: purvinas izoliatorius sausu paviršiumi; purvinas izoliatorius šlapiu viršutiniu paviršiumi. Izoliatorius Nr.2 yra to paties, standartinio tipo, kaip ir izoliatorius Nr.1, tad rezultatuose matyti, jog judviejų atsparumas trumpajai impulsinei bangai vienodomis sąlygomis skiriasi vos keliais kilovoltais.



3.14 pav. Izoliatoriaus eil. Nr.3. atsparumas trumpajai impulsinei bangai.

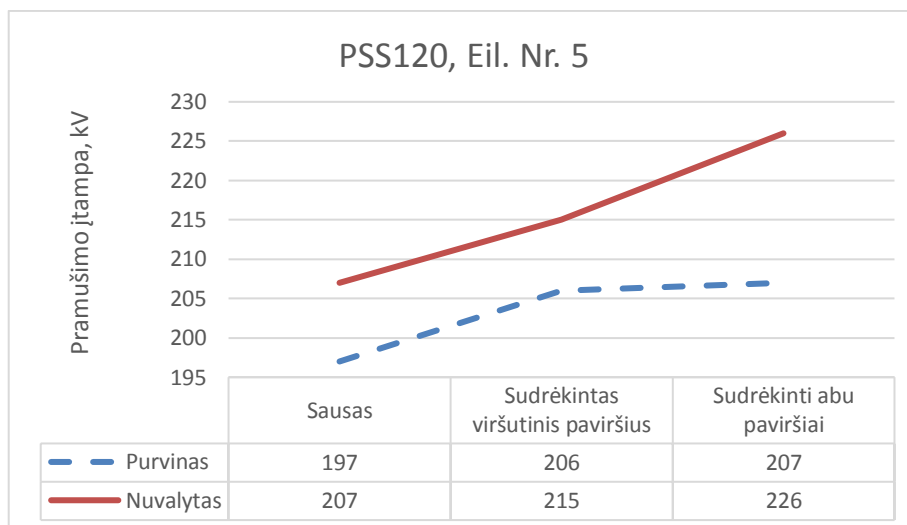
Izoliatoriaus Nr.3 atsparumas pavaizduotas 3.14 pav. Rezultatuose matyti, jog nuvalytas izoliatorius turi didesnę atsparumą trumpajai impulsinei bangai. Taip pat pastebima bendra tendencija, jog sušlapinant izoliatorių paviršius jų atsparumas padidėja. Esant sausam paviršiui, nuvalyto izoliatoriaus atsparumas siekia 240kV, ir yra 21kV didesnis už purvino izoliatoriaus atsparumą tokiomis pačiomis sąlygomis. Sudrėkinus viršutinį paviršių nuvalyto izoliatoriaus atsparumas siekia 245kV ir yra 15kV didesnis nei purvinojo. Trečiojo bandymo metu nustatymas izoliatoriaus atsparumas kuomet abu paviršiai yra sušlapinti – nuvalyto izoliatoriaus pramušimo įtampa yra 251kV, o purvinojo – 11kV žemesnė.



3.15 pav. Izoliatoriaus eil. Nr.4. atsparumas trumpajai impulsinei bangai.

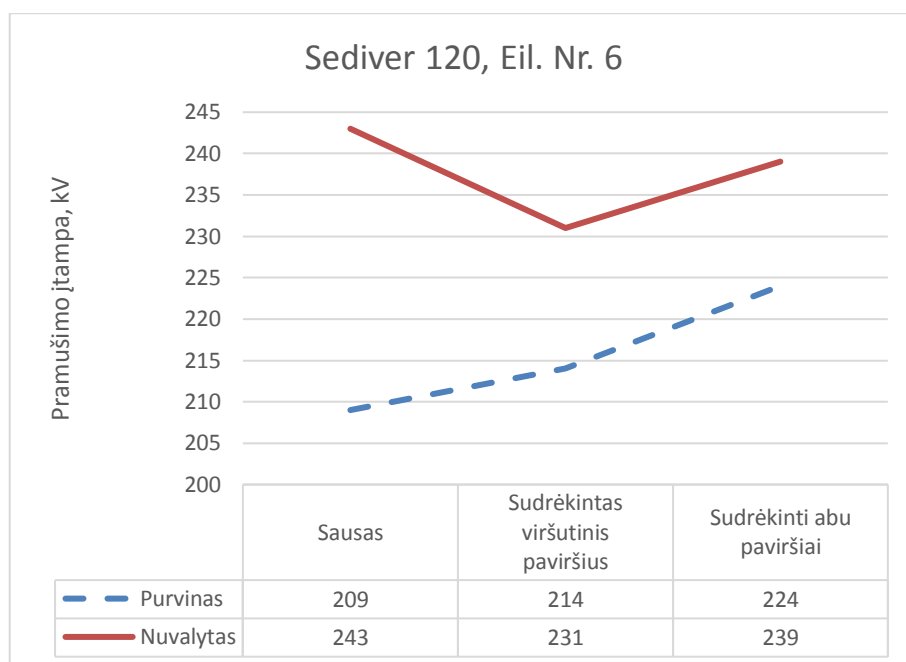
Izoliatoriaus Nr.4 atsparumas pavaizduotas 3.15 pav. Žvelgiant į rezultatus matyti, jog visais atvejais izoliatoriaus atsparumas trumpajai bangai yra didesnis, kuomet jo paviršiai yra nuvalyti.

Keičiant bandymų sąlygas skirtumas tarp nuvalyto ir purvino izoliatoriaus atsparumo kito nedaug – nuo 15 iki 17kV.



3.16 pav. Izoliatoriaus eil. Nr.5. atsparumas trumpajai impulsinei bangai.

Izoliatoriaus Nr.5 atsparumas pavaizduotas 3.16 pav. Rezultatuose matyti, jog nuvalyto izoliatoriaus elektrinis atsparumas trumpajai impulsinei bangai yra geresnis. Esant sausam izoliatoriaus paviršiui, purvino izoliatoriaus atsparumas siekė 197kV, o nuvalyto – 207kV. Sudrėkinus viršutinį paviršių ir pakarotojus bandymus matyti, jog bendras izoliatorių atsparumas, lyginant su pirmuoju bandymu, padidėjo 8-9kV. Ryškesnis atsparumo poveikis trumpajai impulsinei bangai pastebėtas bandymą atliekant trečią kartą - sušlapinus ir viršutinį, ir apatinį paviršių. Purvino izoliatoriaus atsparumas, lyginant su antruoju bandymu, padidėjo vos 1kV ir siekė 207kV, o nuvalytojo padidėjo labiau – nuo 215kV iki 226kV.



3.17 pav. Izoliatoriaus eil. Nr.6. atsparumas trumpajai impulsinei bangai.

Izoliatoriaus Nr.6 atsparumas pavaizduotas 3.17 pav. Atliekant bandymus skirtingomis sąlygomis su purvinu izoliatoriumi užfiksuotas tendencingas atsparumo trumpajai bangai didėjimas. Sudrėkinus viršutinį paviršių padidėjo 5kV, o sudrėkinus abu paviršius – dar 10kV.

Atliekant bandymus su nuvalytu izoliatoriumi Nr.6 pastebėtas elektrinio atsparumo trumpajai bangai sumažėjimas sušlapinus viršutinį paviršių. Atliekant trečiąjį bandymą, kuomet sušlapinami abu paviršiai, izoliatoriaus atsparumas padidėjo iki 231kV, tačiau vis dar nesiekė pradinės 241kV vertės.

IŠVADOS

1. Susipažinta su gamintojų pateikiama informacija apie izoliatorių elektrinio atsparumo parametrus. Prie pateikiamų parametrų pateikiamas atsparumas standartinei pilnajai impulsinei bangai – 1,2/50 μ s. Kai kuriuose kataloguose išskiriami atsparumai teigiamam ir neigiamam žaibo impulsui.
2. Buvo suplanuota atlikti tris bandymus: su sausu izoliatoriumi; imituojant lietų izoliatoriaus paviršių sušlapinti distiliuotu vandeniu; imituojant rasos tašką visą izoliatorių sušlapinti distiliuotu vandeniu. Paruoštas bandymų stendas, kuris prijungtas prie aukštos įtampos impulsinio generatoriaus. Stendas sukonstruotas taip, jog būtų patogų keisti izoliatorius, juos šlapinti ir stebėti bandymų metu.
3. Ištirtas eksploatacijoje buvusių, užterštų izoliatorių Nr.1-6 izoliacinis atsparumas trumpajai impulsinei bangai. Nustatytos tokios pramušimo įtampos amplitudės vertės: Nr.1 – 200kV; Nr.2 – 198kV; Nr.3 – 219kV; Nr.4 – 226kV; Nr.5 – 197kV; Nr.6 – 209kV.
4. Ištirtas eksploatacijoje buvusių, nuplautų izoliatorių Nr.1,3-6 izoliacinis atsparumas trumpajai impulsinei bangai. Nustatytos tokios pramušimo įtampos amplitudės vertės: Nr.1 – 200kV; Nr.3 – 240kV; Nr.4 – 243kV; Nr.5 – 207kV; Nr.6 – 243kV. Eil. Nr. 1 izoliatoriaus atsparumas nuvalius nešvarumus nepakito, o likusiųjų izoliatorių padidėjo 10-34kV.
- 5.1. Ištirtas eksploatacijoje buvusių, užterštų izoliatorių Nr.1-6 izoliacinis atsparumas trumpajai impulsinei bangai imituojant lietų. Nustatytos tokios pramušimo įtampos amplitudės vertės: Nr.1 – 203kV; Nr.2 – 200kV; Nr.3 – 230kV; Nr.4 – 233kV; Nr.5 – 206kV; Nr.6 – 214kV. Imituojant lietų ant nuplautų izoliatorių Nr.1,3-6 pastebėtas atsparumo trumpajai impulsinei bangai padidėjimas: Nr.1 – 207kV; Nr.3 – 245kV; Nr.4 – 248kV; Nr.5 – 215kV; Nr.6 – 231kV. Tiriant nešvarių izoliatorių atsparumą lietaus sąlygomis, neatlaikęs trumposios impulsinės bangos sudužo izoliatorius Nr.2.
- 5.2. Ištirtas eksploatacijoje buvusių, užterštų izoliatorių Nr.1,3-6 izoliacinis atsparumas trumpajai impulsinei bangai imituojant rasos tašką. Nustatytos tokios pramušimo įtampos amplitudės vertės: Nr.1 – 207kV; Nr.3 – 240kV; Nr.4 – 245kV; Nr.5 – 207kV; Nr.6 – 224kV. Imituojant rasos tašką ant nuplautų izoliatorių pastebėtas atsparumo padidėjimas: Nr.3 – 251kV; Nr.4 – 260kV; Nr.5 – 226kV; Nr.6 – 239kV. Ieškant nuplauto izoliatoriaus Nr.1 pramušimo įtampos amplitudinės vertės rasos taško sąlygomis, izoliatorius sudužo.

6. Izoliatorių atsparumo trumpajai impulsinei bangai didėjimas sušlapinus paviršius aiškinamas dėl susidariusio pusiau laidaus sluoksnio ant izoliatoriaus paviršiaus, dėl kurio elektrinis laukas tampa vienalytiškesnis, padidėja izoliatoriaus savitoji talpa. Taip pat pastebėta, jog visais atvejais švarių izoliatorių elektrinis atsparumas buvo didesnis, tad galima teigti, jog teršalai turi įtakos izoliatorių elektriniam atsparumui veikiant trumposioms impulsinėms bangoms. Taip pat trumposios impulsinės bangos sukelia pavojingus mechaninius apkrovimus.

LITERATŪRA

1. RAMOS HERNANZ, Jose A. ir kt. Insulator pollution in transmission lines [interaktyvus]. Victoria-Gasteiz: RE&PQJ, Vol. 1, No.4 2006. [žiūrėta 2016-03-02]. Prieiga per: www.icrepq.com/
2. GENCOGLU, Muhsin Tunay ir CEBECI, Mehmet. The pollution flashover on high voltage insulators [interaktyvus]. Electric Power System Research Vol. 78, 2008. [žiūrėta 2016-04-20]. Prieiga per: Science Direct.
3. IBRAHIM, Mohamed E ir kt. Flashover improvement of polluted high voltage insulators by nonlinear nanofilled hydrophobic coating [interaktyvus]. Electric Power Systems Research Vol. 140, 2016. [žiūrėta 2016-05-01]. Prieiga per: Science Direct.
4. BOUDISSA, R. ir kt. Effect of pollution distribution class on insulators flashover under AC voltage [interaktyvus]. Electric Power Systems Research Vol. 104, 2013. [žiūrėta 2016-04-20]. Prieiga per: Science Direct.
5. DIMITROPOULOU, M. ir kt. Comparative Investigation of Pollution Accumulation and Natural Cleaning for Different HV Insulators [interaktyvus]. Engineering, Technology & Applied Science Research Vol.5, No. 2, 2015. Prieiga per: www.academia.edu/
6. SERDIGH NEZHAD, H. Performance improvement of Insulator string in polluted conditions [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-05-01]. Prieiga per: <http://journal.esrgroups.org>
7. BAUBLYS, J., JANKAUSKAS, P., MARKEVIČIUS, L. A., MORKVĖNAS, A. *Izoliacija ir viršįtampiai: vadovėlis*. Kaunas: 2008. ISBN 9786090200346.
8. SCHMITT, H., WINTER, W. Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-04-14] Prieiga per: <http://www.ipstconf.org/>
9. De METZ-NOBLAT, B. Lightning and HV electrical installations [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-07-07]. Prieiga per: <http://www.studiecd.dk/>
10. MARKEVIČIUS, L. A., MORKVĖNAS, A., GUDŽIUS, S., ŠIOŽINYS, V. *Žiedinio elektros perdavimo tinklo modelis avarinių procesų tyrimui aukštų dažnių srityje: baigiamoji ataskaita*. Kaunas, 2009.
11. *T140B457 AUKŠTOS ĮTAMPOS TECHNIKOS MODULIO LABORATORINIAI DARBAI*. Kaunas, 2014.
12. *Sediver toughened glass suspension insulators: techninė dokumentacija* [interaktyvus]. [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per: <http://www.sediver.com/>