



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Aukštosios įtampos kabelių įtakos elektros sistemos
patikimumui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Deividas Šliuoža

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Aukštosios įtampos kabelių įtakos elektros sistemos patikimumui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Deividas Šliuoža

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Doc. Audrius Jonaitis

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Deividas Šliuoža

Aukštosios įtampos kabelių įtakos elektros sistemos patikimumui tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Deividas Šliuoža

Patvirtinta elektroniniu būdu

Šliuoža, Deividas. Aukštosios įtampos kabelių įtakos elektros sistemos patikimumui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: žaibo išlydis, viršįtampis, kabelis, aukšta įtampa kintama srovė.

Kaunas, 2022. 74 p.

Santrauka

Apžvalginėje dalyje analizuojami literatūros šaltiniai susiję su aukštosios įtampos kabelių panaudojimu elektros perdavimo tinkluose ir kabelių gedimo priežastimis. Pirmoje apžvalginėje dalyje analizuojama kabelių didėjanti paklausa, klojimo tendencijos, pranašumai bei trūkumai lyginant su oro linijomis. Antroje apžvalginėje dalyje analizuojamos aukštosios įtampos kabelių gedimų priežastys - aprašomi išoriniai ir vidiniai kabelių gedimai, jų priežastys ir kabelių bei jų komponentų gedimų dažnumas.

Tiriamajoje dalyje siekiama išanalizuoti žaibo išlydžio sukeltų impulsų įtaką 110 kV įtampos požeminių kabelių izoliacijai. Tyrimo atlikimui pasitelkti literatūros šaltiniai ir programinė įranga EMTP, kuri modeliuoja pereinamuosius vyksmus ir kurios aplinkoje sukurtas 110 kV elektros tinklo modelis. Sukurto modelio pagalba buvo modeliuojamas žaibo išlydžio sukeltas impulsas kabelių linijoms: kai žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą ir kai žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą. Modeliuojamos kabelių linijos intarpo modelis sukurtas 100 m., 300 m. ir 600 m. ilgio. Išanalizuoti modeliavimo pereinamųjų vyksmų rezultatai parodė indukuotas įtampas kituose kabeliuose, viršįtampių ribotuvų, kabelių ekranų įžeminimo, įžeminimo kontūro varžos įtaką ir trumpiausią kabelių linijos ilgį, kuris dėl žaibo išlydžio sukeltų impulsų nepažeistų kabelio izoliacijos ir tai užtikrintų ilgalaikį ir patikimą kabelių eksploatavimą naujai įrengiamoms 110 kV kabelių linijoms.

Šliuoža, Deividas. Analysis of Impact of High Voltage Cables to Electrical System Reliability. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: lightning discharge, overvoltage, cable, high voltage alternating current.

Kaunas, 2022. 74 p.

Summary

The literary sources analyzed in the review part relate to the use of high-voltage cables in electricity transmission networks and the causes of cable failure. The first part of the review analyses the growing demand for cables, laying trends, advantages and disadvantages compared to overhead lines. In the second part of the review, the causes of failures of high-voltage cables are analyzed – describing external and internal cable failures, their causes and the frequency of failures of cables and their components.

The aim of the research is to analyze the influence of impulses caused by lightning discharge on the insulation of 110 kV underground cables. Literary sources and EMTP software were used to carry out the research, which simulates transition processes and in which a 110 kV power grid model is developed. With the help of the developed model, the pulse caused by the lightning discharge on cable lines was modeled: when lightning hits the overhead lightning protection cable and when lightning hits the overhead phase wire. The modelled cable line insert model is designed to be 100 m, 300 m and 600 m long. The analyzed results of the modelling transitions showed induced voltages on other cables, the influence of surge arresters, the grounding of cable screens, the resistance of the grounding and the shortest length of the cable line, which, due to the pulses caused by lightning discharge, would not damage the cable insulation and which would ensure long-term and reliable operation of the cables for the newly installed 110 kV cable lines.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų sąrašas	11
Įvadas.....	12
1. Apžvalginė dalis	14
1.1. Aukštosios įtampos kabelių linijų panaudojimo elektros perdavimo tinkluose analizė.....	14
1.2. Aukštosios įtampos kabelių gedimo priežasčių analizė	19
1.2.1. Kabelių linijų gedimai	23
2. Tiriamoji dalis.....	34
2.1. Viršįtampių pereinamųjų vyksmų matematiniai modeliai	34
2.1.1. Elektros oro linijų modeliai	34
2.1.2. Elektros kabelių linijų modeliai.....	37
2.1.3. Elektromagnetinių bangų sklidimo linijoje modeliai	39
2.1.4. Viršįtampių ribotuvo modeliai	42
2.2. Viršįtampių sukeltų pereinamųjų vyksmų tyrimas.....	47
2.2.1. Tiriamojo modelio aprašymas	47
2.2.2. Žaibo išlydžio sukelti pereinamieji vyksmai kabelių linijoje.....	50
2.2.3. Modeliavimo suvestinė.....	66
3. Modeliavimo rezultatai	67
Išvados	69
Literatūros sąrašas	70
Priedai.....	73
1 priedas. 110 kV tinklo EMTP programos modelis.....	74

Lentelių sąrašas

1 lentelė. 2006-2015 m. užfiksuoti sausumos kabelių gedimai [11].....	22
2 lentelė. Kabelio tipų, kintamos srovės, bendras gedimų tipų dažnumas (dažnumas/per 100 km/per metus) [11].....	23
3 lentelė. Kabelių gedimų faktoriai [12]	23
4 lentelė. Faktorių A_0 ir A_1 vertės	43
5 lentelė. Modeliui naudojami kabelio duomenys	48
6 lentelė. Modeliavimo rezultatų suvestinė.....	66

Paveikslų sąrašas

1 pav. Danijos PSO pasiūlyti principai [7].....	15
2 pav. 2013 m. ir 2018 m. PSO aukštosios įtampos bendras tarpvalstybinių nutiestų kabelių linijų ilgis	16
3 pav. 2018 m. aukštosios įtampos linijų rinkos dalis pasaulyje pagal nutiestą linijų kiekį [10]	17
4 pav. Naujų kabelių (kintamos srovės), nutiestų 2005-2015 metais, su XLPE izoliacija, bendri linijų ilgiai [11]	18
5 pav. Naujų kabelių linijų (nuolatinės srovės), nutiestų 2005-2015 metais, bendri ilgiai [11]	19
6 pav. 2006-2015 m. AĮ kabelių gedimų pasiskirstymas	20
7 pav. 2006-2015 m. AĮ kabelių vidinių gedimų pasiskirstymas.....	20
8 pav. 2006-2015 m. AĮ kabelių išorinių gedimų pasiskirstymas.....	21
9 pav. 110 kV kabelio izoliacijos pažeidimas dėl padidėjusios temperatūros laidininke [13]	25
10 pav. Tipinio vandens medžio fotografija skirtingų įtampų XLPE kabelių izoliacijoje [14].....	26
11 pav. Elektrinio streso ir elektrinio lauko poveikis kabeliui	26
12 pav. Tipiniai kabelio defektai [15]	27
13 pav. Žaibavimo dažnumas Europoje 2008-2017 metais [18]	28
14 pav. Kombinuotos oro/kabelių linijos modelio vaizdas [19]	29
15 pav. Ekskavatoriaus pažeistas aukštosios įtampos kabelis [20].....	30
16 pav. Blogai sumontuotos jungiamosios movos pasekmės [21].....	30
17 pav. Galios kabeliai vienoje plokštumoje [22].....	31
18 pav. Varinio laidininko temperatūros priklausomybė nuo natūralios žemės terminio laidumo [22]	31
19 pav. Temperatūros pasiskirstymas skirtingam žemės terminiam laidumui [22].....	32
20 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai kabeliai užpilti smėlio ir cemento mišiniu (kairėje), kabeliai užpilti natūralia žeme (dešinėje) [22]	33
21 pav. Linijos geometriniai parametrai	35
22 pav. Kabelio tuščiaviduris cilindras, ekranas ir šarvas	38
23 pav. Kabelio cilindro izoliacinis tarpas.....	38
24 pav. Žaibo impulso bangos sklidimas elektros linijoje	40
25 pav. Viršįtampių ribotuvo ekvivalentinė schema [26]	43
26 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo schema [27].....	43
27 pav. Induktyvumą turintis viršįtampių ribotuvo modelis [29]	44
28 pav. Netiesinio induktyvumo viršįtampių ribotuvo modelis [28]	45
29 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo modelio schema [30].....	45
30 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo modelio schema, be talpos elemento [30].....	45
31 pav. Koreguota supaprastinto viršįtampių ribotuvo modelio schema [31]	46
32 pav. Žaibo srovės impulsas 8/20 μ s viršįtampių ribotuvo parametrų derinimui.....	46
33 pav. Supaprastinta tiriamojo modelio schema	47
34 pav. Supaprastintas EMTP kabelio modelis	48
35 pav. Sumodeliuotas horizontalus kabelių paklojimo būdas	49
36 pav. Supaprastintas EMTP dvigrandės (kairėje) ir viengrandės metalinės atramos modelis	50
37 pav. Supaprastinta pirmojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į žaibosaugos trosą	50
38 pav. Pereinamieji vyksmai, kai pirmos kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą.....	51

39 pav. Pereinamieji vyksmai, kai antros kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą.....	51
40 pav. Supaprastinta pirmojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į atramos Nr. 24 fazinį laidą	52
41 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pradžioje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę	52
42 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pabaigoje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę	53
43 pav. Pereinamieji vyksmai antros kabelių linijos pradžioje, žaibas pataiko į pirmos grandies oro linijos A fazę.....	53
44 pav. Supaprastinta antrojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į žaibosaugos trosą.....	54
45 pav. Pereinamieji vyksmai, kai pirmos kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą.....	54
46 pav. Pereinamieji vyksmai, kai antros kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą.....	55
47 pav. Supaprastinta antrojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą....	55
48 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pradžioje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę	56
49 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pabaigoje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę	56
50 pav. Pereinamieji vyksmai antros kabelių linijos pradžioje, žaibas pataiko į pirmos grandies oro linijos A fazę.....	57
51 pav. Supaprastinta trečiojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į žaibosaugos trosą.....	57
52 pav. Pereinamieji vyksmai, kai pirmos kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą.....	58
53 pav. Pereinamieji vyksmai, kai antros kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą.....	58
54 pav. Supaprastinta trečiojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą... 59	59
55 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pradžioje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę	59
56 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pabaigoje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę	60
57 pav. Pereinamieji vyksmai antros kabelių linijos pradžioje, žaibas pataiko į pirmos grandies oro linijos A fazę, kai kabelių ilgis yra 600 m.....	60
58 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos tarp atramos Nr. 10 ir atramos Nr. 14.....	61
59 pav. Pereinamieji vyksmai Senamiesčio TP	61
60 pav. Pereinamieji vyksmai Laukų TP	62
61 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti šalia OL izoliatorių	62
62 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti šalia OL izoliatorių ir įžeminimo kontūro varža - 30 Ω	63
63 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m, įžeminimo kontūro varža - 30 Ω ir viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti viename lygyje	63
64 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir kabelių linijos pradžioje nėra viršįtampių ribotuvų	64

65 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir kabelių linijoje nėra viršįtampių ribotuvų	64
66 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir kabelių ekranai neįžeminti	65
67 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m, KL pradžioje sumodeliuoti ekranų viršįtampių ribotuvai.....	65

Santrumpų sąrašas

AĮKS – Aukšta įtampa kintama srovė;

ATP – Angliškas terminas *alternate transients program*. Lietuviškas terminas – alternatyvių pereinamųjų procesų programa;

EMTP – Angliškas terminas *electromagnetic transients program*. Lietuviškas terminas – elektromagnetinių pereinamųjų procesų programa;

HVAC – Angliškas terminas *high voltage alternating current*. Lietuviškas atitikmuo AĮKS;

OL – Oro linija;

KL – Kabelių linija;

TP – Transformatorių pastotė;

TSO – Angliškas terminas *transmission system operator*. Lietuviškas atitikmuo PSO;

PSO – Perdavimo sistemos operatorius;

PPL – Angliškas terminas *paper-polypropylene laminates*. Lietuviškas terminas – popierinis-polipropileno laminatas;

XLPE – Angliškas terminas *cross-linked polyethylene*. Lietuviškas terminas – vulkanizuotas polietilenas;

Įvadas

Elektros energija ir jos visa sistema yra viena iš esminių dalių, kuri kuria mūsų modernią visuomenę ir leidžia jai tobulėti. Vienas iš pagrindinių elektros energetikos sistemų tikslų – elektros energijos perdavimo ir skirstymo tinklų patikimumas, kokybė ir avarijų prevencija. Vykdamas šiuos tikslus, reikia rūpintis elektros sistemos vientisumu, suderinamumu bei perdavimo tinklo ir jungiamųjų linijų su kitomis elektros sistemomis valdymu, jų eksploatavimu ir koordinuota plėtra.

Elektros energijos perdavimo tinklas yra neišvengiama elektros energijos sistemos dalis, kuri yra ypač svarbi elektros energijos gamybai ir vartojimui. Šis tinklas leidžia elektros energiją perduoti iš įvairių gamintojų pas vartotojus, be to būtina sujungti šalies energetikos sistemą su kaimyninių šalių tinklu tam, kad būtų galimybė keistis elektros energija ir stipriai padidinti šalių elektros sistemos patikimumą. Visos šalys žinodamos perdavimo tinklo svarbą, augančią elektros energijos gamybą ir vartojimą investuoja milžiniškus pinigus į jos plėtrą ir patikimumo didinimą.

Aukštosios įtampos elektros energijai perduoti, tarp TP (transformatorių pastočių), naudojamos OL (oro linijos) ir/arba KL (kabelių linijos). Seniau OL buvo vienintelis būdas perduoti aukštosios įtampos elektros energijai, bet metams bėgant ir vis atsirandant naujoms technologijoms buvo sukurti aukštosios įtampos kabeliai, kurie gali būti pakloti žemėje, tuneliuose ir kitur. Dabar pastebima, kad dauguma elektros PSO (perdavimo sistemų operatorių, angl. TSOs – *transmission system operators*) vis dažniau įrenginėja naujas KL arba keičia esamas oro linijas į KL ten kur yra tankiai apgyvendintos vietos [1], mažas elektros linijų tiesimo koridorius ir vyrauja griežtesnės sveikatos apsaugos taisyklės dėl elektrotaršos (elektrosmogas) [2]. Įrengiant naujas KL nepabloginamas vietovės kraštovaizdis, o esamas OL keičiant į KL – pagerinamas.

Problema:

Didėjant aukštosios įtampos KL paklausai ir norint jas apsaugoti susiduriame su vidiniais (komutacijos, trumpasis jungimas) ir išoriniais (atmosferiniai viršįtampiai – žaido išlydis) veiksniais, kurie sudaro sąlygas pereinamųjų vyksmų metu įtampai pakilti virš aukščiausiai leistinos įtampos. Atmosferiniai viršįtampiai yra viena iš pagrindinių pavojų elektros perdavimo sistemai. Toks įvykis gali pažeisti KL, jų izoliacijas, sugadinti perdavimo tinklo įrangą ir sustabdyti elektros energijos perdavimo darbą tam tikroje linijoje ar linijose [3].

Aukštosios įtampos kabelių gamintojai deklaruoja, kad jų pagaminti kabeliai gali trumpą laiką atlaikyti įtampos šuolius. Tam, kad apsaugotume kabelių linijas nuo viršįtampių turime įvertinti vidinius ir išorinius veiksnius, parinkti apsaugas, kad atsiradus minėtiems veiksniams KL išliktų sveika.

Šiame baigiamajame darbe tiriama 110 kV kombinuotos oro/kabelių linijos prognozuojami atmosferinių viršįtampių pereinamieji vyksmai ir jų galimas poveikis aukštosios įtampos kabeliams.

Darbo tikslas – sukurti elektros energijos perdavimo tinklo 110 kV oro linijos su kabelių intarpais veikimo modelį, įvertinant kabelių linijų patikimumo, darbo režimo charakteristikų kitimą ir atlikti modeliavimo rezultatų analizę.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti aukštosios įtampos kabelių linijų panaudojimo elektros perdavimo tinkluose analizę.

2. Atlikti aukštosios įtampos kabelių gedimo priežasčių analizę.
3. Sukurti 110 kV oro linijos su kabeli tarpais matematinį modelį.
4. Sumodeliuoti 110 kV oro linijos dalių keitimą kabelių linijomis.
5. Pateikti modeliavimo rezultatus ir išvadas.

1. Apžvalginė dalis

1.1. Aukštosios įtampos kabelių linijų panaudojimo elektros perdavimo tinkluose analizė

Visame pasaulyje PSO (perdavimo sistemų operatoriai, angl. TSOs – *transmission system operators*) pastebi didėjantį skaičių ir poreikį įrenginėti aukštosios įtampos KL. Šis poreikis auga dėl įvairių priežasčių, kelios iš jų – atsinaujinantys energijos šaltiniai, tarpvalstybinė prekyba, išmanusis tinklas, didėjantis elektros energijos suvartojimas, senos infrastruktūros atnaujinimas ir kai kuriose šalyse dėl didėjančios KL paklausos [1].

Seniau PSO daugiausiai naudodavo oro linijas, o aukštosios įtampos kintamos srovės (AİKS) požemines kabelių linijas dažniausiai tiesdavo tik tankiai apgyvendintose vietovėse. AİKS požeminės kabelių linijų skaičius ir ilgis būdavo riboti, bet ši tendencija per pastaruosius 10 metų keitėsi, nes PSO ėgavo patirtį jas eksploatuojant. Planuojamos arba neseniai nutiestos AİKS kabelių linijos yra kur kas ilgesnės nei buvo prieš 10 metų, taip pat AİKS kabelių linijas vis dažniau siūloma įrengti norint išsaugoti kraštovaizdį ir visuomenės sveikatą [1].

Elektros perdavimo kabelių technologiją prasideda 1880 m. Prieš I pasaulinį karą buvo pirmieji kartai, kai buvo pradėti naudoti alyviniai kabeliai. Jie turėjo 3 laidininkus kabelyje, kurie buvo pagaminti iš vario ir buvo naudojami iki 25 kV įtampos. Dėl nevienodo elektrinio lauko pasiskirstymo kabelio viduje, šis kabelis buvo linkęs į dalinius išlydžius ir dielektrinių savybių praradimą tarp laidininkų. Ši problema buvo išspręsta, kai kiekvienas laidininkas buvo ekranuotas plonomis vario juostomis ir dėl šio patobulinimo kabeliai galėjo pasiekti iki 69 kV įtampos [4].

Esant didesnėms įtampoms, buvo nustatyta, kad daliniai išlydžiai vyksta kabelio izoliacijoje. Ši problema buvo išspręsta naudojant mažo klampumo, alyva impregnuota popierinę izoliaciją. Tuo metu darbinės kabelių įtampos galėjo pasiekti iki 132 kV. Šiandien, šie kabeliai nėra daug pasikeitę nuo 1917 m., kai jie buvo pirmą kartą pristatyti pasauliui [4].

Vėliau, didėjant perdavimo tinklų įtampai, buvo sukurti nauji kabeliai, kurie pasižymėjo mažesniais dielektriniais nuostoliais, tai buvo kabeliai su XLPE izoliacija (angliškas terminas *cross-linked polyethylene*. Lietuviškas terminas – vulkanizuotas polietilenas) ir su PPL izoliacija (angliškas terminas *paper-polypropylene laminates*. Lietuviškas terminas – popierinis-polipropileno laminatas). Kabeliai su PPL izoliacija pasižymi mažesniais dielektriniais nuostoliais, geresnėmis dielektrinėmis savybėmis nei kabeliai su XLPE izoliacija. Nors PPL kabelių savybės geresnės, daugiausia naudojami XLPE kabeliai, nes jie yra pigesni ir nedaug nusileidžia savo savybėmis nuo kabelių su PPL izoliacija [4].

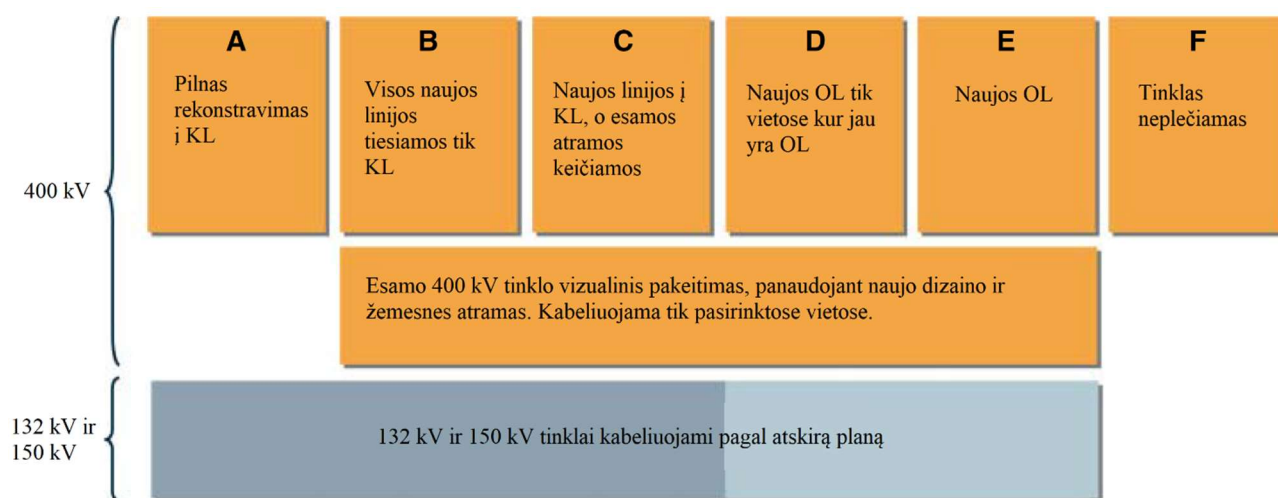
Jau senai XLPE kabeliai pakeitė alyvinius kabelius ir tapo vienu iš pagrindinių sprendimų vidutinės ir aukštosios įtampos tinkluose. XLPE kabeliai pasižymi patikimumu, aukštesne darbine temperatūra, mažesniais dielektriniais nuostoliais ir geresnėmis dielektrinėmis savybėmis nei alyviniai kabeliai [5].

Elektros perdavimo sistemų operatoriai pastebėję XLPE kabelių pranašumus vis dažniau pradėjo įrenginėti naujas kabelių linijas, kai kur ir keisti oro linijas į kabelių linijas.

Pagrindiniai aspektai į kuriuos turi būti atkreiptas dėmesys norint tiesti naujas ar rekonstruoti esamas aukštosios įtampos linijas yra: urbanizacija, vietovės lygumas ir galimybė numatyti galimą linijos kelią [6].

- Urbanizacijos aspektas – jei liniją yra numatyta tiesti per urbanizuotą vietovę, tada ateityje norint liniją atnaujinti ar ją pakeisti, gali iškilti problemų dėl ankštų koridorių.
- Vietovės lygumo aspektas – jei vietovė nėra lygi arba ji yra kalvota, tai gali iššaukti technines kliūtis, padidinti projekto kainą.
- Galimos linijos kelio aspektas – numatytoje trasoje turi būti įmanoma tiesti liniją.

Prieš 2008 m., Danijos vyriausybė patyrė visuomeninį ir politinį spaudimą dėl vis besitęsiančių naujų oro linijų statymo ir oro linijų nenorėjimo jų keisti į kabelių linijas. Vyriausybės spaudžiama Danų PSO – „Energinet“, 2008 m. balandžio 3 d. paskelbė galimas ateities perdavimo tinklo plėtros alternatyvas, kuriuose buvo nurodyti ir palyginti 6 principai. Danų vyriausybė turėjo išsirinkti vieną alternatyvą (žr. pav. 1) pagal kurią bus vadovaujama siūlymams naujas ar rekonstruojant esamas aukštosios įtampos linijas [7].



1 pav. Danijos PSO pasiūlyti principai [7]

Iš šių 6 principų, Danų vyriausybė pasirinko C variantą – visos naujos 400 kV linijos bus kabelių linijos [7].

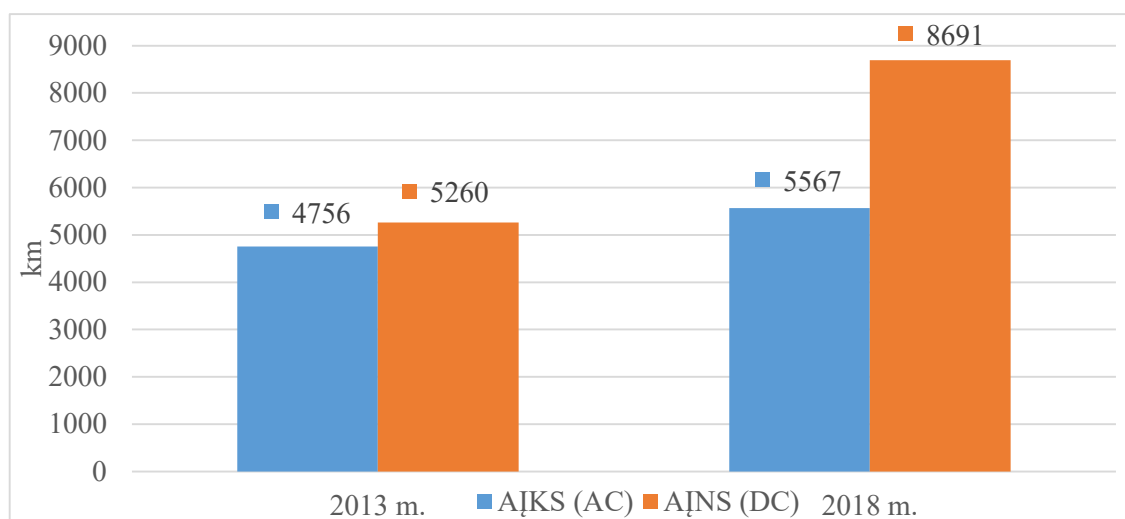
Aukštosios įtampos nuolatinės srovės ir kintamos srovės kabelių įrengimas yra labai brangus ir sudėtingas, bet jie turi ir savo pranašumų, kurie yra vertinami visuomenės, ypač urbanizuotose vietovėse. Požeminių linijų pranašumai prieš oro linijas [6]:

- Nutiestos linijos dažnai nepaveikia kraštovaizdžio.
- Dėl savo kabelio struktūros nesukuria išorinio elektrinio lauko efekto.
- Eksploatuojamos linijos nekelia triukšmo.
- Atsiranda mažesnė elektros linijų apsaugos zona ir mažiau apribojimų joje nei oro linijų.
- Žemės sklypų savininkams ir visuomenei labiau priimtinesnis sprendimas nei oro linijos.
- Audros, uraganai, viesulai ir kiti panašūs reiškiniai gali padaryti minimalios žalos kabelių linijų atviruose galuose, bet ši žala yra mažesnė nei oro linijų.

Požeminių linijų trūkumai prieš oro linijas [6]:

- Linijos ilgio ribojimas (60-100 km, priklausomai nuo darbinės įtampos).
- Ilgoms kabelių linijos yra reikalingas reaktyvios galios kompensavimas.
- Kabelių linijų tiesimo kaina smarkiai didesnė už oro linijų.
- Sudėtingesnis kabelių linijų tiesimas.
- Sugedusio kabelio remonto laikas ilgesnis.

Europos elektros perdavimo sistemos operatorių asociacijos (ENTSO-E) duomenimis yra didėjantis poreikis tiesti aukštosios įtampos kabelių linijas tarp valstybių (žr. pav. 2). Duomenys rodo, kad tarp 2013 ir 2018 metų, aukštosios įtampos kintamos srovės (AĮKS) kabelių linijų tiesimas padidėjo apie 10,6%, o aukštosios įtampos nuolatinės srovės (AĮNS) – 56,12% [8, 9].

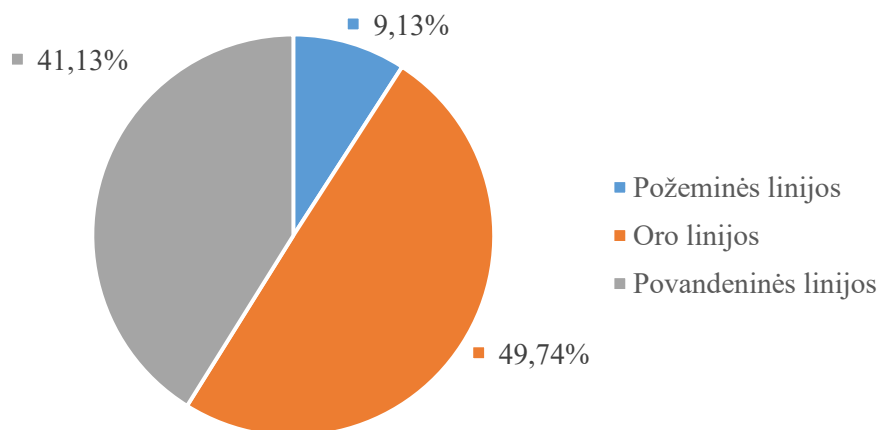


2 pav. 2013 m. ir 2018 m. PSO aukštosios įtampos bendras tarpvalstybinių nutiestų kabelių linijų ilgis

2020 m. „KBV Research“ atlikta pasaulio aukštosios įtampos kabelių rinkos analizės ataskaita rodo, kad dėl didėjančios kabelių paklausos, 2026 metais aukštosios įtampos kabelių rinkos vertė gali pasiekti 45,9 milijardo dolerių (~37,82 mlrd. Eur), t.y. 5,6% padidėjimas prognozuojamu laikotarpiu tarp 2020 ir 2026 metų. Didėjanti elektros energijos paklausa, didėjantys atsinaujinantys energijos šaltiniai, senstantis tinklas priverčia statyti naujas perdavimo linijas ir plėsti esamą tinklą [10].

Didėjant žmonių populiacijai, didėja ir elektros energijos suvartojimas, todėl tai yra viena iš pagrindinių priežasčių diegti išmaniojo tinklo technologijas ir užtikrinti patikimą elektros energijos perdavimą. Tokiose regionuose kaip Azijos ir Ramiojo vandenyno regione ir Pietų Amerikos regione yra pastebimas didėjantis poreikis investuoti į išmanųjį tinklą. Šių regionų tankiai gyvenamose vietovėse yra didėjanti paklausa aukštosios įtampos požeminiams ir povandeniniams kabeliams. Šiaurės Amerikos regione ir Europos regione pastebimas tarpvalstybinis aukštosios įtampos požeminių ir povandeninių kabelių tiesimas [10].

Nutiestos aukštosios įtampos linijos yra skirstomos į požemines linijas, povandenines linijas ir oro linijas. Dėl mažų elektros energijos perdavimo nuostolių, lengvesnio linijų tiesimo ir ekonominio pranašumo, oro linijos sudaro didžiąsą dalį nutiestų aukštosios įtampos linijų (žr. pav. 1) [10].



3 pav. 2018 m. aukštosios įtampos linijų rinkos dalis pasaulyje pagal nutiestą linijų kiekį [10]

Požeminių linijų technologija yra labiausiai pažengusi, bet šių linijų tiesimo kaina yra didesnė, todėl jos užima mažesnę rinkos dalį. Povandeninės linijos dažniausiai naudojamos perduoti elektros energiją tarp valstybių [10].

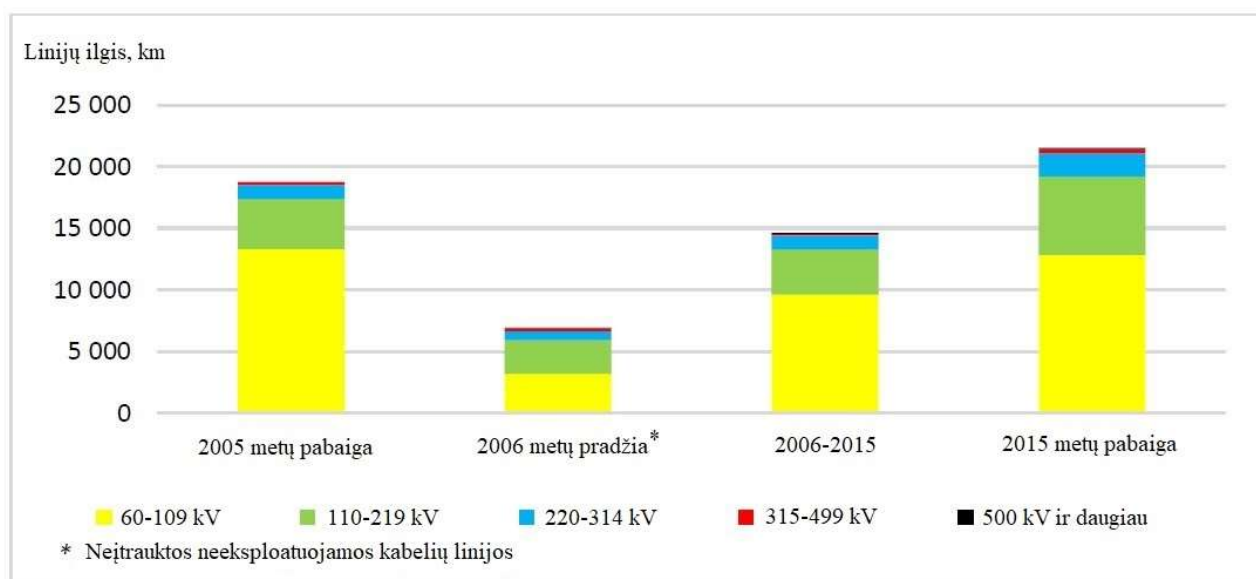
Aukštosios įtampos požeminių ir povandeninių linijų paklausa vis didėja ir vienas iš tai įrodančių dalykų yra – pasirašytos didelių įmonių ir PSO didelės vertės sutartys, susitarimai ir kontraktai dėl kabelių pirkimo, jų tiesimo [10]:

- 2019 m. gegužės mėnesį „NKT“ pasirašė sutartį su Norvegijos energetikos koncernu „Equinor“ dėl 132 kV aukštosios įtampos kabelio tiekimo jungiančio naftos ir dujų platformas „Johan Sverdrup 2“ ir „Gina Krog“.
- 2019 m. rugpjūčio mėnesį „Siemens“ paskelbė pasiekę susitarimą dėl „Viking Link“ jungties. Susitarime buvo numatyta pristatyti 2 keitiklių stotis pirmajai aukštosios įtampos nuolatinės srovės jungčiai tarp Didžiosios Britanijos ir Danijos.
- 2019 m. gruodžio mėnesį „Nexans SA“ pasirašė preliminarą sutartį su Danijos energetikos įmone „Ørsted A/S“ ir Naujosios Anglijos elektros ir dujų tiekėju „Eversource Energy“ dėl galimybės tiekti iki 1000 km aukštosios įtampos povandeninio kabelio jūriniam vėjo jėgainių projektui.
- 2020 m. vasario mėnesį „Nexans“ pasirašė sutartį su Saudo Arabijos naftos ir dujų įmone „Marjan Field“ dėl 180 km, 230 kV aukštosios įtampos kabelių tiekimo jų jūriniam projektui prie Arabijos įlankos ir 2 kabelius po 90 km, 230 kV aukštosios įtampos kintamos srovės.
- 2020 m. gegužės mėnesį „Prysmian Group“ pasirašė kontraktą su Olandijos ir didelės dalies Vokietijos PSO „TenneT“. Šis kontraktas buvo pasirašytas „SuedOstLink“ projektui, Vokietijoje. Šiame projekte yra numatyta viena iš ilgiausių požeminių aukštosios įtampos nuolatinės srovės linijų, kurios galia sieks iki 2 GW.
- 2020 m. gegužės mėnesį „Nexans SA“ pasirašė susitarimą su įmone „Ariadne Interconnection SPSA“, kuri priklauso Graikijos PSO „Independent Power Transmission Operator SA“. Šiame susitarime numatytas 1000 MW galios, aukštosios įtampos nuolatinės srovės kabelių linijos tiesimas tarp Graikijos Atikos regiono ir Kretos.

- 2020 m. birželio mėnesį „Siemens Gas and Power“ pasirašė susitarimą su u įmone „Ariadne Interconnection SPSA“. Įmonė „Siemens Gas and Power“ turės pagaminti ir pateikti 2 keitiklių stotis, kurios bus reikalingos aukštosios įtampos nuolatinės srovės jungčiai tarp Kretos ir Graikijos žemynine dalimi.
- 2020 m. birželio mėnesį „NKT“ paskelbė, kad pasirašė susitarimą su Olandijos ir didelės dalies Vokietijos PSO „Tennet“ ir kitos Vokietijos dalies PSO „TransnetBW“ dėl požeminės 525 kV aukštosios įtampos nuolatinės srovės kabelių linijos, kurios apytikslis ilgis yra 750 km, Vokietijos „SuedLink“ koridoriui.

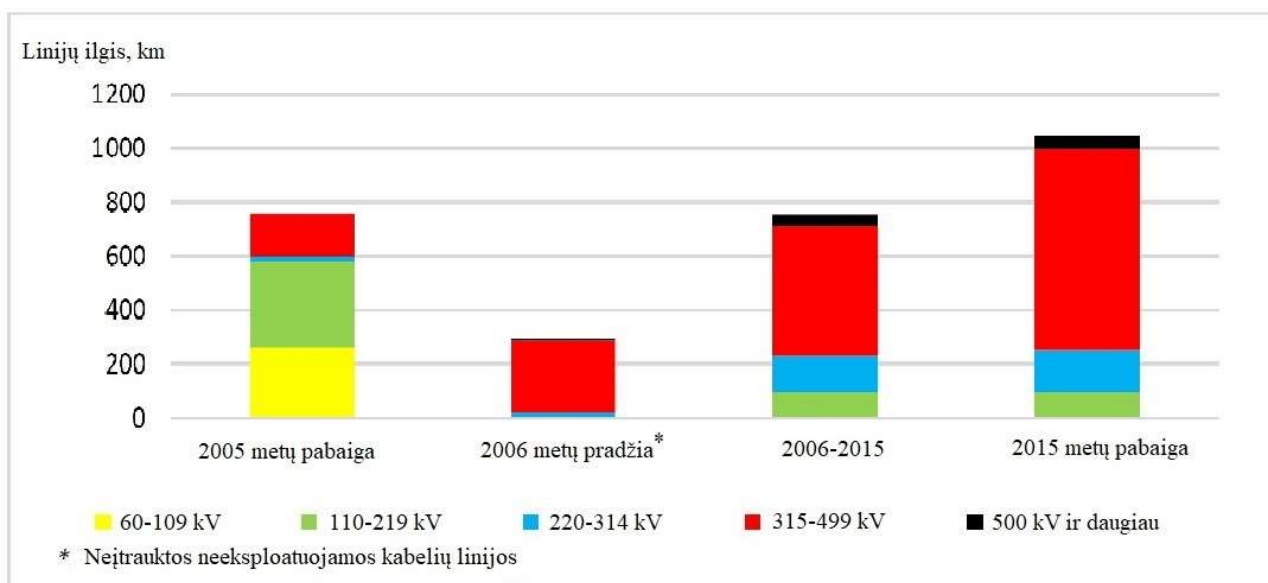
2020 m. „Cigre“ publikuotame leidinyje buvo pateikta 2006-2015 m. atlikta aukštosios įtampos kabelių eksploatavimo įmonių apklausa, kurioje įmonės pasidalino savo eksploatavimo patirtimi ir nutiestų kabelių linijų ilgiais. Į šią apklausą atsakė 59 eksploatavimo įmonės iš 19 skirtingų šalių tokių kaip: Argentina, Australija, Austrija, Belgija, Brazilija, Danija, Suomija, Vokietija, Graikija, Italija, Japonija, Malaizija, Norvegija, Pietų Afrika, Ispanija, Švedija, Šveicarija, Olandija ir Jungtinės Amerikos Valstijos [11].

4 paveikslėlyje yra apibendrinti kelių apklausų duomenys apie naujai nutiestas aukštosios įtampos kintamos srovės kabelių linijas su XLPE izoliacija. Duomenys surinkti nuo 2005 metų galo iki 2015 metų galo.



4 pav. Naujų kabelių (kintamos srovės), nutiestų 2005-2015 metais, su XLPE izoliacija, bendri linijų ilgiai [11]

Kitame paveikslėlyje (žr. pav. 5) pavaizduoti nuolatinės srovės kabelių linijų ilgiai, kurie buvo nutiesti tarp 2005 ir 2015 metų. 98% visų nutiestų, nuolatinės srovės, kabelių 2006-2015 metais buvo su XLPE izoliacija.



5 pav. Naujų kabelių linijų (nuolatinės srovės), nutiestų 2005-2015 metais, bendri ilgiai [11]

1.2. Aukštosios įtampos kabelių gedimo priežasčių analizė

Aukštosios įtampos kabeliai nėra amžini, todėl juos perkant ir eksploatuojant yra būtina atlikti tam tikrus bandymus tam, kad aukštosios įtampos tinklas išliktų patikimas. Dauguma senai nutiestų aukštosios įtampos linijų sensta ir joms vis dažniau atsiranda įvairių gedimų. Šių gedimų ieškojimas, nustatymas ir jų prevencija yra vienas iš svarbiausių kelių norint sukaupti geresnę eksploatavimo patirtį ir sukurti ateityje patikimesnį tinklą. Šiuo metu vidutinis aukštosios įtampos kabelių eksploatavimo amžius yra >40 metų [6].

„Cigre“ publikuotame leidinyje buvo surinkti duomenys apie kabelių linijų eksploatavimo patirtį, kuriame buvo nurodyti gedimų skaičiai ir gedimų priežastys. Iš visų 59 eksploatavimo įmonių surinktų apklausos duomenų, 10 atsakymų buvo atmesti dėl akivaizdžiai neteisingų duomenų ir 8 atsakymai neturėjo duomenų apie kabelių komponentus (galinės movos ir jung. movos), todėl jie irgi nebuvo įtraukti į bendrą statistiką [11].

Apibendrintoje statistikoje buvo nurodyta, kad iki 2015 m. yra įrengta 29350 km AĮKS kabelių ir 1045 km AĮNS požeminių kabelių. Taip pat, apklausos duomenys rodo, kad beveik visi nuo 2005 m. nutiesti AĮKS požeminiai kabeliai yra su vulkanizuoto polietileno (XLPE) izoliacija ir dauguma šių kabelių turi barjerą apsaugantį nuo vandens patekimo [11].

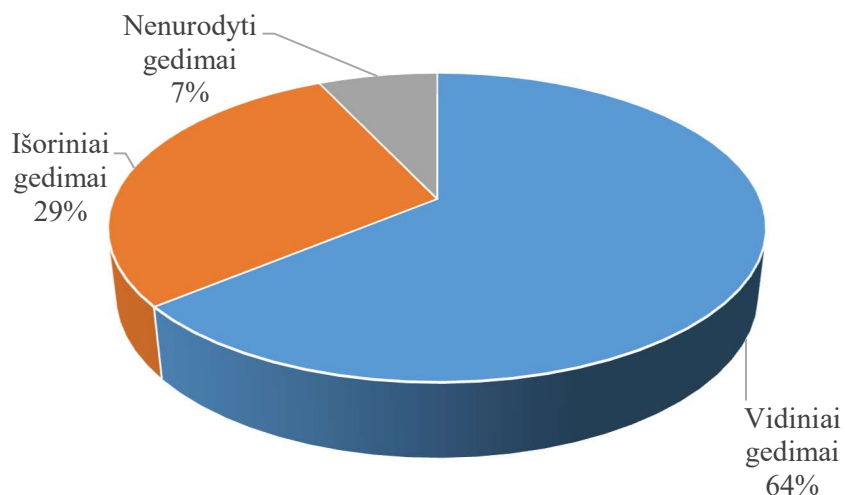
Surinkti duomenys leidžia pamatyti kabelių gedimo dažnumą. Iš viso buvo užfiksuoti 744 gedimai eksploatacijos metu ir iš šių gedimų – 2 gedimai buvo užfiksuoti AĮNS kabeliuose, kiti 742 gedimai – AĮKS kabeliuose [11].

„Cigre“ atlikta duomenų analizė rodo, kad 64% gedimų sudarė vidiniai gedimai, 29% - išoriniai, o likę 7% buvo nežinomi gedimai (žr. pav. 6) [11].

Vidiniams gedimams priskiriami laidininko gedimai, izoliacijos gedimai, kabelio ekrano gedimai, kabelio šarvo gedimai, gedimai atsiradę dėl vandens įsiskverbimo į kabelį, alyviniams kabeliams – alyvos pratekėjimas. Taip pat šiems gedimams priskiriamas movų nesandarumas jų montavimo metu ir kabelio pažeidimai jo klojimo metu.

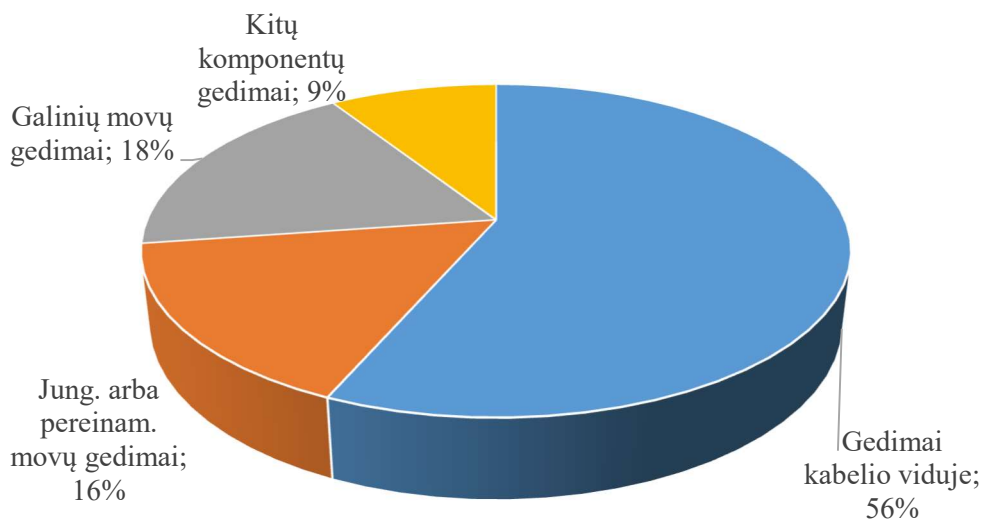
Išoriniams gedimams priskiriami kabelių gedimai dėl trečiųjų šalių kaltės, tokie kaip statinio statybos ar kasimo metu pažeistas kabelis, žuvininkystės metu ar laivo inkaro pažeistas kabelis. Taip pat priskiriami reiškiniai, kaip žaibo išlydis, žemės drebėjimai, korozija, prastas šiluminis laidumas.

Nežinomiems gedimams priskiriami gedimai, kurie nebuvo identifikuoti arba nebuvo apie juos pateikti duomenys.



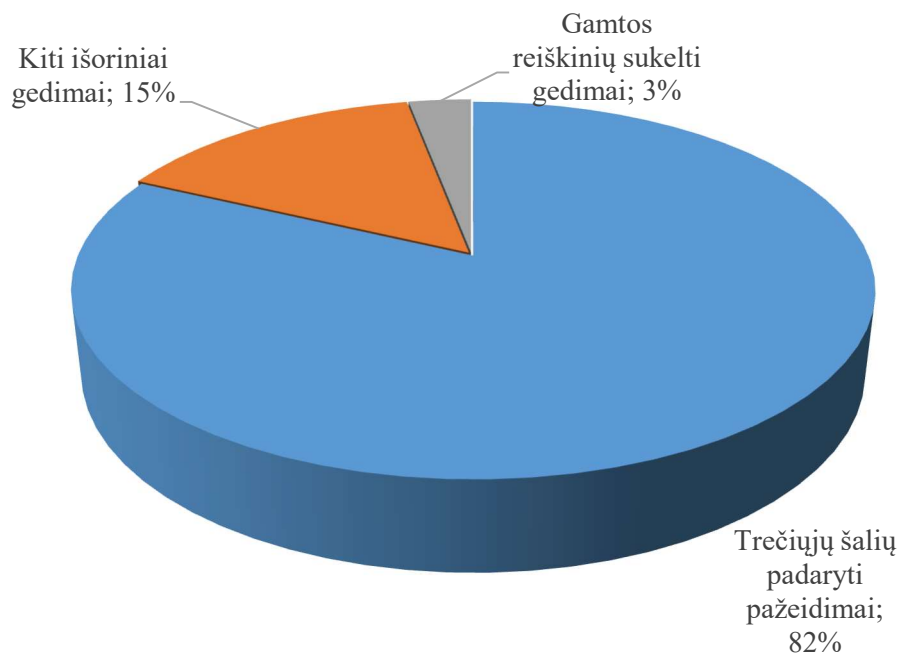
6 pav. 2006-2015 m. AĮ kabelių gedimų pasiskirstymas

56% visų vidinių gedimų sudarė gedimai pačio kabelio viduje, 16% jungiamosiose ir pereinamosiose movose, 18% galinėse movose ir 9% kituose komponentuose (žr. pav. 7) [11].



7 pav. 2006-2015 m. AĮ kabelių vidinių gedimų pasiskirstymas

Ir 82% visų išorinių gedimų yra priskiriama prie trečiosios šalies padarytų mechaninių pažeidimų kabeliui ir likę 18% - kitiems išoriniams gedimams (žr. pav. 8) [11].



8 pav. 2006-2015 m. AĮ kabelių išorinių gedimų pasiskirstymas

Taip pat buvo pastebėti šie gedimų dažnumai skirtingų konstrukcijų kabeliuose [11]:

- Alyvinių kabelių gedimų dažnumas yra apytiksliai dvigubai didesnis nei kabelių su XLPE izoliacija.
- Kabeliai su EPR izoliacija (etileno-propileno gumos izoliacija, angl. EPR – *Extruded Ethylene Propylene Rubber*) ir HPOF kabeliai (aukšto slėgio alyva pripildyti kabeliai, angl. HPOF - *High-Pressure Oil-Filled cables also known as High-Pressure Fluid-Filled (HPFF) cables*) pasižymi 4 kartus dažnesniais gedimais nei kabeliai su XLPE izoliacija.
- Kabeliai su PE izoliacija (žemo tankio polietilenas, angl. PE - *Extruded Low density thermoplastic polyethylene*) turi labai aukštą gedimų dažnį. Jie genda apie 20 kartų dažniau nei kabeliai su XLPE izoliacija.
- Kad 2015 m. duomenimis, bendras kabelių su XLPE visų gedimų skaičius padidėjo apie 30%, o alyviniams kabeliams padidėjo 50% nei buvo nustatyta 2009 m. parengtoje ataskaitoje.
- Kabelių su XLPE izoliacija gedimai dėl išorinių pažeidimų sumažėjo apie 40% nei buvo nustatyta 2009 m. parengtoje ataskaitoje. Tai rodo labiau išvystytą geografinę informacinę sistemą (GIS), kurioje tiksliau nurodomas kabelis ir papildomas kabelių apsaugos priemonės, t.y. signalinė juosta, apsauginiai vamzdžiai, apsauginės plokštės ir kt.

Didžioji dalis gedimų, kabeliuose su XLPE izoliacija, atsiranda per pirmus 10 eksploatavimo metų, o daugiausia jų atsiranda per pirmus 2-3 eksploatavimo metus [11].

Iš apklausos surinktų duomenų gauta, kad yra įrengta 1530 km AĮKS povandeninių kabelių ir 5567 km AĮNS povandeninių kabelių [11].

2006-2015 metų laikotarpyje iš viso buvo užfiksuoti 22 gedimai. 8 gedimai buvo užfiksuoti AĮNS povandeniniams kabeliams ir 14 gedimų – AĮKS kabeliams. Didžiausią dali gedimų sudaro išoriniai

pažeidimai dėl inkaro smūgio. Apie 89% kabelių gedimų atsiranda dėl neapsaugoto kabelio. Visi apklausos dalyvių surinkti duomenys rodo, kad kabelių gedimai dėl išorinių pažeidimų atsiranda kabeliams, kurie yra senesni nei 10 metų. 67% kabelių gedimų dėl tų pačių priežasčių, atsiranda kabeliams senesniems nei 30 metų, tai rodo, kad naujesni povandeniniai kabeliai yra labiau apsaugoti nuo išorinių pažeidimų [11].

Toliau pateikiama lentelė (žr. lent. 1), kurioje yra 2006-2015 metų surinkti duomenys apie įvairius aukštosios įtampos kabelius ir jų gedimų skaičių, 2 lentelėje pateikiamas gedimų skaičius per km, per metus (žr. lent. 2) [11].

1 lentelė. 2006-2015 m. užfiksuoti sausumos kabelių gedimai [11]

Kabelio tipas	Gedimo tipas	Sugedęs komponentas				
		Kabelis	Jung. arba pereinam. mova	Galinė mova	Kita	Iš viso:
Kabeliai su XLPE izoliacija (kintamos srovės)	Bendras skaičius	204	61	109	29	406
	Vidinis gedimas	125	58	95	11	289
	Išorinis gedimas	68	1	7	9	85
	Nenurodytas gedimas	10	2	6	9	28
Alyviniai kabeliai (kintamos srovės)	Bendras skaičius	137	50	23	35	245
	Vidinis gedimas	56	46	21	15	138
	Išorinis gedimas	81	3	2	16	102
	Nenurodytas gedimas	-	1	-	4	5
Kabeliai su PE izoliacija (kintamos srovės)	Bendras skaičius	28	2	-	-	31
	Vidinis gedimas	7	1	-	-	8
	Išorinis gedimas	3	-	-	-	3
	Nenurodytas gedimas	18	1	-	-	20
Aukšto slėgio alyviniai kabeliai – HPOF (kintamos srovės)	Bendras skaičius	29	2	1	3	35
	Vidinis gedimas	13	1	-	1	15
	Išorinis gedimas	16	1	1	2	20
	Nenurodytas gedimas	-	-	-	-	-
Dujiniai kabeliai (kintamos srovės)	Bendras skaičius	7	2	2	-	11
	Vidinis gedimas	7	2	2	-	11
	Išorinis gedimas	-	-	-	-	-
	Nenurodytas gedimas	-	-	-	-	-
Kabeliai su EPR izoliacija (kintamos srovės)	Bendras skaičius	16	3	1	-	20
	Vidinis gedimas	8	3	1	-	12
	Išorinis gedimas	8	-	-	-	8
	Nenurodytas gedimas	-	-	-	-	-
Alyvos impregnuoti uždari kabeliai (nuolatinės srovės)	Bendras skaičius	-	-	-	1	1
	Vidinis gedimas	-	-	-	1	1
	Išorinis gedimas	-	-	-	-	-

	Nenurodytas gedimas	-	-	-	-	-
Ekstruzijos būdu pagaminti kabeliai (nuolatinės srovės)	Bendras skaičius	-	1	-	-	-
	Vidinis gedimas	-	1	-	-	-
	Išorinis gedimas	-	-	-	-	-
	Nenurodytas gedimas	-	-	-	-	-
Bendras sugedusių komponentų skaičius:		420	121	135	68	744

2 lentelė. Kabelio tipų, kintamos srovės, bendras gedimų tipų dažnumas (dažnumas/per 100 km/per metus) [11]

Kabelio tipas	Visų įtampų	60 - 109 kV	110 - 219 kV	220 - 314 kV	315 - 499 kV	≥500 kV
Kabeliai su XLPE izoliacija	0,111 21538 km / 204 gedimų	0,0939 12848 km / 107 gedimų	0,108 6359 km / 55 gedimų	0,269 1874 km / 40 gedimų	0,102 344 km / 2 gedimų	0 114 km / 0 gedimų
Alyviniai kabeliai	0,224 6123 km / 137 gedimų	0,0426 1885 km / 8 gedimų	0,352 3105 km / 109 gedimų	0,140 863 km / 12 gedimų	0,376 213 km / 8 gedimų	0 58 km / 0 gedimų
Aukšto slėgio alyviniai kabeliai – HPOF	0,436 681 km / 29 gedimų	1,45 148 km / 21 gedimų	0 127 km / 0 gedimų	0,209 394 km / 8 gedimų	0 12 km / 0 gedimų	-
Dujiniai kabeliai	0,157 450 km / 7 gedimų	0 9 km / 0 gedimų	0,163 433 km / 7 gedimų	0 7 km / 0 gedimų	-	-
Kabeliai su EPR izoliacija	0,373 452 km / 16 gedimų	0,567 75 km / 4 gedimų	0,305 376 km / 11 gedimų	-	0 1 km / 0 gedimų	-
Kabeliai su PE izoliacija	2,649 106 km / 28 gedimų	0,641 31 km / 2 gedimų	3,49 75 km / 26 gedimų	-	-	-

Kabelių ar jo komponentų gedimų dažnumas apskaičiuojamas pagal (1.2.1) formulę [11]:

$$\text{Gedimo dažnumas} = \frac{\sum_{i=1}^{10} N_i}{\sum_{i=1}^{10} A_i} \cdot 100; \quad (1.2.1)$$

čia Gedimo dažnumas – sugedusių kabelių skaičius per 100 km/per metus arba sugedusių kabelių komponentų skaičius per 100 komponentų/per metus;

N_i – kabelio arba jo komponentų gedimų skaičius per pasirinktą laikotarpį;

A_i – Eksploatuojamų kabelių arba jo komponentų skaičius per pasirinktą laikotarpį;

Iš lentelių pastebima, kad kintamos srovės sistemoje, kabeliai su XLPE izoliacija yra patvaresni ir mažiau gendantys nei kiti kabelių tipai.

1.2.1. Kabelių linijų gedimai

Kabelių gedimai skirstomi į kelis faktorius, kurie juos pažeidžia arba mažina galimą eksploatavimo laiką (žr. lent. 3). Šie faktoriai sukelia neatstatomus pokyčius pačio kabelio struktūroje ir jo izoliacijoje. Kai kurie faktoriai gali iššaukti ir tuos pačius pažeidimus.

3 lentelė. Kabelių gedimų faktoriai [12]

Terminis poveikis	Elektrinis poveikis	Aplinkos poveikis	Mechaninis poveikis
Maksimali temperatūra	Įtampa	Dujos (oras, deguonis ir kt.)	Lenkimas
Žema arba aukšta aplinkos temperatūra	Dažnis	Vanduo arba drėgmė	Tempimas
Temperatūros svyravimai	Srovė	Korozinės cheminės medžiagos	Suspaudimas
		Radiacija	Sukimas
			Vibracija

1. Terminio poveikio sukelti gedimai ir pasekmės:

Per žema temperatūra kabelyje ar jo komponentuose:

Dėl per žemos temperatūros gali atsirasti įtrūkimai kabelyje ar jo komponentuose, sluoksnių atsiskyrimas, dujų ar skysčių pratekėjimas.

Viršyta maksimali leistina temperatūra, temperatūros svyravimai arba kabelyje ar jo komponentuose:

Dėl šių galimų temperatūrų poveikių gali atsirasti cheminės reakcijos, komponentų nesuderinamumas, kabelio struktūrinių komponentų išsiplėtimas, difuzija, mechaninių jungčių atsilaisvinimas, izoliacijos lydymasis.

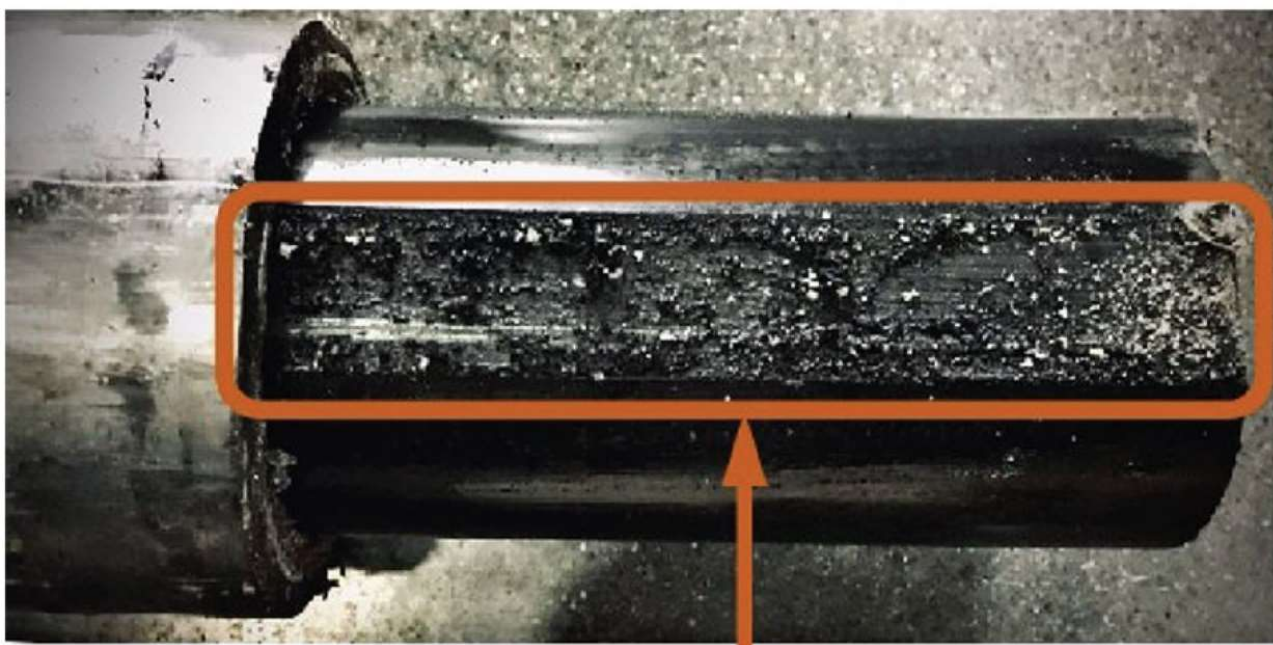
Pasekmės, kurios gali atsirasti kabeliuose ar jų komponentuose:

- Kabelio struktūros ar jo komponentų sukietėjimas, suminkštėjimas, mechaninio atsparumo sumažėjimas.
- Dielektrinių nuostolių $\tan \delta$ padidėjimas.
- Medžiagų (sluoksnių) susitraukimas ar atsiskyrimas.
- Išsipūtimas,
- Skysčių, dujų pratekėjimas.
- Minkštų dėmių ar raukšlių susidarymas.

Kai aukštosios įtampos kabelis yra darbiname režime, jo laidininko temperatūra negali viršyti maksimalios izoliacijos temperatūros. Kabelių su XLPE izoliacija, izoliacijos maksimali temperatūra yra 130 °C, bet tai priklauso dar ir nuo kabelių gamintojo ir jo deklaruojamos maksimalios izoliacijos temperatūros. Dažniausiai projektuojant naujas kabelių linijas yra numatoma ilgalaikė kabelių darbinė temperatūra – 60-75 °C, įvertinant rezervą ateities plėtrai. Kai kuriais atvejais kabelio apkrova gali padidėti ir tai sudaryti laidininko temperatūros padidėjimą. Įvairūs kiti veiksniai, kaip staigūs įtampos šuoliai, trumpasis jungimas, padidėjusi kontaktų varža, taip pat gali įtakoti kabelio temperatūrą. Tai paveikia kabelio ar jo komponentų ilgaamžiškumą pagreitinant senėjimą [13].

9 paveikslėlyje pavaizduotas didelės temperatūros paveiktą 110 kV kabelį (žr. pav. 9). Šiuo atveju, 110 kV kabelio XLPE izoliacijos maksimali leistina temperatūra – 90 °C, o laidininko darbinė temperatūra – 60 °C. Per 30 min. laidininko temperatūra pakilo nuo 60 °C iki 120 °C. Dėl padidėjusios

temperatūros laidininke, atsiskyrė kabelio struktūros sluoksnis ir susidarė oro tarpas tarp sluoksnių. Oro tarpe susidarė aukšta temperatūra ir dėl to pradėjo lydėtis izoliacija [13].



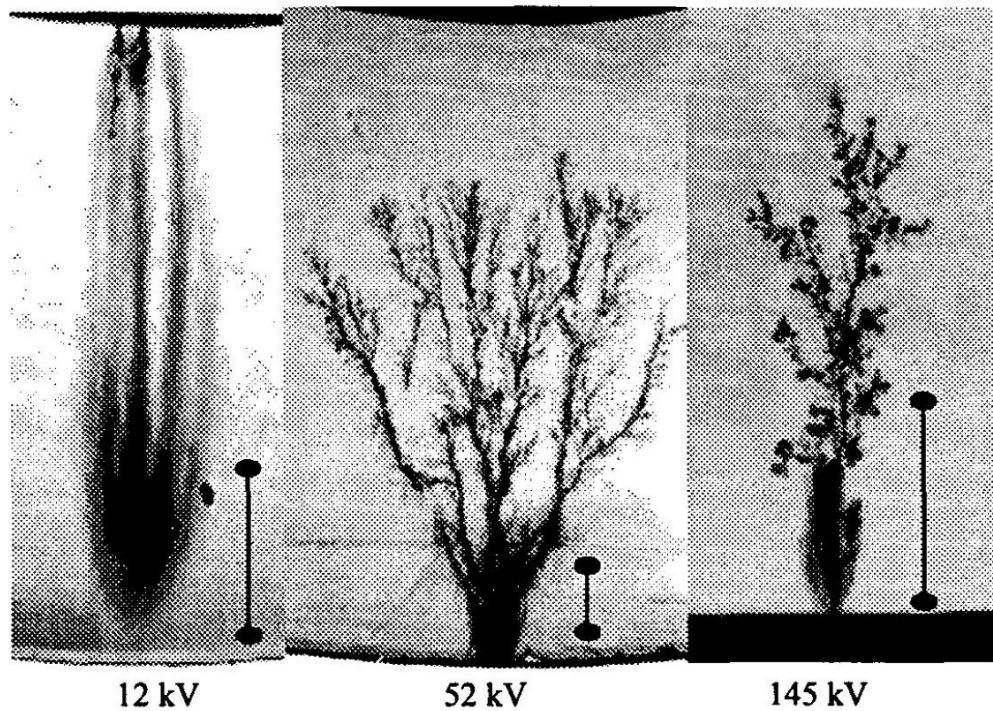
9 pav. 110 kV kabelio izoliacijos pažeidimas dėl padidėjusios temperatūros laidininke [13]

2. Elektrinio poveikio sukelti gedimai ir pasekmės:

Elektrinio poveikio sukelti gedimai gali atsirasti nuo įtampos, įtampos šuolių ar srovės. Įtampa ir srovė iššaukia skirtingus kabelio ar jo komponentų gedimus. Per didelę įtampa ar įtampos šuoliai gali sukelti dalinius išlydžius, vandens medžius (angl. *water treeing*), elektros medžius (angl. *electrical treeing*), dielektrinius nuostolius, o tai iššaukia tokias pasekmes [12]:

- Izoliacijos erozija.
- Padidintus nuostolius perduodant el. energiją.
- Padidintą temperatūrą, terminį senėjimą.
- Staigų kabelio gedimą.

Vienas iš pagrindinių ir ilgai eksploatuojamų XLPE kabelių gedimų yra vandens medžiai (žr. pav. 10). Vandens medžiai yra labai mažos medžio formos, drėgmės ir jonų priemaišų dariniai, kurie atsiranda XLPE kabelio izoliacijoje ir plinta veikiami elektriniam laukui. Kai vandens medžiai auga ir tankėja, jie blogina izoliacijos savybes ir didina dielektrinius nuostolius [14].

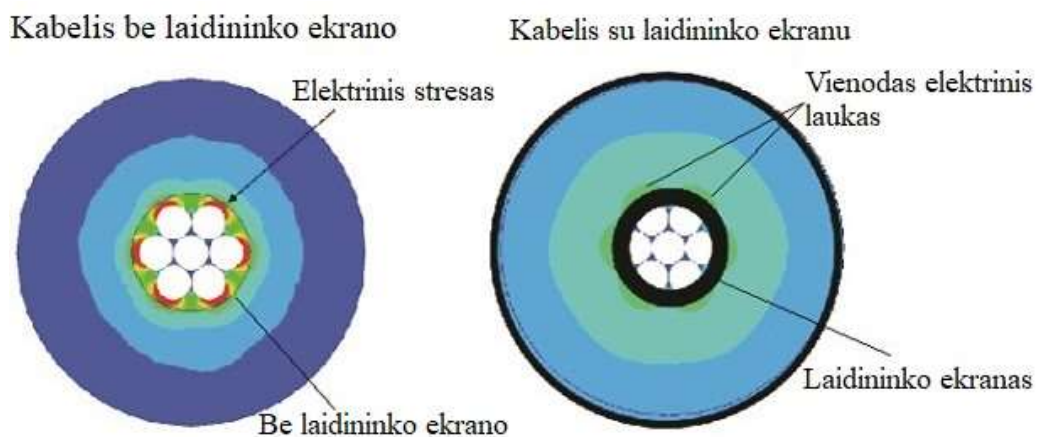


10 pav. Tipinio vandens medžio fotografija skirtingų įtampų XLPE kabelių izoliacijoje [14]

Laikui bėgant vandens medžiai gali virsti elektriniais medžiais. Elektros medžių formavimasis taip pat gali vystytis greičiau, jei kabelis yra veikiamas aukštos temperatūros. Jei kabelis bet kurį laiką eksploatuojamas viršijant jo vardinę įtampą, drastiškai padidėja pavojus vandens medį paversti elektriniu medžiu. Kai suformuoja elektrinis medis, tada atsiranda neišvengiamas kabelio gedimas [14].

Elektrinis medis atsiranda, kai izoliacija yra ilgą laiką veikiamą didelio elektrinio streso. Dažniausiai pastebima, kad elektriniai medžiai pirmiausia atsiranda tose vietose, kur yra oro tarpai, izoliacijos priemaišos, mechaniniai defektai. Tokiose vietose atsiranda maži daliniai išlydžiai, kurie pradeda formuoti elektrinį medį.

Elektrinis stresas yra viena iš priežasčių, kuri sendina kabelį ir silpnina kabelio dielektrines savybes. 11 paveikslėlyje pavaizduotas elektrinio streso ir elektrinio lauko poveikis kabeliui, kai kabelis yra su laidininką gaubiančiu puslaidininkiu sluoksniu ir be jo (žr. pav. 11).



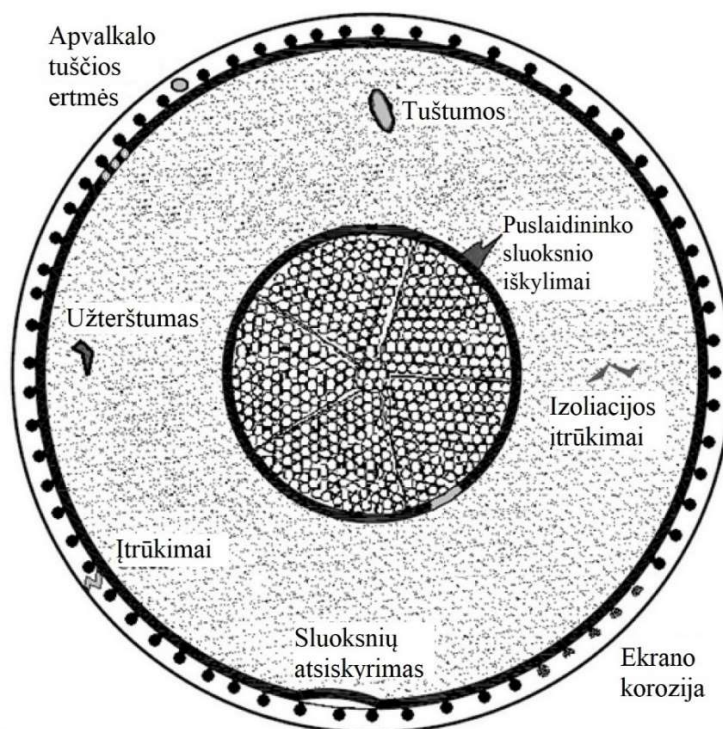
11 pav. Elektrinio streso ir elektrinio lauko poveikis kabeliui

Iš 11 paveikslėlio pastebima, kad kabelio izoliacija patiria didesnę elektrinį stresą, kai nėra laidininką gaubiančio puslaidininkio sluoksnio.

Elektrinio streso padidėjimas gali atsirasti ir dėl kitų priežasčių:

- Gamybos metu atsiradę nepastebimi defektai: tai padidina elektrinį stresą, pagreitina kabelio senėjimą ir gali iššaukti kabelio gedimus. Į juos įeina:
 - Tuštumos.
 - Pusalaidininkų nelygumai, kurie pasiskirsto netolygiai su izoliacija.
 - Izoliacijoje atsiradusios priemaišos.
- Prastas montavimas:
 - Įpjovimai.
 - Kabelio komponentų užteršimas montuojant.
 - Kabelio komponentų dalių pametimas arba nepilnas jų surinkimas.
 - Kabelio komponentų nesilaikant gamintojo nurodytų matmenų, montavimo kampų ir pan.

Tipiniai defektai dėl kurių gali atsirasti kabelio gedimas pavaizduoti 12 paveikslėlyje (žr. pav. 12). Į šiuos defektus įeina puslaidininko sluoksnio nelygumai (iškylimai), tuštumos, įtrūkimai, užterštumas ir kabelio struktūrinių sluoksnių atsiskyrimas [15].



12 pav. Tipiniai kabelio defektai [15]

Taip pat prie elektrinio poveikio yra priskiriami ir staigūs įtampos šuoliai, kuriuos sukelia atmosferiniai viršįtampiai – žaibo išlydis.

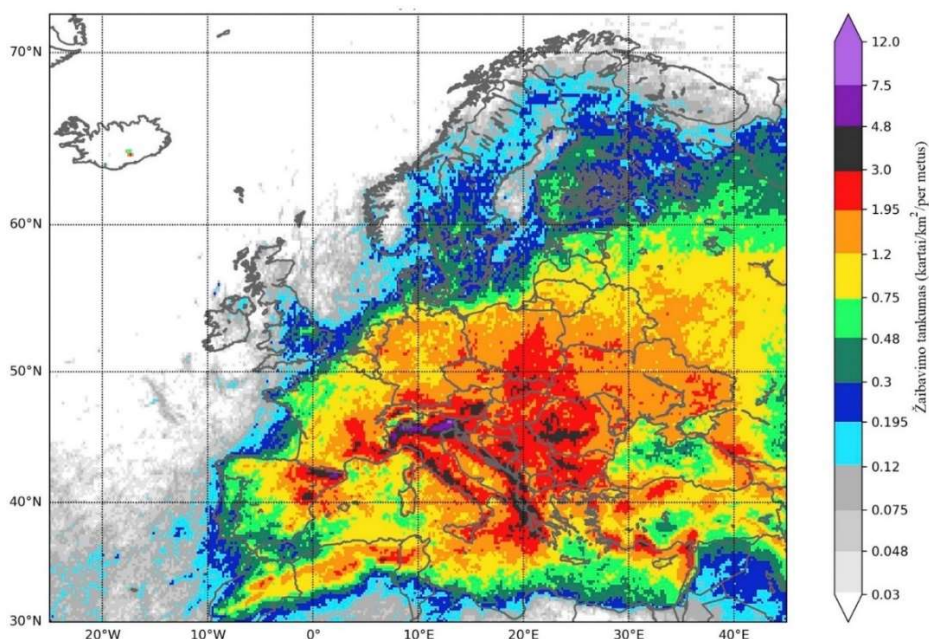
Žaibas – tai galingas aukšto potencialo elektros energijos išlydis [16 p. 13]. Jis susidaro atsiradus skirtingiems potencialams tarp įsielektrinusią audros debesų ir žemės, tarp gretimų debesų ir tame pačiame debesyje [16 p. 13].

Žaibo išlydis yra kaip didelė kibirkštis, kuri atsiranda atmosferoje tarp debesų, oro ar žemės. Žaibas susiformuoja iš debesyse esančių elektrinių teigiamų ir neigiamų krūvių, o oras veikia kaip izoliatorius. Kai susikaupia pakankamai teigiamų ir neigiamų elektros krūvių, oras nebepajėgia veikti kaip izoliatorius ir tada atsiranda staigi ir didelė elektros iškrova – žaibo išlydis.

Žaibo išlydžio srovė būna nuo 5 kA ir gali pasiekti iki 200 kA. Tiesioginis šio reiškinio smūgis sukelia didelius nuostolius, gaisrus, smūgio bangas ir žmonių ar gyvūnų gyvybių praradimus. Kitas efektas, kurį sukelia žaibo išlydis, tai įtampos šuoliai, kurie yra pavojingi elektros ir elektronikos prietaisams [17].

Aukštosios įtampos kabeliams šis reiškinys yra pavojingas, nes tai gali pažeisti kabelio izoliaciją.

11 paveikslėlyje pavaizduotas 2008-2017 m. Europoje užfiksuotas žaibavimo tankumas (žr. pav. 12). Iš paveikslėlio (žr. pav. 12) pastebima, kad vakarų Lietuvoje ir kai kuriose pavienėse vietovėse, žaibavimo tankumas siekia 1,2-1,95 (kartai/km²/per metus), o likusioje Lietuvos dalyje 0,75-1,2 (kartai/km²/per metus) [18].



13 pav. Žaibavimo dažnumas Europoje 2008-2017 metais [18]

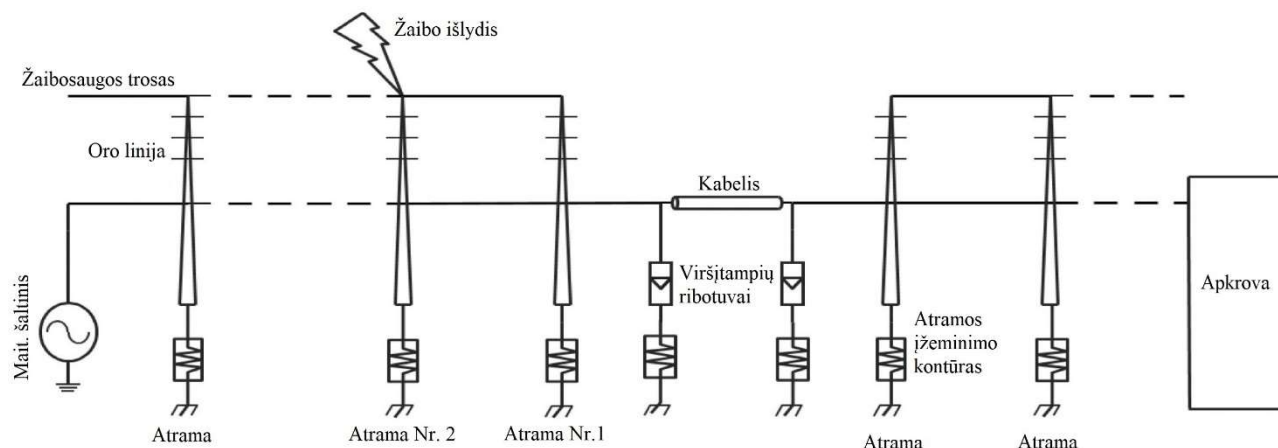
Pagal „Cigre“ statistinius duomenis žaibo išlydis yra priskiriamas prie išorinių gedimų, kurie sudaro 29 % visų gedimų, iš kurių tik 3 % yra priskiriami gamtos reiškiniams. Aukštosios įtampos kabelių gedimai dėl gamtos reiškinių yra reti.

S. A. Ledari ir M. Mirzaie publikuotame straipsnyje [19] nagrinėjo žaibo išlydžio sukeltą indukuotą įtampą 132 kV kabelio ekrane.

Žaibo smūgio poveikis oro linijoms sukuria bangą, kuri persiduoda į kabelį prijungtą prie oro linijos. Kai ši banga pasiekia oro linijos ir kabelio sujungimą (galines movas), tada dalis šios bangos atsispindi o kita dalis keliauja į kabelį. Šis reiškinys indukuoja įtampą kabelio ekrane, o tai gali sukelti

energijos nuostolius, sumažinti kabelio pralaidumą, padidinti kabelio temperatūrą, pažeisti kabelio izoliaciją ir kt [19].

Straipsnyje buvo tiriama kombinuota oro/kabulių linija (žr. pav. 14), kurios įtampa – 132 kV, dažnis – 50 Hz, o linijos apkrova – 174,44 MW. Tarpatriamių ilgiai – 200 m. ir kabulių linijos intarpo ilgis – 1000 m. [19].



14 pav. Kombinuotos oro/kabulių linijos modelio vaizdas [19]

Modeliavimas buvo atlikta su prielaida, kad žaibo išlydžio srovė yra 200 kA ir ji pataiko į žaibosaugos trosą. Indukuota įtampa buvo matuojama gabelio pradžioje, 33 % kabelio ilgyje, 66 % kabelio ilgyje ir kabelio gale.

Modeliavimo rezultatai parodė, kad indukuota įtampa mažėja, kabulių ekrane, kai kabelio ilgis didėja ir vienas kabulių linijos galas yra įžemintas. Rezultatai parodė, kad oro linijų atramų įžeminimo kontūro varžo sumažinimas taip pat mažina indukuotą įtampą. Taip pat, rezultatai parodė, kad didžiausią įtaką indukuotai įtampai daro – ekrano įžeminimas.

3. Mechaninio poveikio sukelti gedimai ir pasekmės:

Mechaninio poveikio sukelti gedimai gali atsirasti nuo blogai nutiestų linijų, blogai sumontuotų movų ar trečiųjų šalių padarytu mechaninių pažeidimų kabeliui. Šie gedimai atsiranda per stipriai tempiant kabelį, lenkiant jį neleidžiamu spinduliu, dėl vibracijos, per didelio lankstymo ir kt. Tai sukelia kabelio sluoksnių atsiskyrimą, įtrūkimus, įplyšimus, kabelio nutraukimą.

Dažniausiai aukštosios įtampos kabeliai yra pažeidžiami trečiųjų šalių. 15 paveikslėlyje pavaizduotas pažeistas aukštosios įtampos kabelis (žr. pav. 15). Jis buvo pažeistas, kai ekskavatorius kasė tranšėją. Šio kabelio pagrindinė pažeidimo priežastis – nebuvo tikslių duomenų, kur buvo paklotas esamas kabelis.



15 pav. Ekskavatoriaus pažeistas aukštosios įtampos kabelis [20]

Kitame paveikslėlyje (žr. pav. 16) pavaizduotas blogai supilta jungiamosios movos izoliacija. Paveikslėlyje matosi, kad vyko daliniai išlydžiai, kurie galėjo atsirasti dėl oro tarpų. Pagrindinė šio kabelio gedimo priežastis – neapmokytas movų montuotojas [21].



16 pav. Blogai sumontuotos jungiamosios movos pasekmės [21]

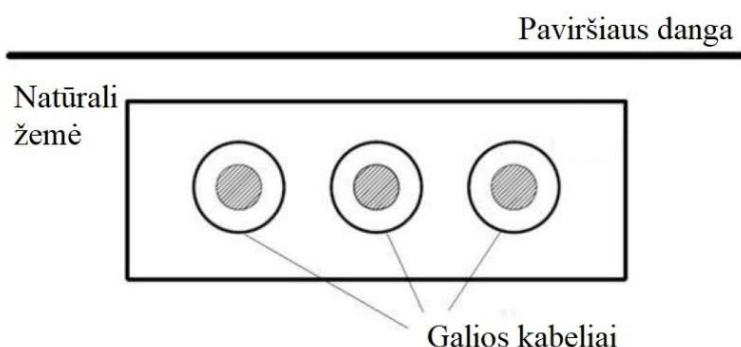
4. Aplinkos poveikio sukelti gedimai ir pasekmės:

Aplinkos poveikiui priskiriamas radiacijos poveikis, dirvožemio užterštumas, dirvožemio terminis laidumas, vanduo, drėgmė, dujos ir skysčiai. Jų poveikis sukelia dielektrinius nuostolius, koroziją, vandens medžius, pagreitintas chemines reakcijas, kurios sendina kabelį.

Vienas iš svarbių aspektų įrenginėjant kabelių liniją yra dirvožemio terminis laidumas. Blogas dirvožemio terminis laidumas gali padidinti kabelio darbinę temperatūrą ir net viršyti didžiausią leistiną.

M. Rerak ir P. Oclon publikuotame straipsnyje [22] nagrinėjo natūralios žemės terminio laidumo įtaką aukštosios įtampos kintamos srovės kabelių linijai su XLPE izoliacija ir variniu laidininku.

Jų sukurtame modelyje, kabeliai buvo pakloti plokštumos formoje (vienas šalia kito) (žr. pav. 17), 2 m gylyje ir 0,4 m atstumu vienas nuo kito [22].

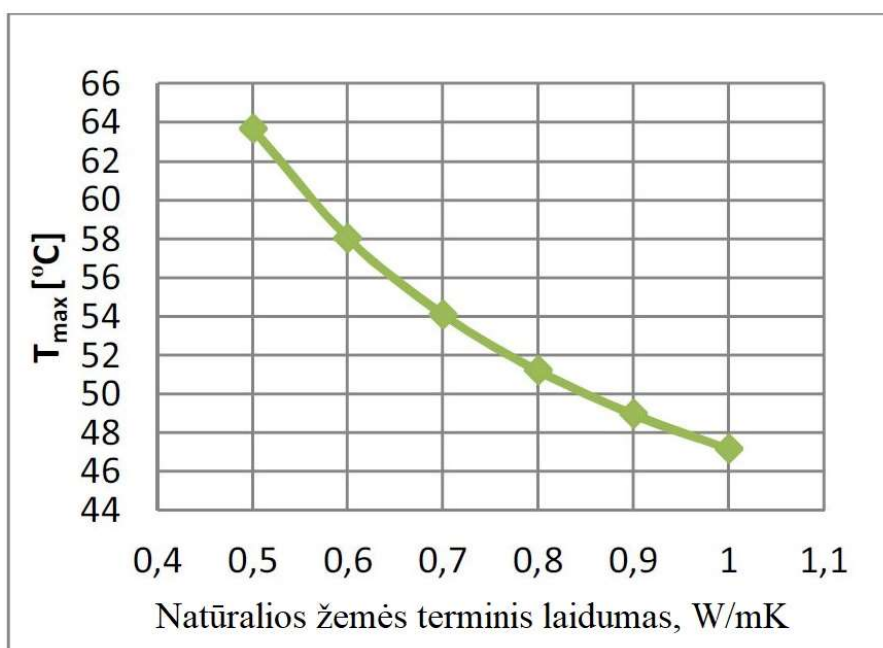


17 pav. Galios kabeliai vienoje plokštumoje [22]

Viena analizė buvo daryta, kai kabeliai užkasti natūralioje žemėje, o kita – termolaidžiu smėliu.

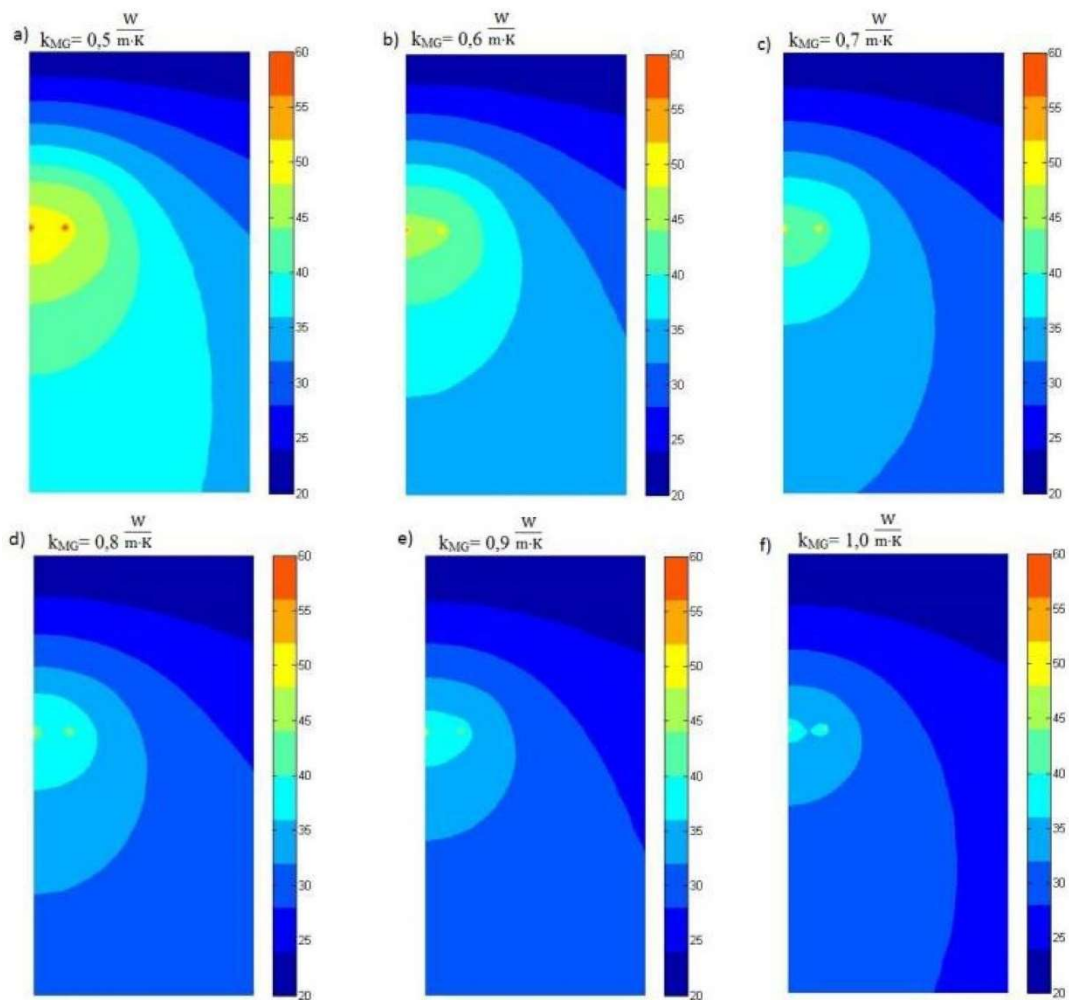
Atlikta terminė analizė parodė, kad žemės terminis laidumas yra svarbus faktorius vertinant kabelių klojimą. Natūralios žemės pakeitimas į termolaidų smėlio ir cemento mišinį gali sumažinti kabelio laidininko temperatūrą iki 14 °C [22].

18 paveikslėlyje pavaizduota laidininko temperatūros priklausomybė nuo natūralios žemės terminio laidumo (žr. pav. 18). Paveikslėlyje pastebima, kad laidininko temperatūra siekia beveik 64 °C, kai natūralios žemės terminis laidumas – 0,5 W/mK.



18 pav. Varinio laidininko temperatūros priklausomybė nuo natūralios žemės terminio laidumo [22]

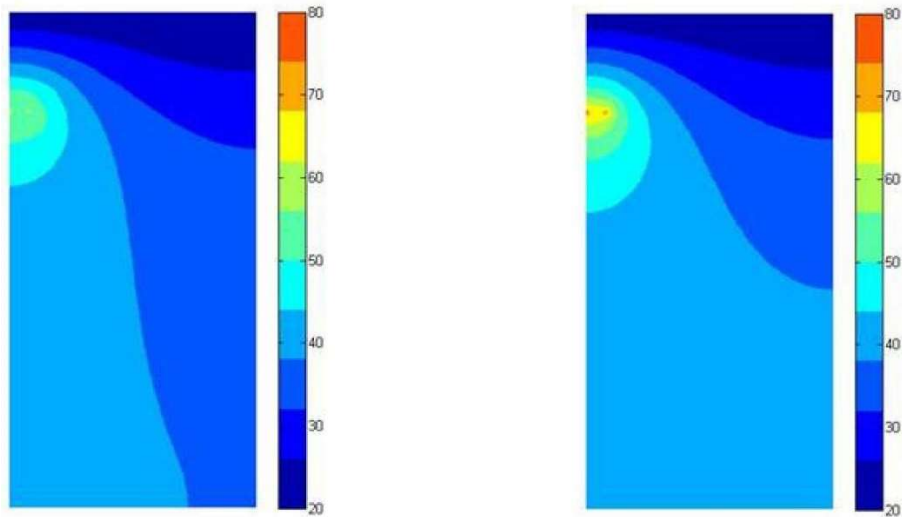
Sekančiame paveikslėlyje pavaizduotas temperatūros pasiskirstymas skirtingam žemės terminiam laidumui (žr. pav. 19).



19 pav. Temperatūros pasiskirstymas skirtingam žemės terminiam laidumui [22]

Dažnai žemės terminis laidumas skiriasi dėl visokių priemaišų joje, todėl skirtingose kabelio klojimo vietose gali būti skirtingas terminis laidumas ir skirtingose kabelio laidininko vietose – skirtingos temperatūros. Žemės terminis laidumas taip pat keičiasi dėl drėgmės lygio. Esant drėgnai žemei – terminis laidumas yra didesnis nei sausoje [22].

Kitame paveikslėlyje (žr. pav. 20) parodytas temperatūros pasiskirstymas, kai kabeliai yra užpilti termolaidžiu smėlio ir cemento mišiniu, kurio terminis laidumas 3 W/mK ir, kai kabeliai užpilti natūralia žeme, kurios terminis laidumas $0,5 \text{ W/mK}$ (žr. pav. 19) [22].



20 pav. Temperatūros pasiskirstymas, kai kabeliai užpilti smėlio ir cemento mišiniu (kairėje), kabeliai užpilti natūralia žeme (dešinėje) [22]

Šis temperatūros pasiskirstymas parodo, kad kabelio laidininko temperatūra būtų pasiekusi 77,53 °C, kai yra naudojama natūrali žemė, o tai jau viršija optimalią kabelio laidininko darbinę 65 °C temperatūrą. O kai kabelis yra užpilamas termolaidžiu smėlio ir cemento mišiniu, jo laidininko temperatūra sumažėja 14 °C.

2. Tiriamoji dalis

Pasaulyje didėjant aukštosios įtampos kabelių linijų poreikiui, didėjo ir būtinybė išsiaiškinti šių linijų galimus pereinamuosius vyksmus. Visų pirma, nutiesus ilgas ir sudėtingas kabelių linijas, gali atsirasti reiškiniai, kaip rezonansiniai viršįtampiai, kurie gali įtakoti sistemos darbą [1].

Šiame darbe tiriama 110 kV kombinuotos oro/kabelių linijos prognozuojami atmosferinių viršįtampių pereinamieji vyksmai ir jų galimas poveikis aukštosios įtampos kabeliams.

2.1. Viršįtampių pereinamųjų vyksmų matematiniai modeliai

Žaibo išlydžio sukelti impulsai elektromagnetinės aukštų potencialų bangos linijose sukelia viršįtampių pereinamuosius vyksmus. Elektromagnetinės bangos sklisdamos linijomis, pasiskirsto banginiuose kanaluose tarp laidų ir tarp laidų bei žemės. Atsklidusios į pastotę žaibų sukurtos bangos iš tolimų linijos vietų turi švelnesnius pailgėjusius frontus bei žemesnes įtampų amplitudes ir yra mažiau pavojingos pastotės įrenginiams. Be to, bangų frontus švelnina ir prailgina intensyvūs vainikiniai išlydžiai tarp laidų ir linijos apsauginių laidų (trosų). Pereinamuosius bei stacionarius elektrinius vyksmus linijose lemia elektromagnetinių laukų kaitos procesai laiduose ir laidų išorėje, tame tarpe ir žemėje.

2.1.1. Elektros oro linijų modeliai

Linijos varžos (impedanso) išraiškos susietos su elektriniu ir magnetiniu laukais laido kryptimi Maksvelo lygtimis [23]. Nuosavąjį k -ojo laido žemės impedansą aprašo Carson'o integralas [23]:

$$Z_{gk} = \frac{j\omega\mu_o}{\pi} \cdot \int_0^\infty \frac{e^{-2h_k u}}{\sqrt{u^2 + j\omega\mu_o\sigma_g + u}} \cdot du; \quad (2.1.1.1)$$

tarpusavio žemės impedansą tarp i -ojo bei k -ojo laidų:

$$Z_{gik} = \frac{j\omega\mu_o}{\pi} \cdot \int_0^\infty \frac{e^{-2(h_i+h_k)u} \cdot \cos(b_{ik}u)}{\sqrt{u^2 + j\omega\mu_o\sigma_g + u}} \cdot du; \quad (2.1.1.2)$$

čia h_i ir h_k – i -ojo ir k -ojo laidų aukštis (žr. pav. 1.1);

b_{ik} – atstumo tarp i -ojo ir k -ojo laidų projekcijos vertė laido kryptimi [23];

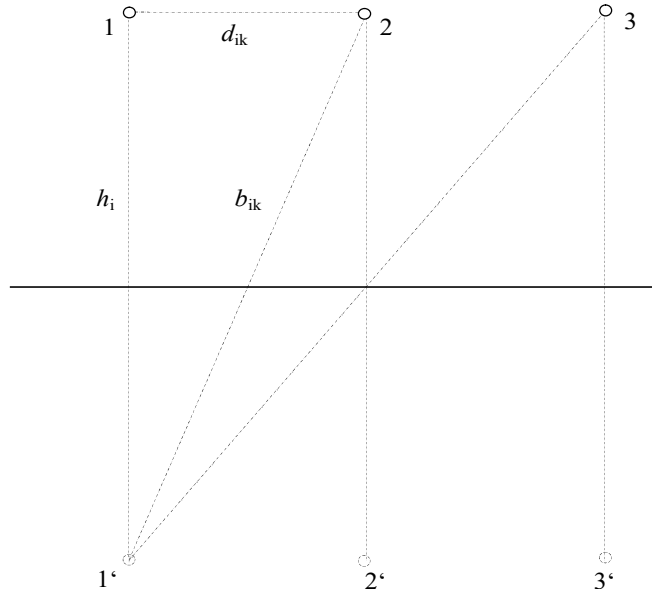
μ_o ir σ_g – magnetinė oro konstanta ir grunto savitasis laidumas [23];

Elektromagnetinius viršįtampių pereinamųjų vyksmų formą ir lygį lemia daugkartiniai atsklidusių linijomis bangų atspindžiai nuo įrenginių bei atsisakojimų [38]. Bangų atspindėjimo ar lūžio savybes, atspindžio ar lūžio koeficientus, lemia linijų ar šynų banginės varžos. Šios savo ruožtu priklauso nuo linijų ir šynų specifinių impedansų bei laidžių, taigi nuo laidų išsidėstymo ore bei laidų ir žemės specifinių varžumų [38].

Laidų išsidėstymą ore lydi specifiniai impedansų ir laidžių „idealios be energijos nuostolių linijos“ dydžiai, nepriklausantys nuo grunto ar laidų specifinių varžumų.

„Idealos linijos“ specifiniai impedansai:

$$\begin{cases} Z_{ok} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_k}{r_{ek}}, \\ Z_{oik} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}; \end{cases} \quad (2.1.1.3)$$



21 pav. Linijos geometriniai parametrai

čia h_k – laido pakabinimo aukštis; d_{ks} – atstumas tarp laidų; b'_{ks} – atstumas tarp veidrodinio atspindžio ir gretimio laido; k, s – laidai; k' – veidrodinis atspindys.

Specifiniai laidžiai matricoje:

$$Y = j\omega (\alpha_{ik})^{-1}; \quad (2.1.1.4)$$

čia α_{ik} – potencialiniai koeficientai:

$$\begin{cases} \alpha_k = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_k}{r_{ek}}, \\ \alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}; \end{cases} \quad (2.1.1.5)$$

Viršįtampius linijos laiduose elektromagnetinių vyksmų metu formuoja lūžusios bangos, kurių dydį lemia banginių varžų santykiai. Bangai pereinant iš linijos (1) su mažesne bangine varža į liniją (2) su didesne bangine varža įtampa padidėja tiek kartų, koks yra lūžio koeficientas:

$$k_{12} = \frac{2 \cdot W_2}{W_1 + W_2};$$

čia W_1 ir W_2 – linijų atkarpų (1) ir (2) banginės varžos.

Todėl, elektromagnetinei bangai pasiekus linijos atkarpos galą ji sukuria dvigubos įtampos potencialą nei bangos įtampa, nes lūžio koeficientas linijos galui yra 2:

$$k_{10} = \lim_{W_2 \rightarrow \infty} \frac{2 \cdot W_2}{W_1 + W_2} = 2;$$

Oro linijos laido banginę varžą lemia laido aukštis virš žemės paviršiaus, laido ekvivalentinis spindulys bei grunto lyginamoji varža.

Linijos atkarpos su vienodais talpos ir induktyvumo parametrais laido banginės varžos dydį apibūdina išraiška:

$$W = \sqrt{\frac{Z}{Y}}; \quad (2.1.1.6)$$

čia Z ir Y – laido savitieji parametrai varža ir laidis.

Banginė varža prie mažesnio laido spindulio yra didesnė, nes savitoji talpa ir talpos laidis yra mažesni. O didėjant laido aukščiui, didėja srovės tekančios laidu bei grįžtančios žeme kelio kilpa ir didėja tokios srovės kilpos induktyvumas bei laido savitasis varžumas.

Trifazėje elektros sistemoje elektromagnetinės bangos linijose ir pastočių šynose plinta banginiais kanalais: tarplaidiniais bei tarp laidų ir žemės [38]. Skirtinguose kanaluose sklisdamos bangos keičiasi skirtingai: kanale tarp laidų ir žemės bangos slopsta intensyviau lyginant su tarplaidiniais kanalais. Banginius kanalus ir juose vykstančius vyksmus apibūdina kanalų (sekų arba modų) banginės varžos, perdavimo funkcijų dažninės charakteristikos bei įtampos ir srovės bangoje kaitos pereinamoji charakteristika [38 p. 62].

Elektromagnetinius vyksmus daugialaidėje linijoje kompleksinėmis fazinėmis įtampomis ir srovėmis aprašo telegrafinės lygtys:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} \underline{U}_f = P_f \underline{U}_f, \\ \frac{d^2}{dx^2} \underline{I}_f = P_f^t \underline{I}_f; \end{cases} \quad (2.1.1.7)$$

čia P_f – sklidimo faktorių matrica;

$$P_f = Z_f \cdot Y_f; \quad (2.1.1.8)$$

čia Z_f ir Y_f – savitųjų impedansų ir laidžių matricos fazėms ir tarp fazių (fazinėse koordinatėse);

$$Z_f = (Z_{ik});$$

$$Y_f = (Y_{ik}); i, k \in \{a, b, c\};$$

Vyksmams banginiuose kanaluose (2.1.1.7) tipo telegrafinės lygtys turi pavidalą:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} \underline{U} = P \underline{U}, \\ \frac{d^2}{dx^2} \underline{I} = P \underline{I}; \end{cases}$$

čia \underline{U} ir \underline{I} – įtampų ir srovių banginiuose kanaluose matricos-stulpeliai, su faziniais dydžiais susieti modalinėmis matricomis;

P – modų diagonalinė matrica; $P = \text{diag}(\gamma_k^2)$;

γ_k – k -ojo kanalo (sekos) bangos sklidimo pastovioji;

$$\begin{cases} \underline{U}_f = T \underline{U}, \\ \underline{I}_f = T_I \underline{I}; \end{cases} \quad (2.1.1.9)$$

$$P = T^{-1} P_f T; \quad (2.1.1.10)$$

$$T_I = T';$$

čia T ir T' – modalinė ir transponuota modalinė matricos;

$$\text{diag}(\gamma_k) = P^{\frac{1}{2}}; \quad (2.1.1.11)$$

Kanalų banginių varžų matrica randama taip:

$$W = P^{-\frac{1}{2}} T^{-1} Z_f T_I; \quad (2.1.1.12)$$

Pasinaudojus šia modaline algebra galima, surasti absoliutinę dažninę perdavimo funkciją kiekvienam k -ajam linijos, kurios ilgis l , kanalui: $\text{abs } D_k(\omega) = \exp(-\text{real}(\gamma_k(\omega)) \cdot l)$;

Dažnines funkcijas atitinka pereinamosios laiko funkcijos, parodančios kaip stataus fronto banga pakeičia charakterį sklindant išilgai linijos. Konversiją iš dažninės funkcijos į pereinamąją laiko funkciją atlieka tokia integralinė operacija:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Re } D(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega; \quad (2.1.1.13)$$

čia $\text{Re } D(\omega)$ – realioji dažninė perdavimo funkcija;

Pereinamoji linijos banginių kanalų funkcija apskaičiuojama skaitmenizuojant (2.1.1.13) integralą. Po dažninių perdavimo funkcijų suskaidymo į mažus intervalus (ω_1, ω_2).

2.1.2. Elektros kabelių linijų modeliai

Elektromagnetinių vyksmų kabelyje modeliavimą patogiausia atlikti naudojant cilindrinės matematinės fizikos funkcijas [38 p. 62]. Jų pagrindą sudaro banginė lygtis, surandama iš Maksvelo lygčių [38]:

$$\Delta \underline{\psi} + k^2 \underline{\psi} = 0; \quad (2.1.2.1)$$

čia $\underline{\psi}$ – bet kuri (\underline{E}) elektrinio stiprio arba (\underline{H}) magnetinio stiprio elektromagnetiniame lauke dedamoji [38 p. 62];

Aplinkos banginis skaičius randamas pagal (2.1.2.2) formulę:

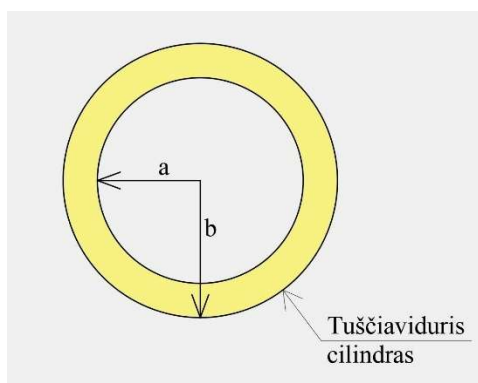
$$k = \sqrt{\mu \cdot (\varepsilon - j\sigma\omega)}; \quad (2.1.2.2)$$

čia μ - aplinkos magnetinė skvarba; ε - elektrinė konstanta; σ - savitasis elektrinis laidis.

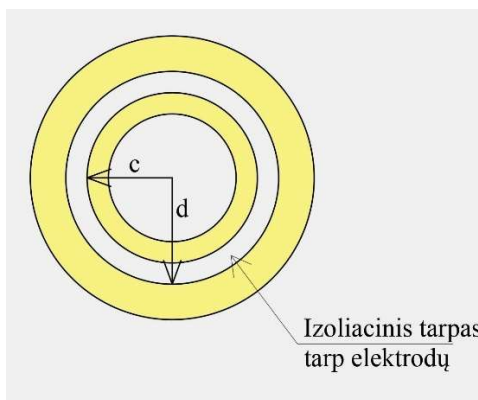
Δ – diferencialinis operatorius laplasianas, kuris cilindrinėse koordinatėse yra:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2};$$

Kabelio ekranas ir apsauginis šarvas turi tuščiavidurio cilindro pavidalą, kaip parodyta 22 pav. ir izoliacinį tarpą tarp elektrodų (žr. pav. 23).



22 pav. Kabelio tuščiaviduris cilindras, ekranas ir šarvas



23 pav. Kabelio cilindro izoliacinis tarpas

Srovės turi nevienodus tankius išoriniame ir vidiniame cilindro sienelių paviršiuose bei sukuria skirtingus įtampų kritimus, todėl suformuoja skirtingus cilindro vidinio paviršiaus (Z_{aa}) impedansą ir išorinio paviršiaus (Z_{bb}) impedansą [24]:

$$Z_{aa} = \frac{m}{2\pi a} \frac{I_0(ma)K_1(mb) + K_0(ma)I_1(mb)}{I_1(mb)K_1(ma) - K_1(mb)I_1(ma)}; \quad (2.1.2.3)$$

$$Z_{bb} = \frac{m}{2\pi b\sigma} \frac{I_0(mb)K_1(ma) + K_0(mb)I_1(ma)}{I_1(mb)K_1(ma) - K_1(mb)I_1(ma)}; \quad (2.1.2.4)$$

čia σ – cilindro metalo savitasis laidis;

m – banginis skaičius laido metale;

Savitarpio tarp vidinio ir išorinio cilindro paviršių apibūdina išraiška [24]:

$$Z_{ab} = \frac{1}{2\pi ab\sigma(I_1(mb)K_1(ma) - K_1(mb)I_1(ma))}; \quad (2.1.2.5)$$

Impedansas tarp dviejų elektrodų (tarp gyslos ir apvalkalo, arba, pavyzdžiui, tarp dviejų cilindrų) nustatomas tokia išraiška [38 p. 63]:

$$Z_i = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{d}{c}; \quad (2.1.2.6)$$

čia μ – izoliacijos sluoksnio magnetinė konstanta;

Impedansas tarp apvalkalo ir žemės grunto, esant baigtiniam žemės grunto varžumui ρ plačiame dažnių diapazone, ne blogesniu nei 1% tikslumu, gali būti apskaičiuotas taip [25]:

$$Z_{ig} = Z_{igo} + Z_g; \quad (2.1.2.7)$$

$$Z_g = \frac{\rho m^2}{2\pi} \left[K_0(mr) + \frac{2}{4+(mr)^2} e^{-2ym} \right];$$

čia r – apvalkalo spindulys; y - kabelio gylis žemėje;

$$m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho}}; \quad (2.1.2.8)$$

čia μ – žemės grunto magnetinė konstanta;

Kabelio lyginamoji talpa tarp gyslos ir ekraninio apvalkalo bei apvalkalo ir žemės grunto skaičiuojami pagal formule:

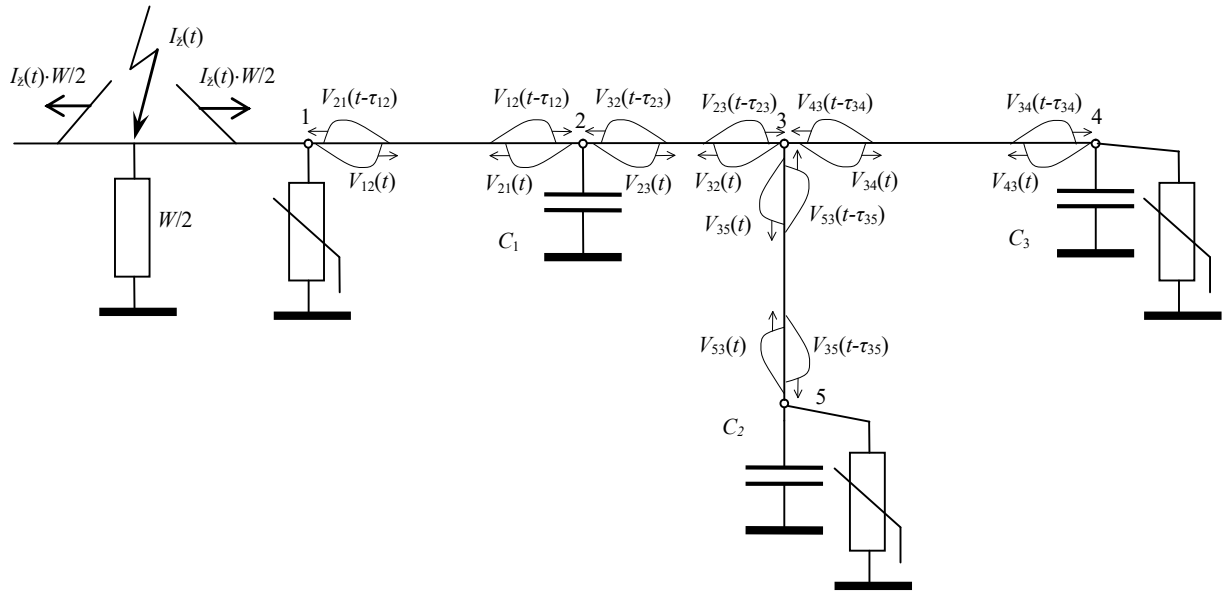
$$C_i = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{c}}; \quad (2.1.2.9)$$

Kablyje elektromagnetinė banga plinta lėčiau nei oro linijoje, praktiškai $\sqrt{\epsilon_r}$ kartų. Tokiame kabelyje apskaičiuotas bangos greitis gysla-ekranas kanale lėtesnis nei ore 1,69 kartų. Banga 1 km ilgio kabelį praskrieja per 5,63 μ s, tačiau dėl dispersinių reiškinių kabelio galą per šį laiką pasiekia tik apie 30% bangos amplitudės (kai bangos fronto trukmė nulinė). Skaitmeniniame modelyje kabelių atkarpose įvertinamas lėtesnis elektromagnetinės bangos sklidimo greitis.

čia ϵ_r - reliatyvioji kabelio izoliacijos dielektrinė konstanta. Kabelyje su XLPE izoliacija $\epsilon_r \approx 2,856$;

2.1.3. Elektromagnetinių bangų sklidimo linijoje modeliai

Įvykus žaibo išlydžiui į oro liniją ar šalia jos, laiduose susidaro viršįtampių banga. Žaibo sukelta viršįtampio impulsinė banga nuo žaibo išlydžio vietos linijoje sklinda į abi puses [16 p. 34]. Oro linijose šios bangos greitis artimas šviesos greičiui, o kabeliuose banga sklinda lėčiau, nes yra skirtingos banginės varžos. Oro linijose banginė varža siekia iki 400 Ω , o kabelių linijose – nuo 3 iki 40 Ω ir priklauso nuo įtampos, kabelio skerspjuvio ir jo konstrukcijos [16 p. 34] (žr. pav. 24).



24 pav. Žaibo impulso bangos sklidimas elektros linijoje

Elektromagnetinės žaibo išlydžio sukeltos impulsinės bangos potencialas ϕ_1 sklinda linijos dalimi 1-2, turinčioje banginę varžą W_{12} , ir taške 2 pereina į kitą linijos dalį 2-3, turinčią banginę varžą W_{23} , bangos elektromagnetinio lauko struktūra pakinta: dalis energijos grįžta atgal į liniją 1-2, o kita dalis pereina į linijos atkarpą 2-3. Taigi dalis potencialo ϕ_1 sklinda ta pačia kryptimi, kaip ir krintančioji banga, tai vadinamoji lūžusioji bangos dalis ϕ_1'' , o kita dalis ϕ_1' taške 2 atsispindi – vadinamoji atspindėtoji bangos dalis [16]. Tas potencialo pasiskirstymas užrašomas taip:

$$\phi_1 + \phi_1' = \phi_1''; \quad (2.1.3.1)$$

Atspindėtoji bangos dalis bus lygi:

$$\phi_1' = \beta \phi_1; \quad (2.1.3.2)$$

čia $\beta = \frac{W_{21} - W_{12}}{W_{21} + W_{12}}$ – atspindžio koeficientas;

Lūžusioji bangos dalis bus lygi:

$$\phi_1'' = \alpha \phi_1; \quad (2.1.3.3)$$

čia $\alpha = \frac{2W_{21}}{W_{21} + W_{12}}$ – lūžio koeficientas;

Atitinkamai tekančių impulsinių srovių sumą:

$$I_1 + I_1' = I_1''; \quad (2.1.3.4)$$

$$I_1' = -\beta I_1 = -\beta \frac{\phi_1}{W_{12}}; \quad (2.1.3.5)$$

Minuso ženklas rodo, kad esant vienodos krypties krintančiosios ir atspindėtosios bangų dalių elektriniams laukams, jų magnetiniai laukai, sukurti tekančių srovių, yra priešingų krypčių [16 p. 35].

Taške 2 lūžusioji srovės bangos dalis bus lygi [16]:

$$I_1'' = \frac{\phi_1''}{W_{21}} = \frac{\alpha \phi_1}{W_{21}} = \alpha I_1 \frac{W_{12}}{W_{21}};$$

arba (2.1.3.6)

$$I_1'' = \frac{2 \phi_1}{W_{21} + W_{12}}; \quad (2.1.3.7)$$

Analogiškai elektromagnetinės bangos impulsas lūžta ir atsispindi kituose mazguose. Sudarant elektromagnetinių bangų sklidimo skirstykloje modelį kiekviename mazge kiekvienam modaliniam kanalui sudaromos lygtys:

$$u_i(t) + W_{ei} \dot{i}_i(t) = V_{ei}(t); \quad (2.1.3.8)$$

čia $V_{ei} = \sum_k V_{ki} \frac{W_{ei}}{W_{ik}}$ – ekvivalentinė banga i-tajame mazge;

W_{ei} – ekvivalentinė mazgo banginė varža;

W_{ik} – linijos i-k prijungtos prie i-tojo mazgo banginė varža;

$i_i(t)$ – i-tojo mazgo.

Pagal formules laiko momentui t i-tajame mazge nustatoma įtampa ir srovė. Po to visuose mazguose nustatomos atsispindėjusios bangos:

$$\begin{cases} V_{ij}(t) = 2u_i(t) - V_{ji}(t - \tau_{ij}), \\ V_{ji}(t) = 2u_j(t) - V_{ij}(t - \tau_{ij}); \end{cases} \quad (2.1.3.9)$$

Idealiai linijai (linijai be nuostolių) elektromagnetinė banga iš taško i į tašką j patenka po laiko tarpo τ_{ij} . τ_{ij} – laikas per kuri elektromagnetinės bangos impulsas sklinda nuo taško i iki taško j . Skaitmeniname linijos atkarpos modelyje atkarpa padalijama į n elementų. Elementų (linijos diskretinių žingsnių) skaičius nustatomas taip:

$$n_{ij} = l_{ij}/(vh); \quad (2.1.3.10)$$

čia h – skaičiavimo žingsnis, [μ s];

v – kanalo elektromagnetinių bangų sklidimo greitis, [m/μ s];

l_{ij} – linijos el. ilgis, [m].

Preliminarus elektromagnetinės bangos gesimas sklindant linijoje nustatomas pagal formulę:

$$\begin{cases} V_{ij}(t) = [2u_i(t) - V_{ji}(t - \tau_{ij})] \cdot e^{-r_0 l_{ij}/(2W_{ij})}, \\ V_{ji}(t) = [2u_j(t) - V_{ij}(t - \tau_{ij})] \cdot e^{-r_0 l_{ij}/(2W_{ij})}; \end{cases} \quad (2.1.3.11)$$

čia W_{ij} – linijos banginė varža;

r_0 – linijos 1 m varža;

l_{ij} – linijos ilgis [m];

$u_1(t), u_2(t)$ – įtampa linijos atkarpos pradžioje ir gale;

$V_{ji}(t - \tau_{ij}), V_{ij}(t)$ – atsispindėjusi elektromagnetinių bangų charakteristika tarp bangų atsklidusių iš mazgo j į mazgą i ;

$V_{ji}(t), V_{lj}(t - \tau_{lj})$ – atsispindėjusi elektromagnetinių bangų charakteristika tarp bangų iš mazgo i į mazgą j .

Mazgo įtampa apskaičiuojama (pagal 2.1.3.8) taip:

$$u_i(t) = V_{ei}(t) - W_{ei}i_i(t); \quad (2.1.3.12)$$

Srovė mazgo i -tajame elemente apskaičiuojama taikant rekurentinę formulę:

$$i_i(t) = a_1 \cdot i_i(t - h) + a_2 \cdot W_{ei}(t) + a_3 \cdot W_{ei}(t - h); \quad (2.1.3.13)$$

čia a_1, a_2 ir a_3 – rekurentinės formulės koeficientai, kurie apskaičiuojami pritaikius diferencialinių lygčių prieauglių ekvivalentiškumo taisyklę pagal prijungto mazgo elemento parametrus;

$i_i(t), i_i(t-h)$ – srovė mazge diskretinio laiko momentais t ir $t-h$;

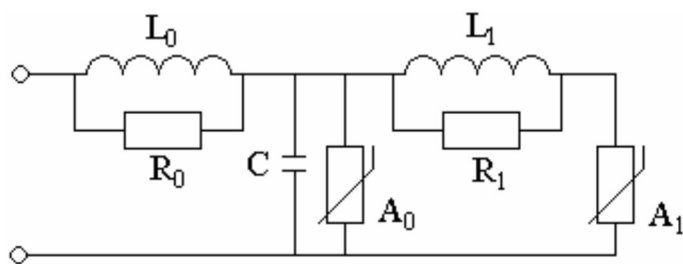
$W_{ei}(t), W_{ei}(t-h)$ – atsklidusios į mazgą i elektromagnetinės bangos charakteristika diskretinio laiko momentais t ir $t-h$.

2.1.4. Viršįtampių ribotuvo modeliai

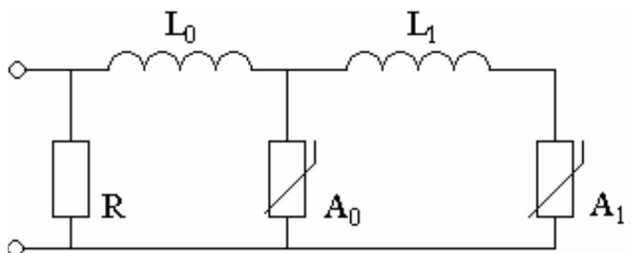
Žaibo sukeltos elektromagnetinės aukštų potencialų bangos linijose sukelia viršįtampių pereinamuosius vyksmus. Viršįtampių lygiui pažeminti iki bandomųjų įtampų lygio taikomos įvairios viršįtampių žeminimo priemonės. Priemonių efektyvumui įvertinti atliekami tyrimai tinklo skaitmeniniuose modeliuose. Pagrindinis dabar plačiausiai naudojamas įtaisas žeminantis viršįtampius yra viršįtampių ribotuvas.

Yra gana daug būdų modeliuoti metalo oksido (ZnO) viršįtampių ribotuvą tiriant jų efektyvumą ir parenkant reikiamus parametrus. Metalo oksido viršįtampių ribotuvų duomenų analizė parodė, kad elektromagnetinės bangos reakcija gali būti, įvertinta tikrai su jų netiesinėmis voltamperinėmis charakteristikomis. Tačiau, bandomieji duomenys rodo, kad metalo oksido viršįtampių ribotuvas turi dinamiškas savybės, kurios yra reikšmingos žaibui ir kitoms greitoms stataus fronto bangoms. Reikšmingos dinamiškos savybės yra tai, kad įtampa ant ribotuvo padidėja greičiau, negu ribotuvo srovė pasieks savo amplitudę. Metalo oksido viršįtampių ribotuvas pradeda riboti atėjusios elektromagnetinės bangos amplitudę šiek tiek vėluodamas.

Mokslinių straipsnių publikacijose yra rekomenduojama naudoti viršįtampių ribotuvo ekvivalentines schemas (žr. pav. 25 ir 26).



25 pav. Viršįtampių ribotuvo ekvivalentinė schema [26]



26 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo schema [27]

Viršįtampių ribotuvo ekvivalentinė schema parodyta 25 pav. tinkama modeliuoti pereinamuosius vyksmus sukeltus dėl linijos jungimo ar žaibo išlydžio. Induktyviniai parametrai pagal kataloguose duotus viršįtampių ribotuvų duomenis gali būti apskaičiuoti taip:

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{U_{r1/T_2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_n \text{ } [\mu\text{H}]; \quad (2.1.4.1)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{U_{r1/T_2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_n \text{ } [\mu\text{H}]; \quad (2.1.4.2)$$

čia U_n – įrenginio nominalioji įtampa [kV];

U_{r1/T_2} – liekamoji įtampa tekant 10 kA stiprio $1/T_2$ mikrosekundžių srovės bangos impulsui [kV];

$U_{r8/20}$ – liekamoji įtampa tekant 10 kA stiprio $1/T_2$ mikrosekundžių srovės bangos impulsui [kV];

T_2 – impulso trukmė iki gęstančios impulso dalies pusės amplitudės [μs];

Netiesinių voltamperinių charakteristikų faktoriai A_0 ir A_1 8/20 bangai, kai srovė 10 kA pateikti 3 lentelėje [28].

4 lentelė. Faktorių A_0 ir A_1 vertės

I , [kA]	A_0 (s.v.)	A_1 (s.v.)
$2 \cdot 10^{-6}$	0,810	0,623
0,1	0,974	0,788
1	1,052	0,866
3	1,108	0,922
10	1,195	1,009
20	1,277	1,091

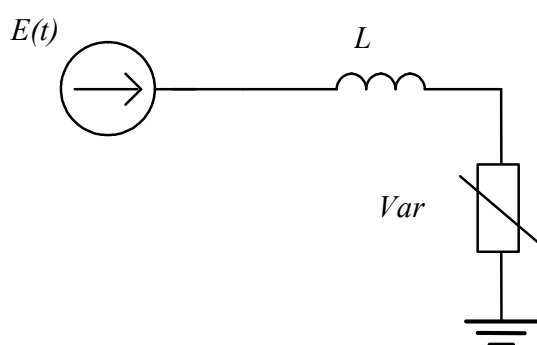
Pagal antrąjį modelį (žr. pav. 26) reikia tik kataloginių duomenų, tai supaprastina modelio parametrų nustatymą. Antrasis modelis be varžų praktiškai neturi įtakos modeliavimo rezultatams [28].

Viršįtampių pereinamųjų vyksmų modeliavimo ATP programoje yra panaudotas eksponentinis netiesinis voltamperinės charakteristikos modelis [28]. Kiekvienam įtampos intervalui parenkamos kelios eksponentės, srovės ir įtampos priklausomybė išreiškiama taip:

$$i = p \left(\frac{v}{U_r} \right)^q; \quad (2.1.4.3)$$

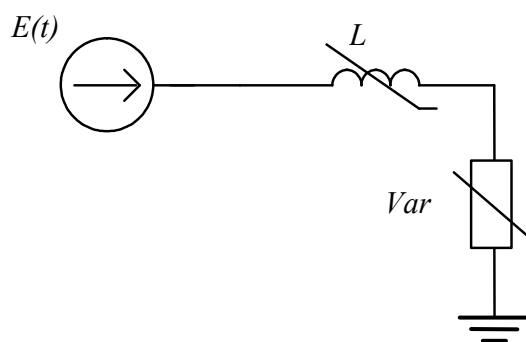
Šiame skaitmeniniame modelyje dalis charakteristikos (iki U_c) yra tiesinė, kuri praktiškai neturi įtakos viršįtampių pereinamajam vyksmui, nes šiame diapazone yra labai silpna srovė per viršįtampių ribotuvą. Kita dalis modeliuojama pagal funkcinę priklausomybę (2.1.4.3). Antra modelio netiesinė dalis yra apibrėžta parametrų p , q ir minimalaus įtampos lygmens. Kai įtampa per viršįtampių ribotuvą viršija ilgalaikę leistinąją įtampą (U_c), algoritmas imituoja voltamperinę charakteristiką. Kuo labiau eksponentinis modelis, tuo tikslesnis yra rezultatai. Šiame modelyje priimta, kad statuso fronto bangoms, maksimali įtampa ir srovė įvyksta tuo pačiu metu.

Viršįtampių ribotuvo modelio patikslinimui imituojant priklausomybę tarp įtampos ir srovės, varistoriui nuosekliai į grandinę prijungiamas induktyvumas (žr. pav. 27) [29]. Naudojant šį modelį turi būti tinkamai parinktas induktyvumas skirtingiems elektromagnetinės bangos frontams. Pavyzdžiui, pasirinktas induktyvumas modeliui gali duoti tikslų rezultatą 8 μ s bangos frontui, bet 2 μ s bangos frontui gali būti paklaidos [29].



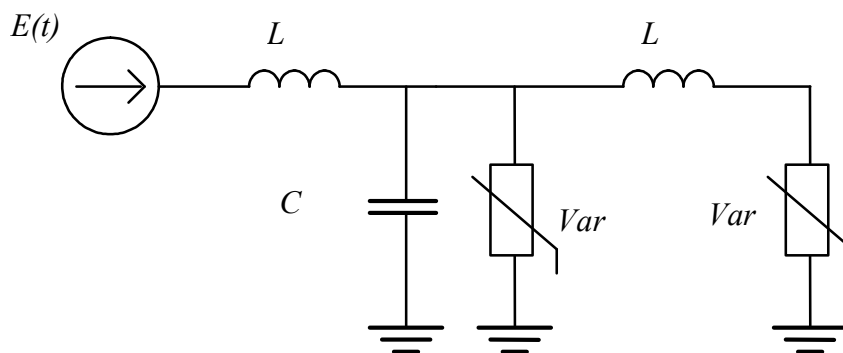
27 pav. Induktyvumą turintis viršįtampių ribotuvo modelis [29]

Kadangi modelis su induktyvumu turėjo trūkumų dėl priklausomybės nuo elektromagnetinės bangos fronto statumo, tai šis modelis buvo patikslintas įjungiant į viršįtampių ribotuvo modelį netiesinį induktyvumą (žr. pav. 28) [28]. Pagrindinė problema su šiuo modeliu yra tokia, kad reikia įdiegti programą, kuri apskaičiuotų netiesinį induktyvumą. Be to, daug einamųjų įtampa punktų yra būtini, kad atstovautų bangos savybei.



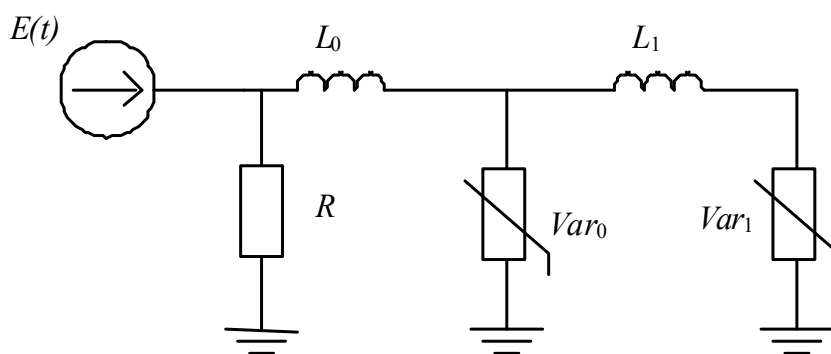
28 pav. Netiesinio induktyvumo viršįtampių ribotuvo modelis [28]

Kito mokslinio straipsnio autoriai koregavo modelį [29]. Viršįtampių ribotuvo modelis (žr. pav. 27) buvo supaprastintas, buvo pašalintas netiesinis induktyvumas ir kitais būdais apibrėžti parametrai (žr. pav. 29) [30]. Autoriai teigia, kad modelis duoda gerus rezultatus modeliuojant žaibo bangos 8/20 μ s impulsą. Tačiau, šis modelis gali duoti paklaidas, kai veikia įvairių formų ir bangos frontų elektromagnetinės bangos.



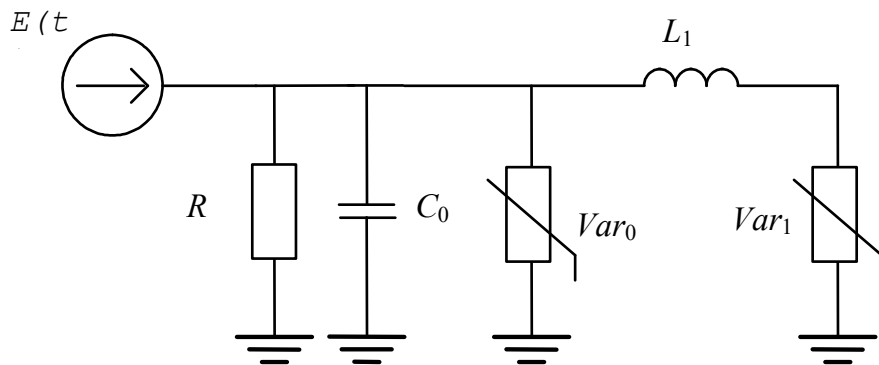
29 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo modelio schema [30]

Šiame modelyje, taip pat gautame iš viršįtampių ribotuvo schemos (žr. pav. 25), visi būtini duomenys yra lengvai parenkami iš viršįtampių ribotuvo gamintojų charakteristikų, nereikia pasikartojančios korekcijos parametrų, ir modelis yra gana tikslus (žr. pav. 30) [28]. Be to, nėra talpos elemento, ir panaudoti tiksliai elektriniai parametrai. Dvi lygiagrečios varžos pakeičiamos viena varža R .



30 pav. Supaprastinta viršįtampių ribotuvo modelio schema, be talpos elemento [30]

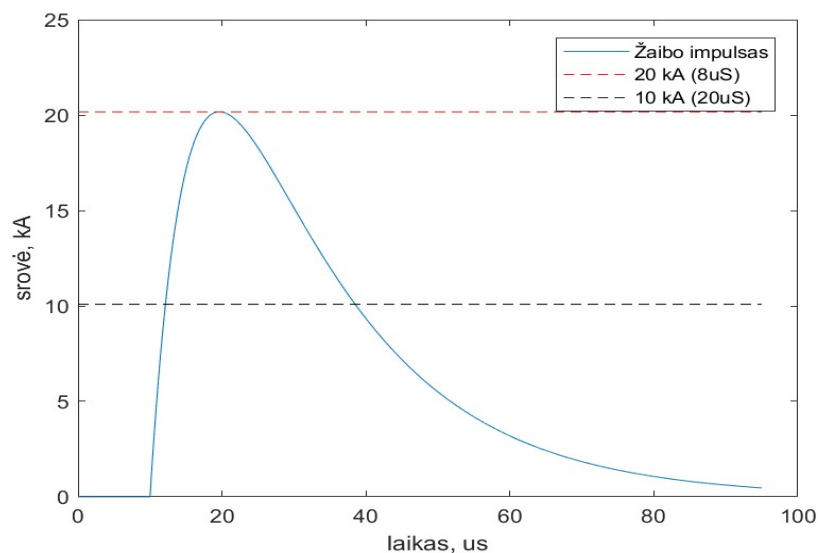
Kitais principais supaprastintas viršįtampių ribotuvo modelis parodytas 31 pav. [31]. Šiame modelyje ir elektriniai, ir fiziniai parametrai yra būtini. Dvi lygiagrečias varžas pakeičia tikrai viena, lygiagrečiai prijungta talpa, o vienas induktyvinis elementas pašalintas. Ryšys tarp Var_0 ir Var_1 srovių ir jų įtampos turi būtinai būti 0,02.



31 pav. Koreguota supaprastinto viršįtampių ribotuvo modelio schema [31]

Anksčiau aptarti viršįtampių modeliai buvo palyginti, naudodami ATP Programą [28]. Sudarytoje metodikoje viršįtampių ribotuvo modelis skaitmenizuotas. Voltamperinei charakteristikai sudaryti yra naudojamos kataloguose duodamos U_c , U_r ir prie įvairių srovės reikšmių duodamos liekamosios įtampos. Modelyje tarpinės reikšmės apskaičiuojamos interpoliuojant pagal tipinę ZnO įtampos ir srovės ryšio charakteristiką.

Modeliuojant pereinamuosius vyksmus modelio parametrai turi būti priderinti prie impulso veikiančio linijų izoliaciją parametru. 32 pav. parodytas standartinis žaibo srovės impulsas derinant klasikinę viršįtampių ribotuvo schemą (žr. pav. 25).



32 pav. Žaibo srovės impulsas 8/20 μs viršįtampių ribotuvo parametru derinimui

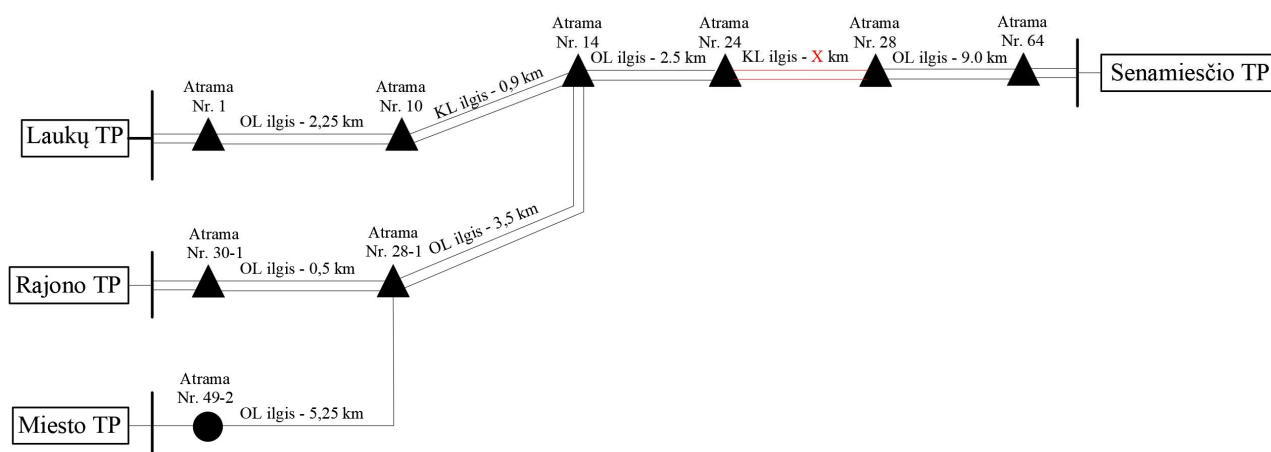
2.2. Viršįtampių sukeltų pereinamųjų vyksmų tyrimas

Žaibo ir komutacinių viršįtampių kompiuteriniam modeliavimui yra sukurtos programos, kurių algoritmuose yra panaudotos banginių vyksmų linijose lygtys su adekvačiu energijos disipacinių reiškinų įvertinimu bei laidų išsidėstymu aplinkoje [38]. Tam, kad galima būtų adekvačiau atspindėti elektromagnetinių vyksmų eigą elektros tiekimo schemose, sudarytose iš įvairaus ilgio linijų atkarpų bei jungiamųjų laidų, yra taikomas trumpesnis diskretizacijos laike žingsnis [38]. Skaičiavimų algoritme elektros linijų atkarpose srovės ir įtampos buvo atvaizduojamos modalinėse koordinatėse [38 p. 63], kas leido įvertinti vyksmų skirtumus skirtinguose banginiuose kanaluose: tarp laidų bei tarp laidų ir aplinkos (žemės).

Šiame darbe buvo naudojama kompiuterinė modeliavimui skirta programa – EMTP.

2.2.1. Tiriamojo modelio aprašymas

Vadovaujantis galiojančiais statybos techniniais reglamentais [32, 33], tarptautinės elektrotechnikos organizacijos išleistu standartu IEC 62271-1:2017/AMD1:2021 [34] ir Lietuvos PSO patvirtintais 110 kV įtampos kabelių techniniais reikalavimais [35], EMTP programoje buvo sukurtas 110 kV oro linijos su kabelių intarpais veikimo modelis (žr. 1 priedas). Supaprastinta tiriamojo modelio schema pavaizduota 33 paveikslėlyje.



33 pav. Supaprastinta tiriamojo modelio schema

Modelis buvo sukurtas uždaro tinklo tarp 4 transformatorių pastatų, kurios buvo pavadintos – Laukų TP, Rajono TP, Miesto TP ir Senamiesčio TP. Modelyje buvo parinktos 110 kV kabelių linijos bei metalinės dvigrandės ir viengrandės atramos (žr. pav. 33).

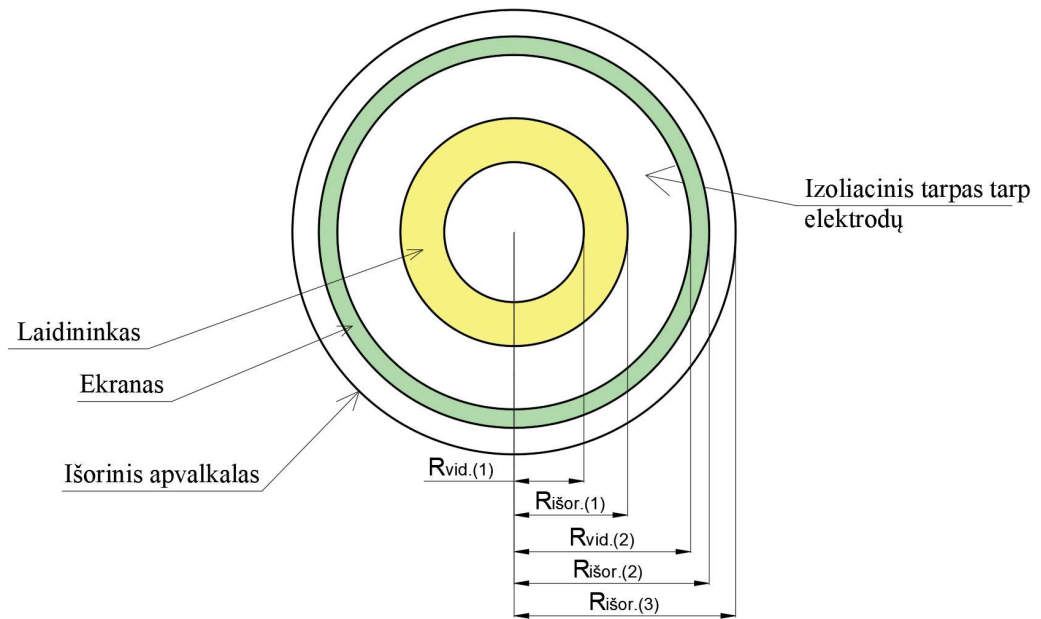
Modelyje parinkta, kad vieno oro linijos protarpio (tarp metalinių atramų) ilgis yra 250 m. Tarp atramos Nr. 10 ir atramos Nr. 14 yra 2 kabelių linijos, kurios ilgis yra 900 m ir vieną liniją sudaro 3 atskiri, vieno laidininko, kabeliai pakloti vienas šalia kito, žemėje.

Tyrimui buvo parinktas 2 kabelių linijų intarpas tarp atramos Nr. 24 ir atramos Nr. 28, kurioms buvo keičiamas kabelių linijos ilgis, įžeminimo varža ir įžeminimo būdas, viršįtampių ribotuvų montavimo vieta ir kiekvienu pakeitimu atliekama naujas modeliavimas bei fiksuojamas galimas kabelio izoliacijos maksimalus viršįtampis sukeltas žaibo išlydžio į oro linijos atkarpą.

Modelyje, kabelių linijos atkarpos ilgis buvo keičiamas į:

- 100 m. ilgio kabelių atkarpa;
- 300 m. ilgio kabelių atkarpa;
- 600 m. ilgio kabelių atkarpa;

Kabelio konstrukcija modelyje parinkta standartinio 110 kV kabelio su XLPE izoliacija, aliuminiu laidininku ir variniu ekranu (žr. pav. 34). Kabelio tech. parametrai parinkti naudojantis ABB įmonės gaminamais kabeliais [36].



34 pav. Supaprastintas EMTP kabelio modelis

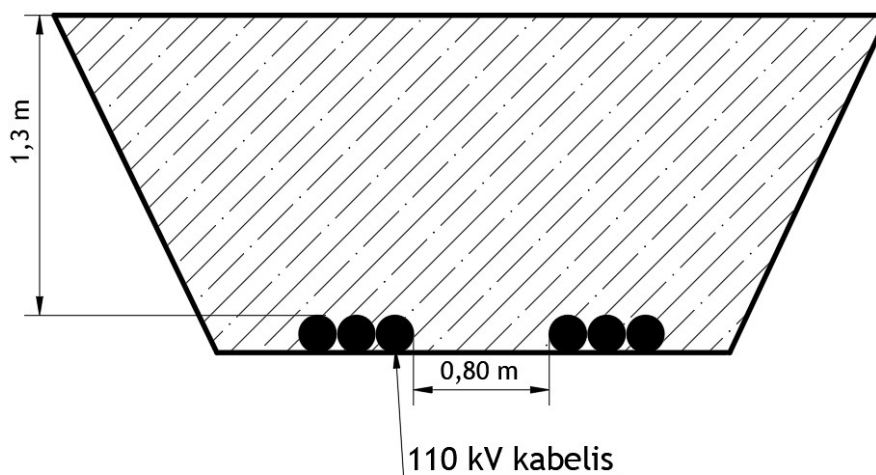
Naudojami kabelio duomenys pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Modeliui naudojami kabelio duomenys

<i>Parametras</i>	<i>Žymuo</i>	<i>Pavadinimas</i>	<i>Matmuo</i>	<i>Reikšmė</i>
Laidininko medžiaga	Al	Aliuminis	-	-
Laidininko savitoji varža, Al	ρ	-	Ωm	$2,84 \cdot 10^{-8}$
Laidininko skerspjūvis	-	-	mm^2	1200
Laidininko vidinis atstumas nuo modeliuojamo kabelio centro	$R_{\text{vid}(1)}$	-	m	0,003175
Laidininko vidinis atstumas nuo modeliuojamo kabelio centro	$R_{\text{išor}(1)}$	-	m	0,01254
Laidininko induktyvumas	-	-	H/m	$2,17 \cdot 10^{-6}$
Kabelio ekrano medžiaga	Cu	Varis	-	-
Ekranas skerspjūvis	-	-	mm^2	150

Ekranu savitoji varža, Cu	-	-	Ωm	$1,7241 \cdot 10^{-8}$
Ekranu vidinis atstumas nuo modeliujamo kabelio centro	$R_{\text{vid}(2)}$	-	m	0,022735
Ekranu vidinis atstumas nuo modeliujamo kabelio centro	$R_{\text{išor}(2)}$	-	m	0,026225
Ekranu induktyvumas	-	-	H/m	$2,056 \cdot 10^{-6}$
Išorinio apvalkalo atstumas nuo modeliujamo kabelio centro	$R_{\text{išor}(3)}$	-	m	0,029335

Sumodeliuotos kabelių linijos paklojimo būdas yra horizontalus, abiejų KL viengysliai kabeliai sumodeliuoti vienas šalia kito, abi kabelių linijas skiria 0,8 m atstumas ir abi linijos yra 1,3 m gylyje, užkasti po gruntu (žr. pav. 35).



35 pav. Sumodeliuotas horizontalus kabelių paklojimo būdas

Modelyje, grunto savitoji varža parinkta EMTP programos numatytoji varža - 100 Ωm [1].

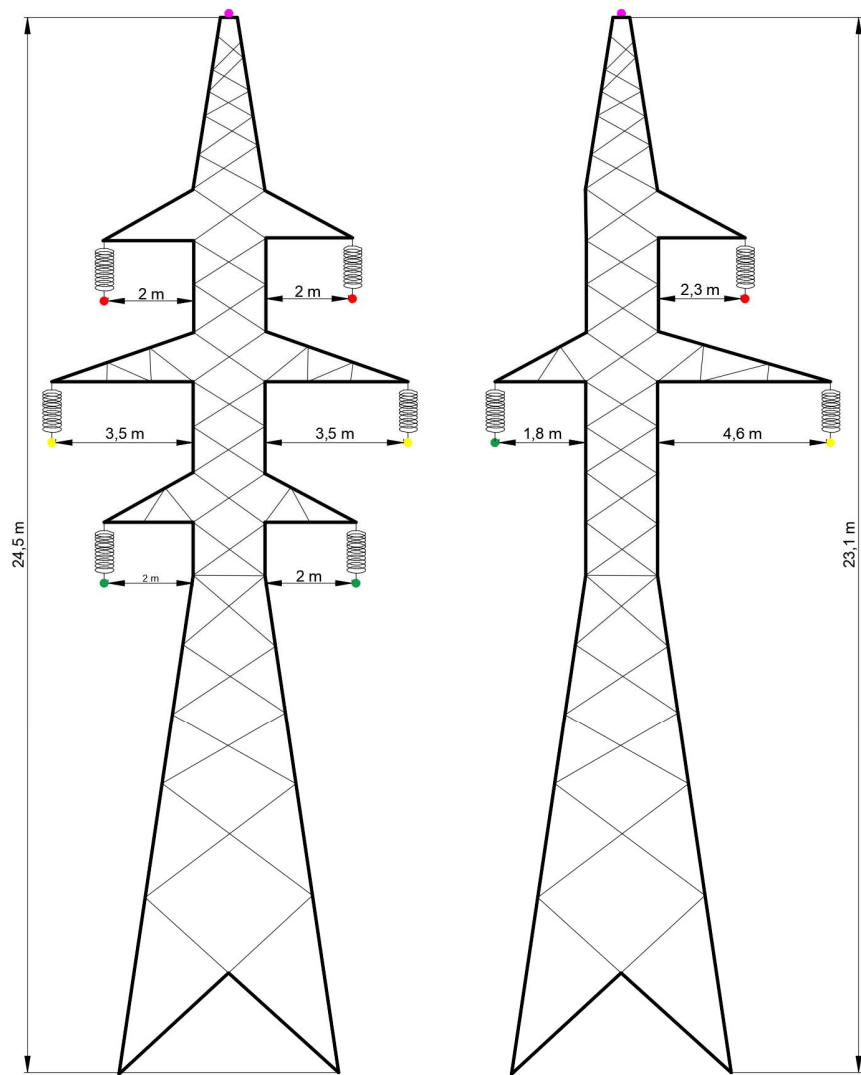
Kiekvienas žaibo išlydis turi 2 atskirus impulsus. Pirmasis vadinamas lyderiu, o antrasis – pagrindiniu išlydžiu [16]. Žaibo išlydžio pradžioje pasireiškia lyderis, kuris yra labai trumpas ir palaipsniui didėja iki pagrindinio išlydžio, kuris tęsiasi ilgiau [16].

Pirmajam žaibo impulsui (lyderiui), impulso trukmė buvo parinkta 1,2 μs , o pagrindiniam išlydžiui – 50 μs trukmė [37].

Oro linijų laidai ir žaibosaugos trosas sumodeliuoti aliumininiai su plieninių vijų šerdimi, kurio vieno laido aliuminių vijų skerspjūvis yra 150 mm^2 , o plieninių vijų skerspjūvis – 25 mm^2 .

Metalinės viengrandės oro linijos atramos sumodeliuotos 23,1 m aukščio, o dvigrandės – 24,5 m aukščio (žr. pav. 36). Visos atramos įžemintos ir įžeminimo kontūrų varža siekia 10 Ω .

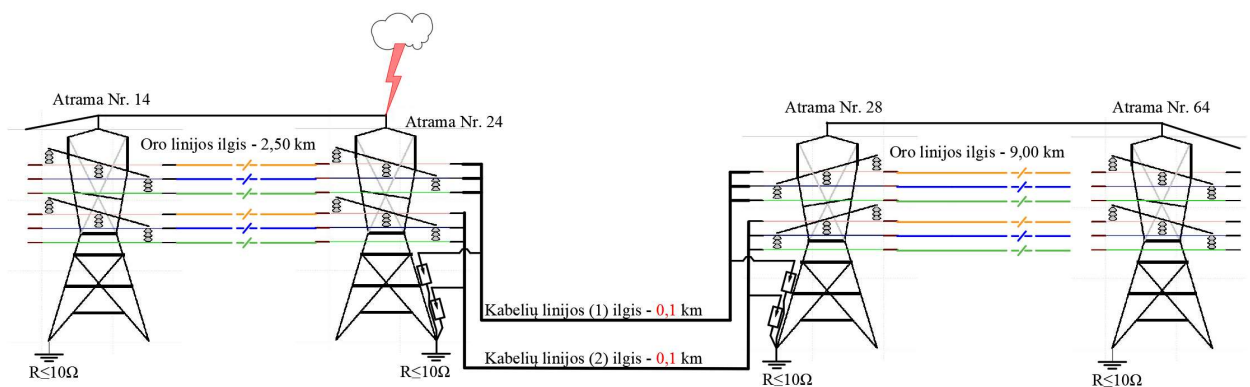
Viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti III klasės, kurių energijos absorbcavimo geba – 6 kJ/kV, nominali iškrovos srovė – 10 kA.



36 pav. Supaprastintas EMTP dvigrandės (kairėje) ir viengrandės metalinės atramos modelis

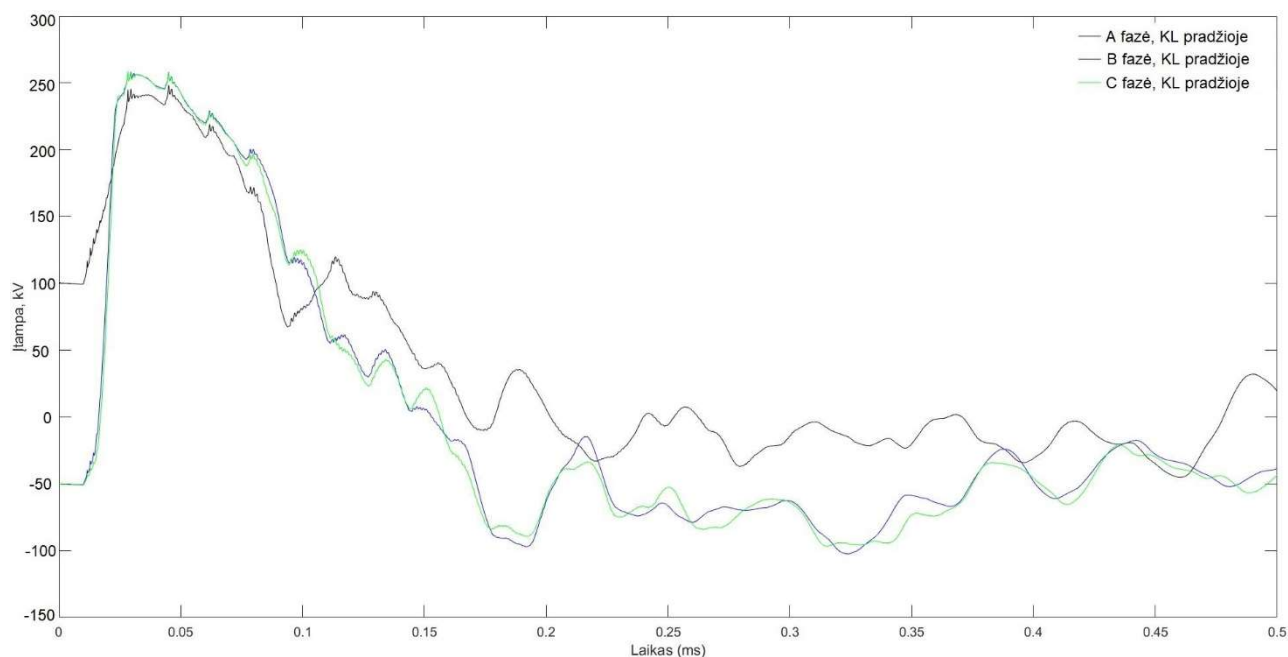
2.2.2. Žaibo išlydžio sukelti pereinamieji vyksmai kabelių linijoje

Pirmajame modeliavimo režime sumodeliuotas žaibo išlydis į atramos Nr. 24 žaibosaugos trosą, o antrame – į oro linijos fazinį laidą. Abiejų kabelių linijų, tarp atramos Nr. 24 ir atramos Nr. 28, ilgis yra 100 m. Kabelių linijų galuose sumodeliuoti viršįtampių ribotuvai ir kabelių ekranai įžeminti.



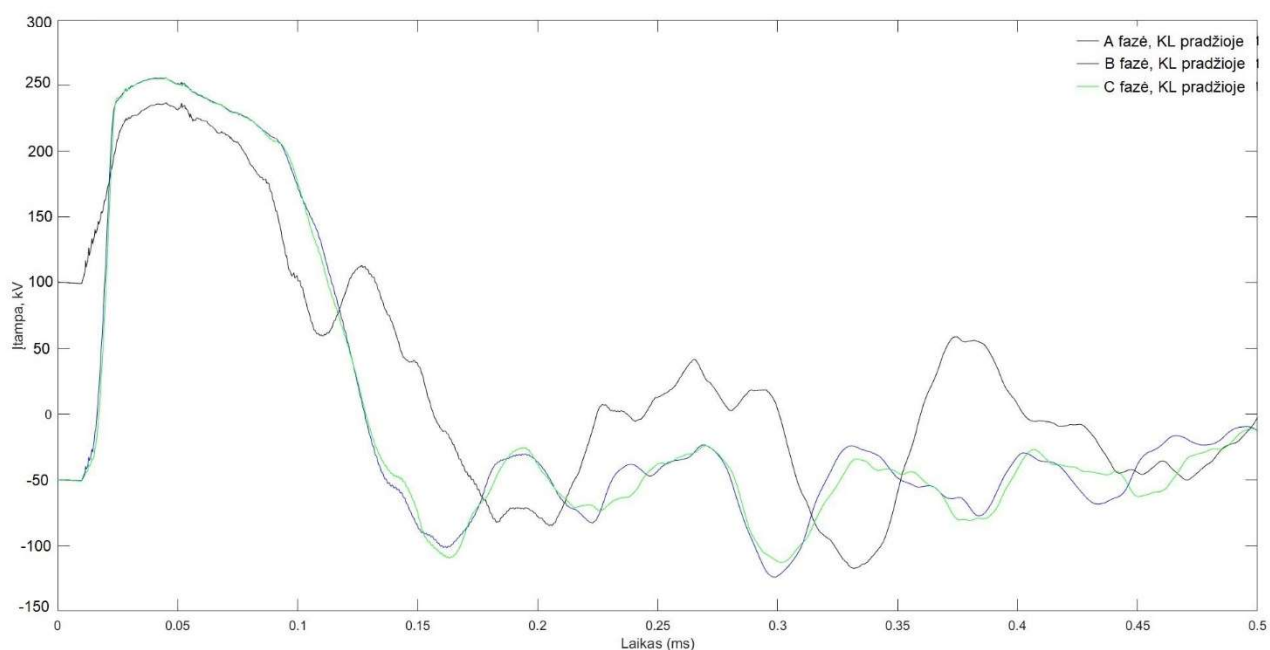
37 pav. Supaprastinta pirmojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į žaibosaugos trosą

Žaibo išlydžio sukeltas įtampos pereinamasis vyksmas kabelių pradžioje, pirmoje kabelių linijoje, pavaizduotas 38 paveikslėlyje.



38 pav. Pereinamieji vyksmai, kai pirmos kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą

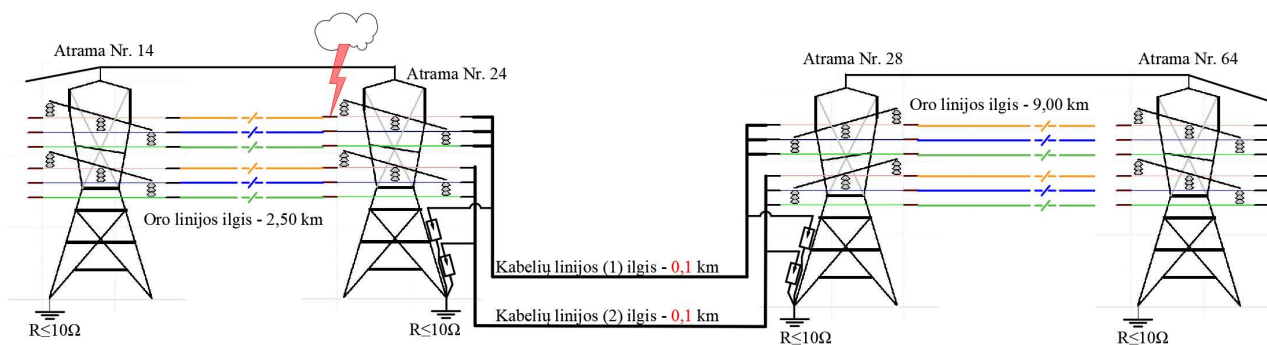
Pereinamųjų vyksmų grafike pastebima, kad tai yra indukuota įtampa. A fazėje didžiausia indukuota įtampa buvo pasiekta - 245,74 kV, B fazėje – 258,16 kV, C fazėje – 257,72 kV.



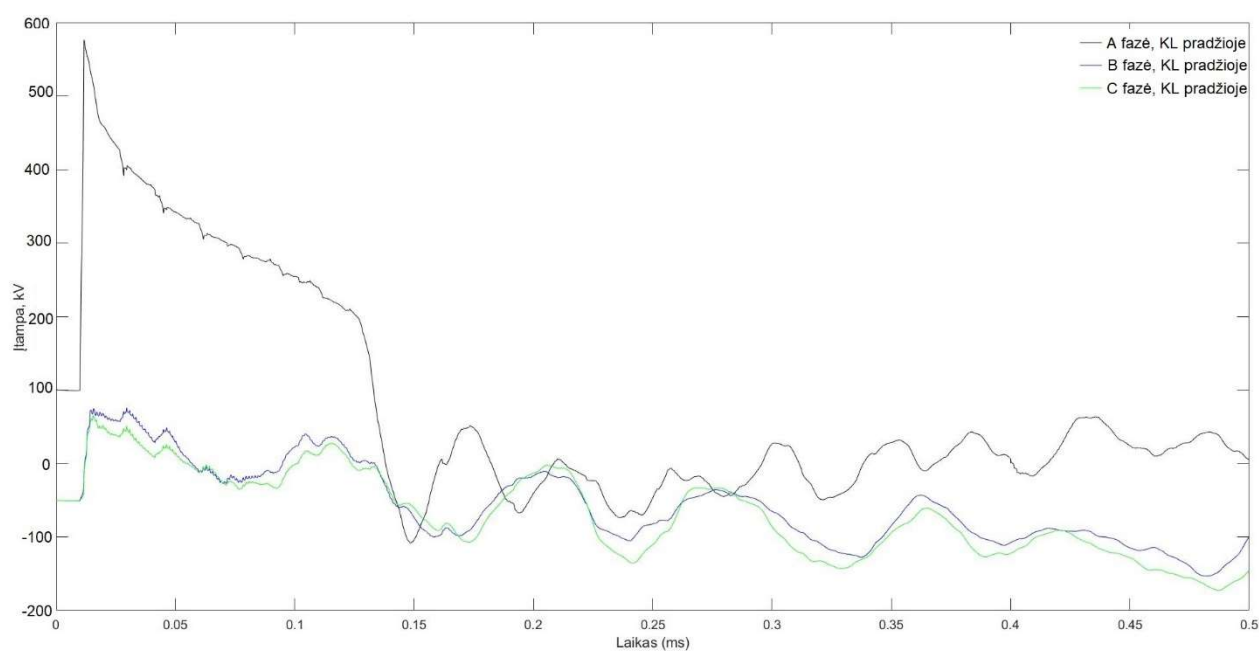
39 pav. Pereinamieji vyksmai, kai antros kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą

Antroje kabelių linijoje užfiksuota didžiausia indukuota įtampa: A fazėje – 236,43 kV, B fazėje – 255,54 kV, C fazėje – 255,25 kV.

Sekantis modeliavimas atliktas, kai žaibas pataiko į vieną iš oro linijos fazinių laidų – A fazę (žr. pav. 40). Fiksuojami duomenys kabelių linijos pradžioje ir kabelių linijos pabaigoje.



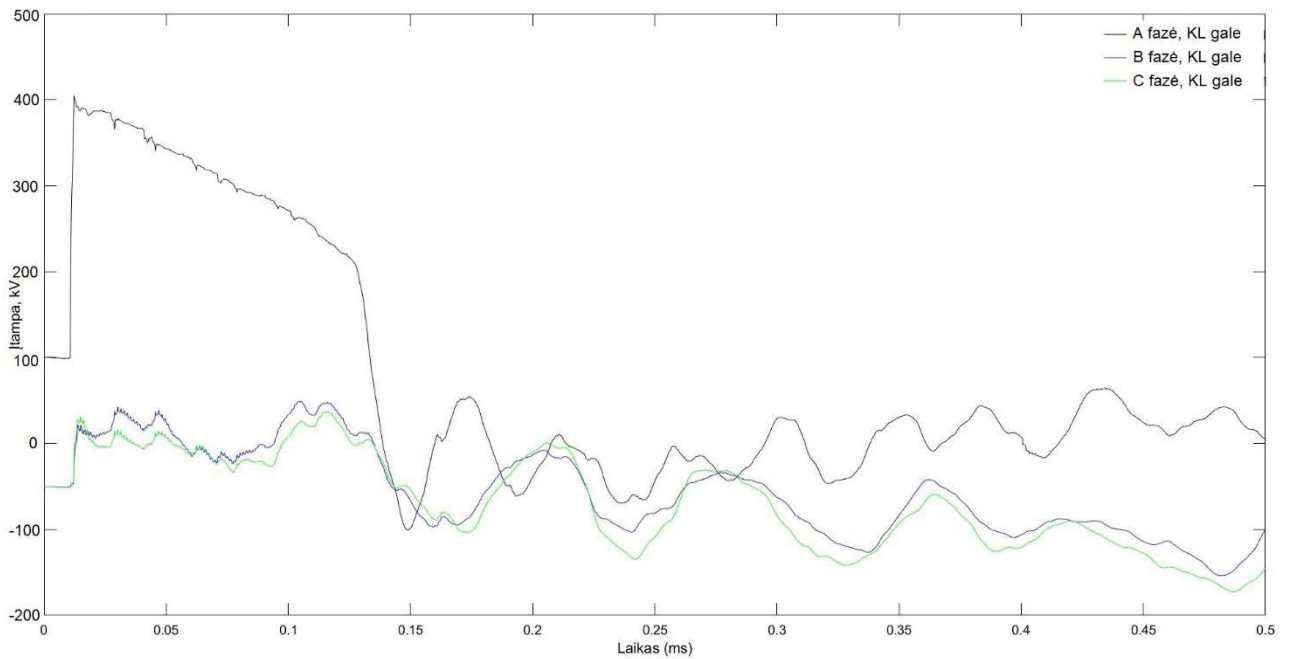
40 pav. Supaprastinta pirmojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į atramos Nr. 24 fazinį laidą



41 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pradžioje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę

Grafike (žr. pav. 41) matomas stiprus įtampos padidėjimas A fazės kabelio pradžioje ir indukuojama įtampa kitose fazėse. A fazėje užfiksuota žaibo išlydžio sukelta didžiausia įtampa - 573,39 kV, o indukuota įtampa B fazėje – -144,11 kV ir C fazėje – -161,74 kV.

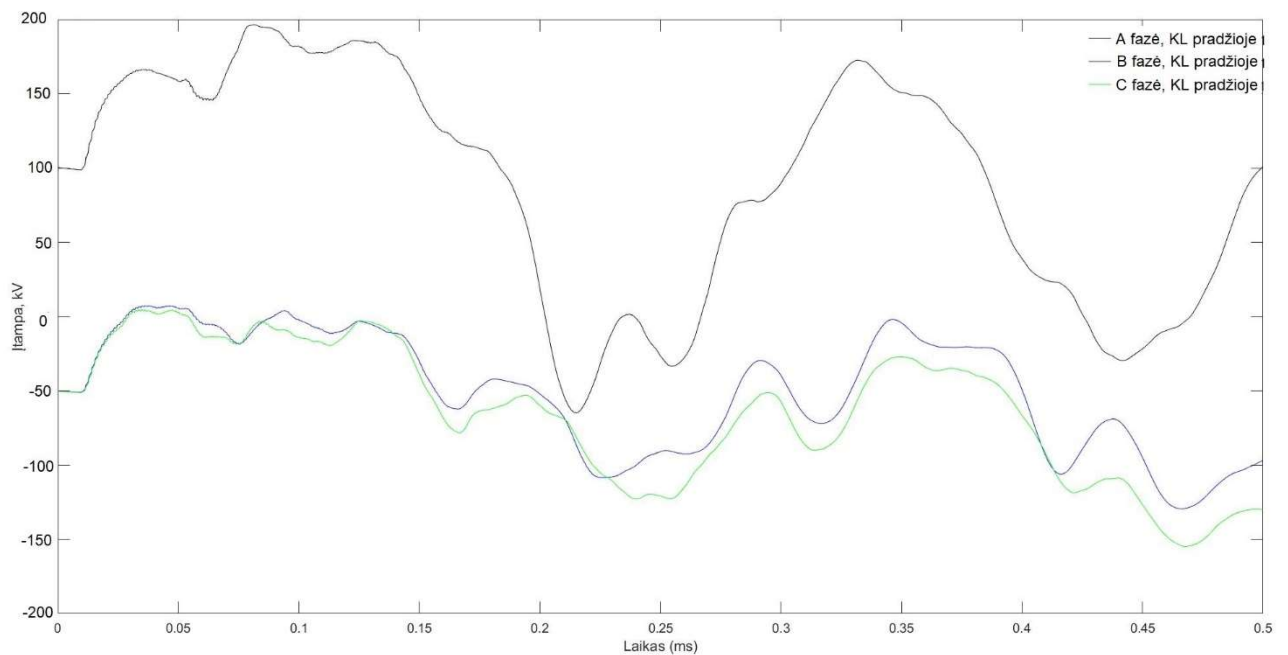
Kitas pereinamųjų vyksmų fiksavimas atliekamas kabelių linijos gale (žr. pav. 42).



42 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pabaigoje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 100 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę

Pastebimas žaibo išlydžio sukeltos įtampos sumažėjimas A fazės kabelio gale ir mažesnės indukuojamos įtampos B ir C fazės kabelių galuose (žr. pav. 42). A fazėje didžiausia įtampa užfiksuota – 403,37 kV, –132,22 kV ir C fazėje – –151,49 kV.

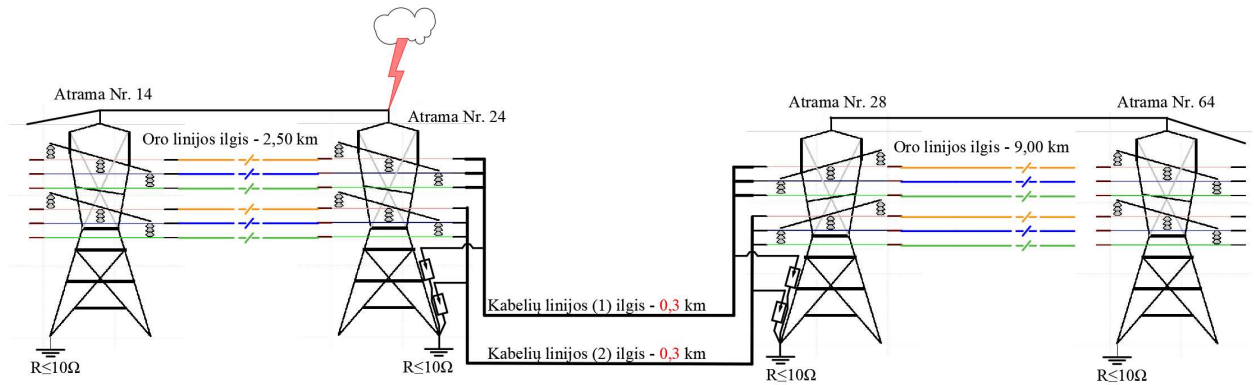
Kitame grafike pavaizduotas antros kabelių linijos pereinamieji vyksmai kabelių pradžioje (žr. pav. 43).



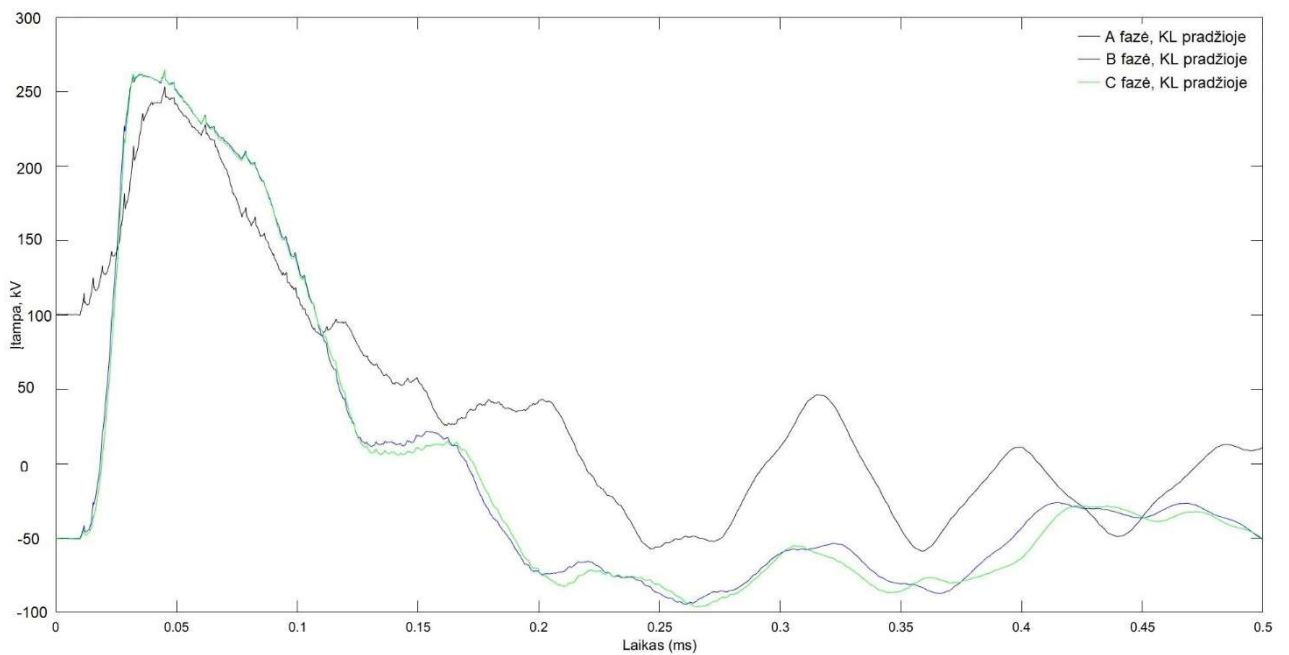
43 pav. Pereinamieji vyksmai antros kabelių linijos pradžioje, žaibas pataiko į pirmos grandies oro linijos A fazę

Grafike matomos indukuotos įtampos B ir C fazėse, o A fazėje žaibo impulsų pasklidusi įtampa iš uždaro 110 kV tinklo dėl atsklidusios per Laukų TP žaibų sukurtos bangos. A fazėje pastebėta didžiausia įtampa – 198,54 kV, B fazėje - -125,31 kV, C fazėje - -163,65 kV.

Antrajame modeliavimo režime atliekamas analogiškas modeliavimas kaip ir pirmojo modeliavimo režimo pradžioje, tačiau šiame modeliavime kabelių linijų ilgis yra 300 m (žr. pav. 44).

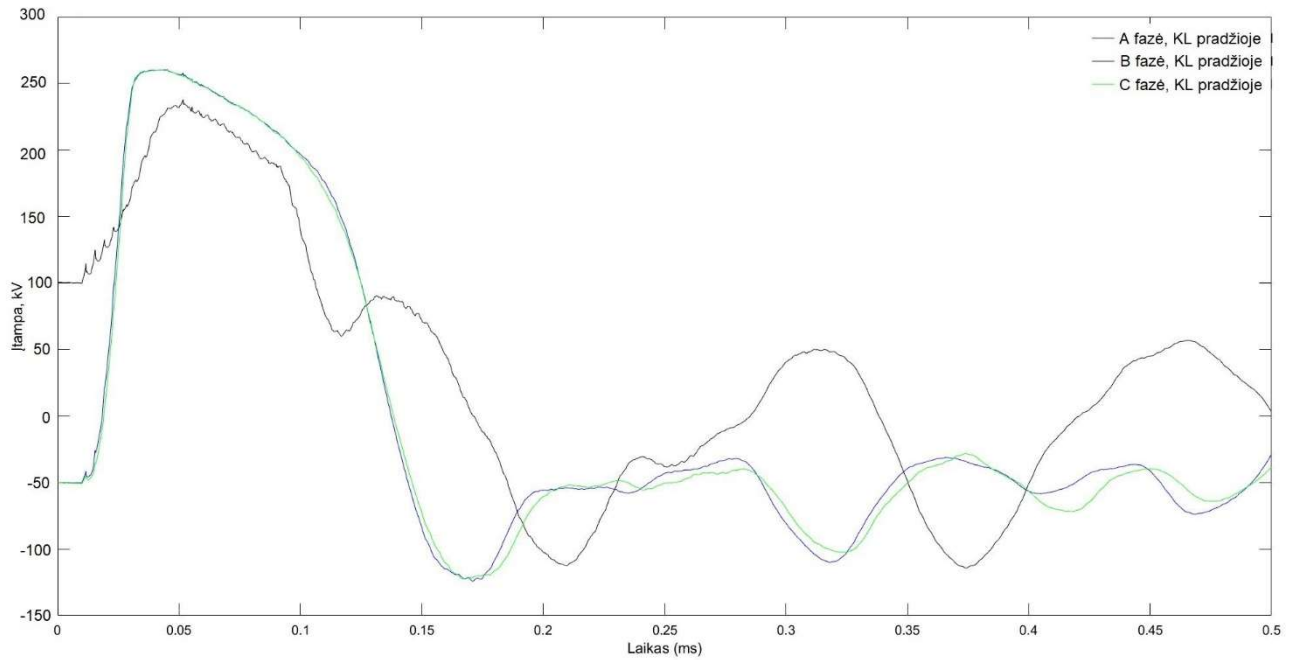


44 pav. Supaprastinta antrojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į žaibosaugos trosą



45 pav. Pereinamieji vyksmai, kai pirmos kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą

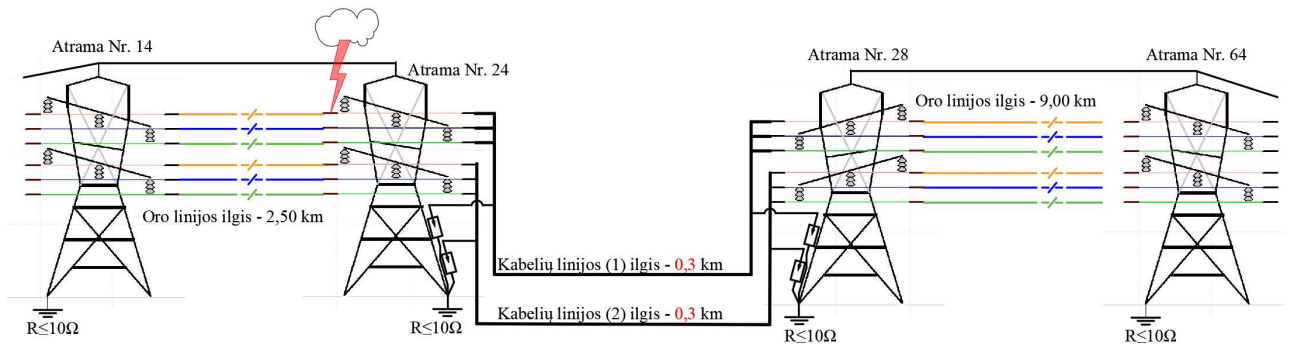
A fazėje užfiksuota didžiausia indukuota įtampa – 251,81 kV, B fazėje – 263,01 kV, C fazėje – 263,42 kV (žr. pav. 45).



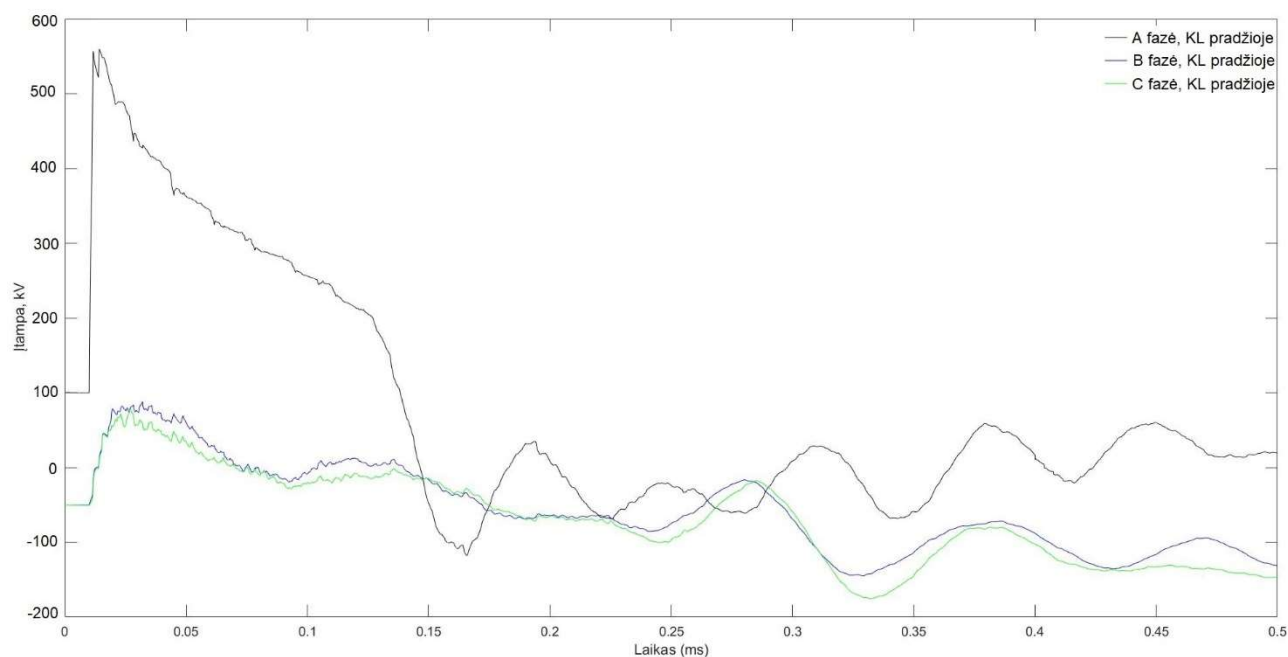
46 pav. Pereinamieji vyksmai, kai antros kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą

Užfiksuotos didžiausios indukuotos įtampos antroje kabelių linijoje (žr. pav. 46): A fazėje – 236,46 kV, B fazėje – 260,16 kV, C fazėje – 260,33 kV.

Sekantis modeliavimas atliekamas, kai žaibas pataiko į oro linijos A fazę (žr. pav. 47).

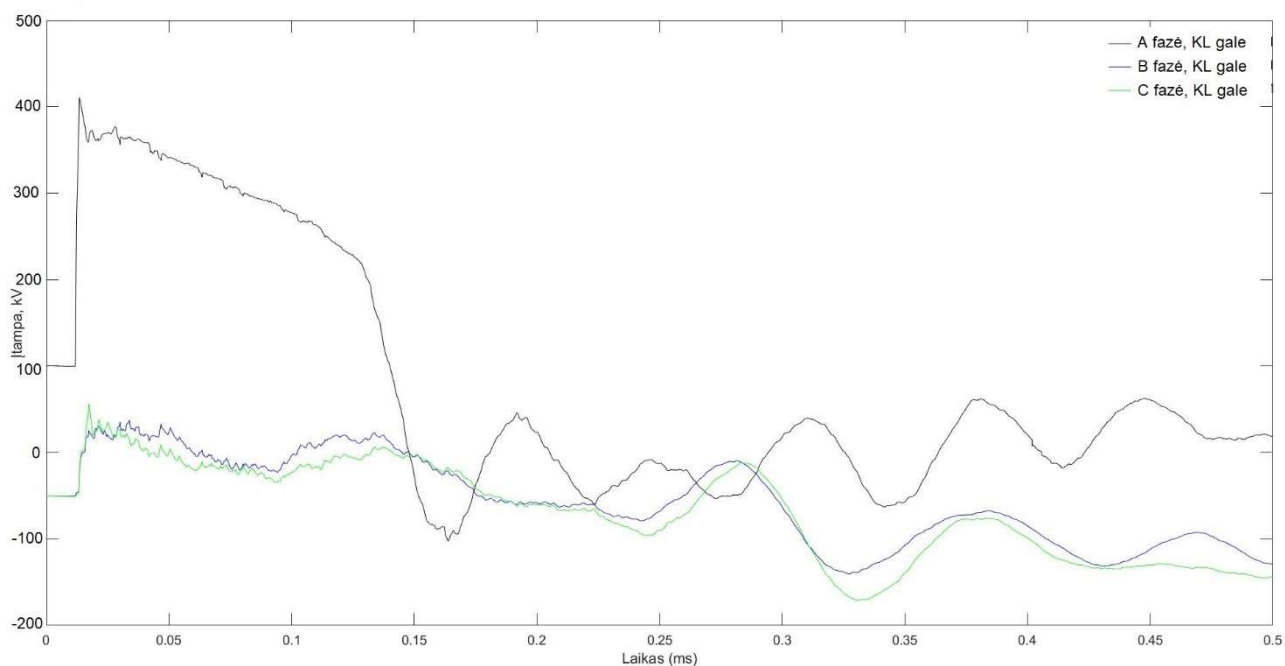


47 pav. Supaprastinta antrojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą



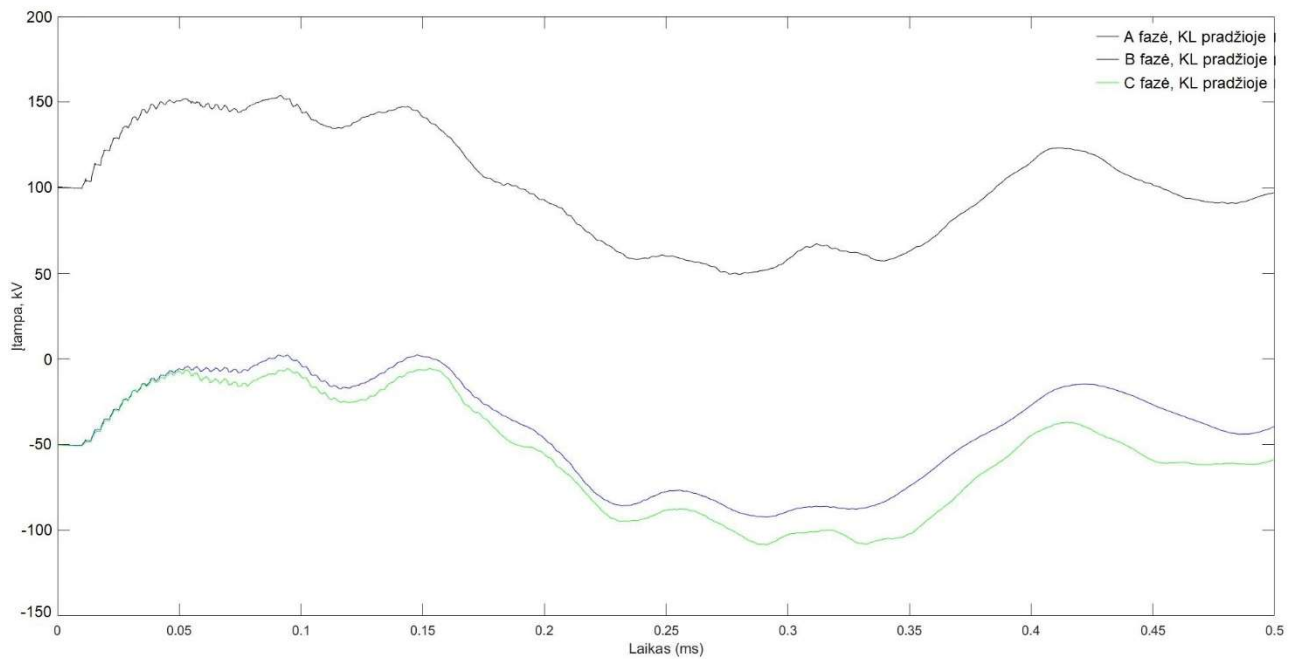
48 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pradžioje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę

Didžiausia užfiksuota įtampa A fazėje – 559,60 kV, B fazėje – -150,97 kV, C fazėje – -177,66 kV (žr. pav. 48).



49 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pabaigoje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 300 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę

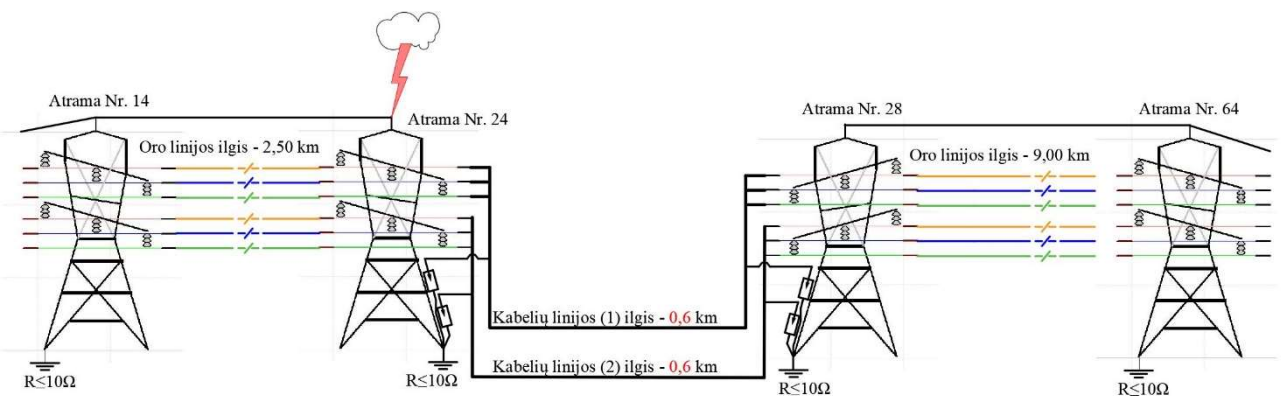
Pirmos kabelių linijos gale užfiksuotos didžiausios įtampos: A fazėje – 408,41 kV, B fazėje – -138,71 kV, C fazėje – -162,12 kV (žr. pav. 49).



50 pav. Pereinamieji vyksmai antros kabelių linijos pradžioje, žaibas pataiko į pirmos grandies oro linijos A fazę

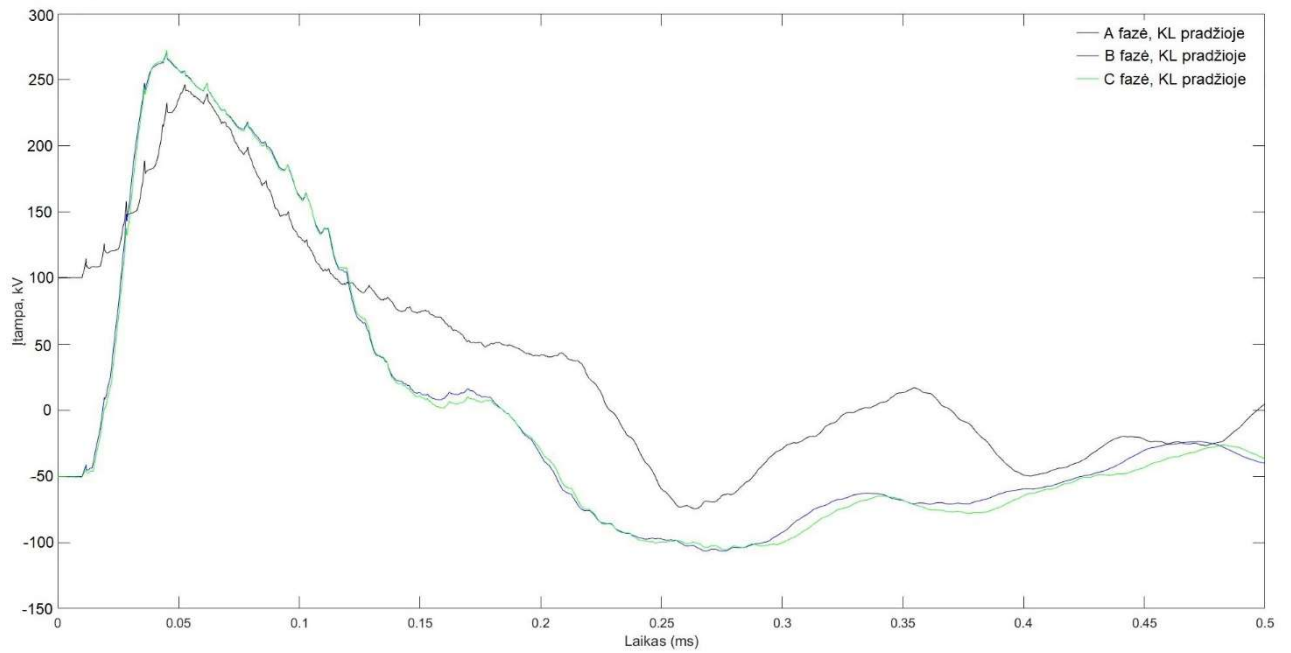
Užfiksuotos didžiausios indukuotos įtamos antroje kabelių linijoje (žr. pav. 50): A fazėje – 153,76 kV, B fazėje – -95,64 kV, C fazėje – -111,36 kV.

Trečiajame modeliavimo režime atliekamas analogiškas modeliavimas kaip ir pirmame bei antrame modeliavimo režimo pradžioje, tačiau šiame modeliavime kabelių linijų ilgis yra 600 m (žr. pav. 51).

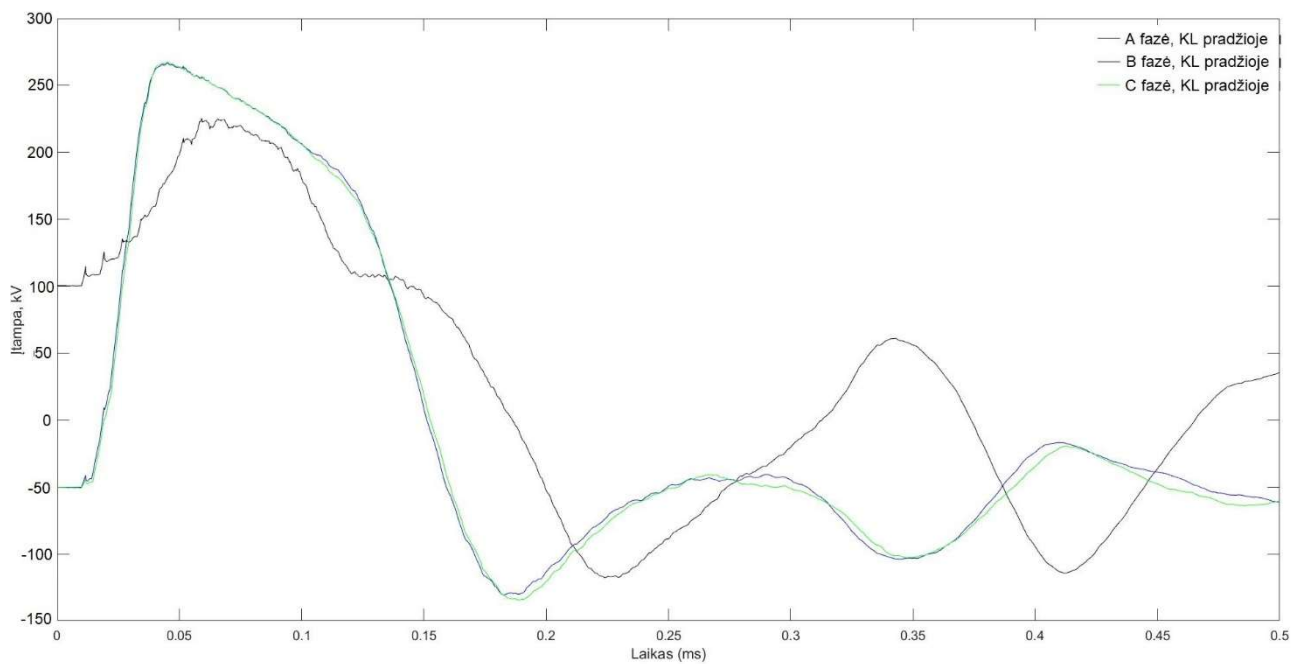


51 pav. Supaprastinta trečiojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į žaibosaugos trosą

Pereinamųjų vyksmų grafike (žr. pav. 52) pastebima, kad tai yra indukuota įtampa. A fazėje didžiausia indukuota įtampa buvo pasiekta - 244,45 kV, B fazėje – 270,63 kV, C fazėje – 271,58 kV.



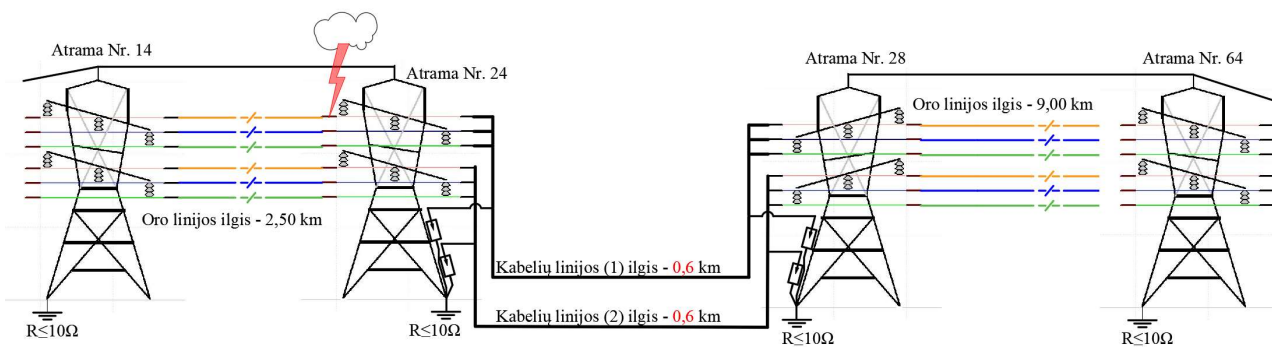
52 pav. Pereinamieji vyksmai, kai pirmos kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą



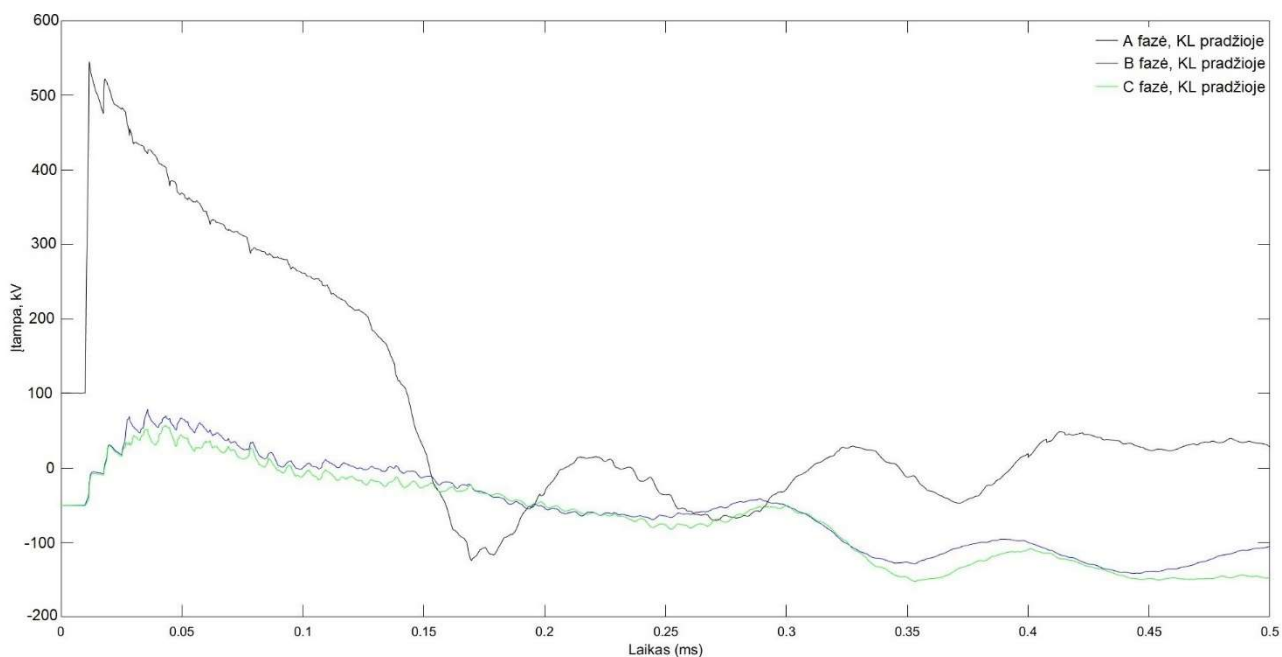
53 pav. Pereinamieji vyksmai, kai antros kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos žaibosaugos trosą

Antroje kabelių linijoje (žr. pav. 53) užfiksuota didžiausia indukuota įtampa: A fazėje – 224,39 kV, B fazėje – 266,44 kV, C fazėje – 265,59 kV.

Sekantis modeliavimas atliekama, kai žaibas pataiko į oro linijos A fazę (žr. pav. 54).

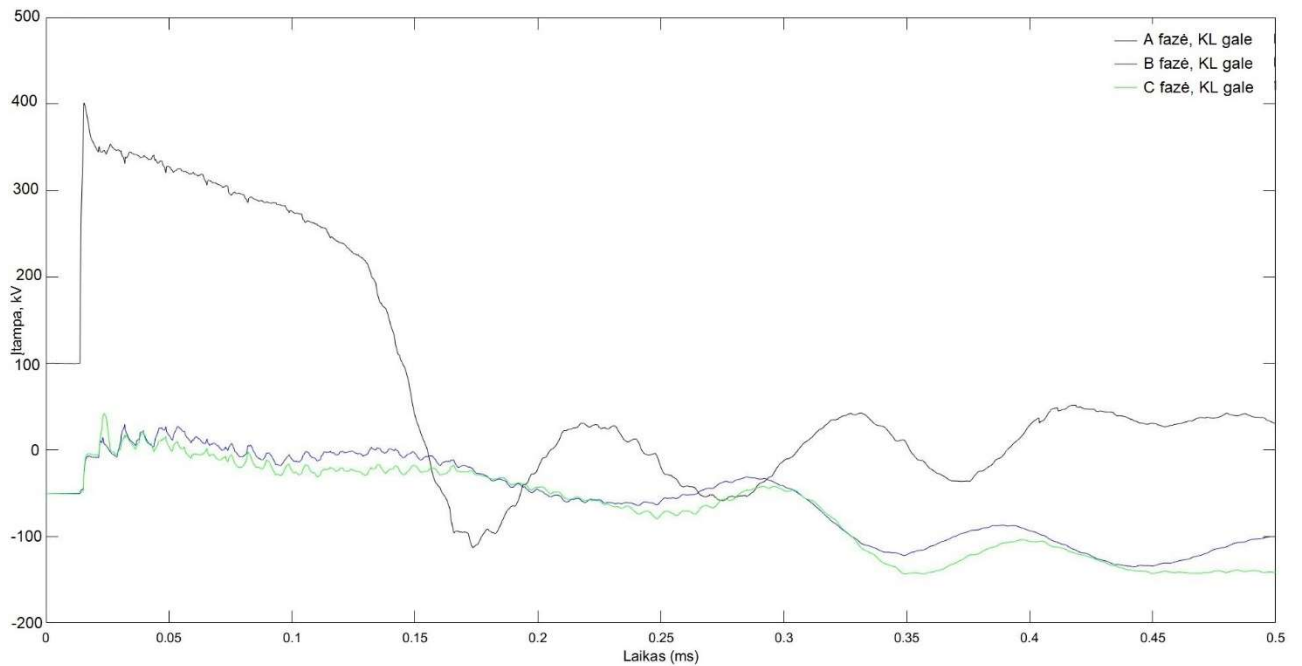


54 pav. Supaprastinta trečiojo modeliavimo schema, kai žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą



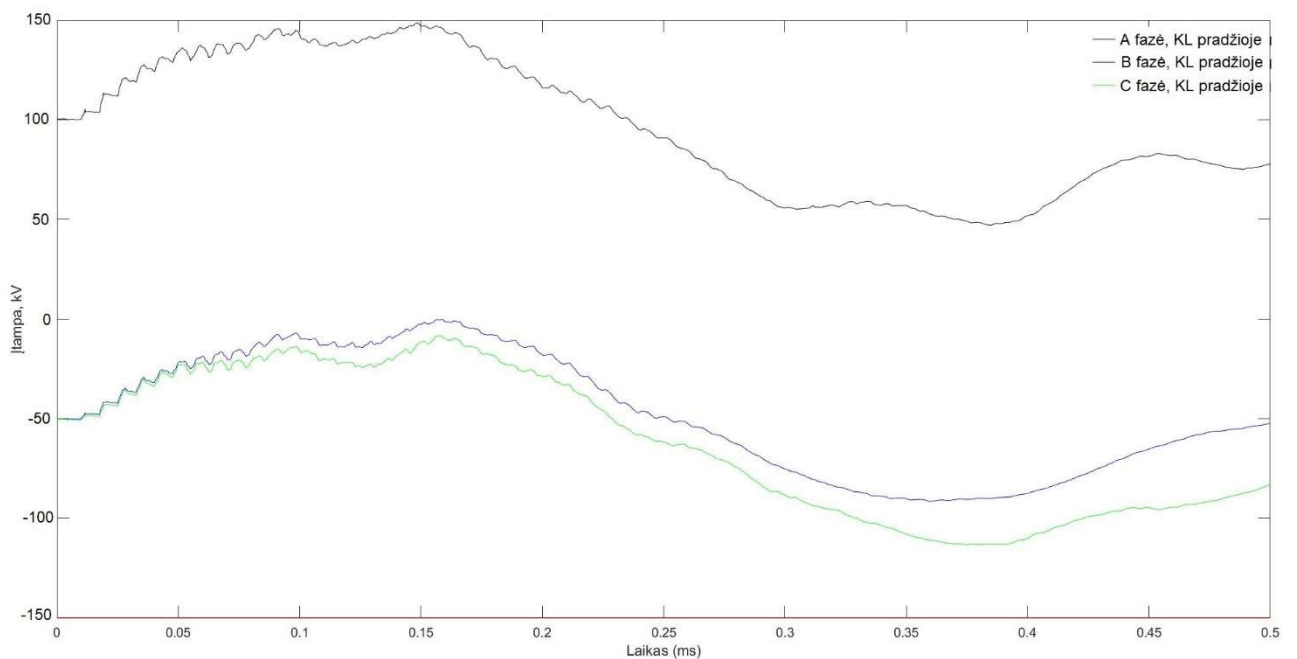
55 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pradžioje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę

Didžiausios pasiekta įtampa A fazėje – 542,11 kV, B fazėje – -141,10 kV, C fazėje – 148,96 kV (žr. pav. 55).



56 pav. Pereinamieji vyksmai kabelių pabaigoje, kai pirmos kabelių linijos ilgis 600 m. ir žaibas pataiko į oro linijos A fazę

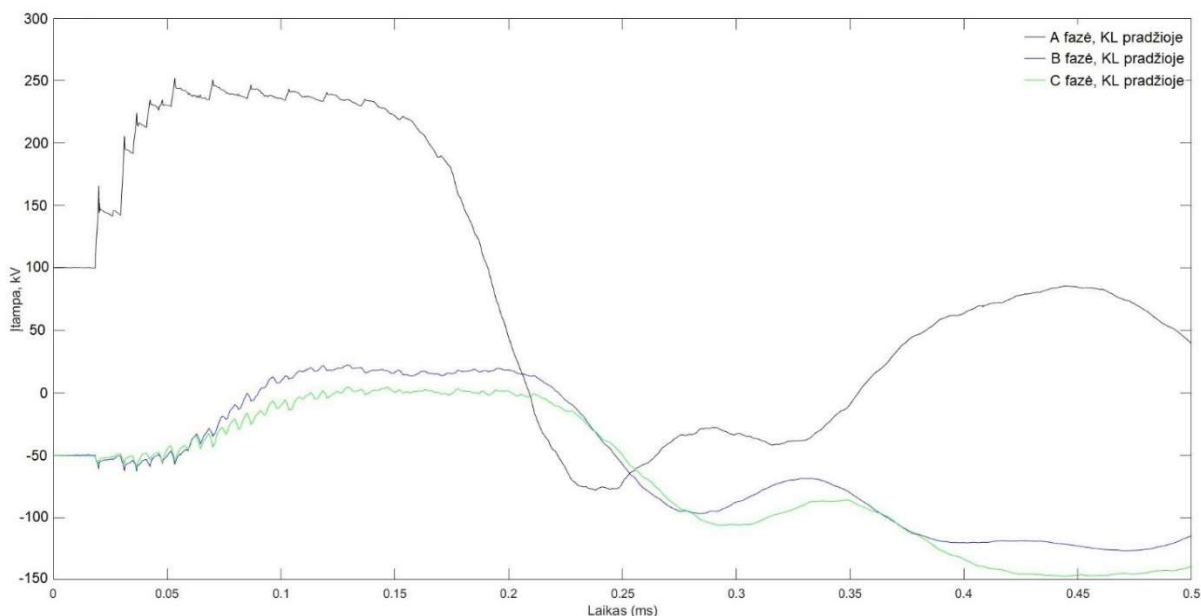
Pirmos kabelių linijos gale užfiksuotos didžiausios įtampos: A fazėje – 400,46 kV, B fazėje – -126,43 kV, C fazėje – -133,09 kV (žr. pav. 56).



57 pav. Pereinamieji vyksmai antros kabelių linijos pradžioje, žaibas pataiko į pirmos grandies oro linijos A fazę, kai kabelių ilgis yra 600 m

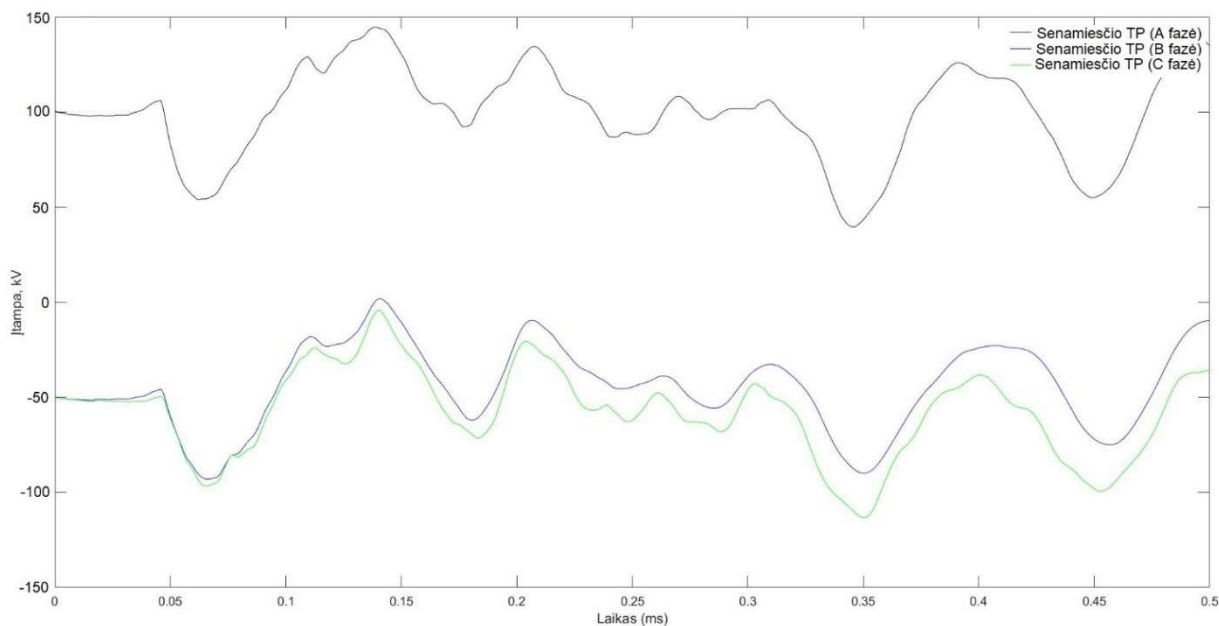
Užfiksuotos didžiausios indukuota įtampa antroje kabelių linijoje (žr. pav. 57): A fazėje – 148,53 kV, B fazėje – -88,43 kV, C fazėje – -123,71 kV.

Kitas duomenų fiksavimas atliekamas įvairiuose 110 kV elektros tinklo taškuose, kai kabelių linija yra 600 m ilgio, žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą.



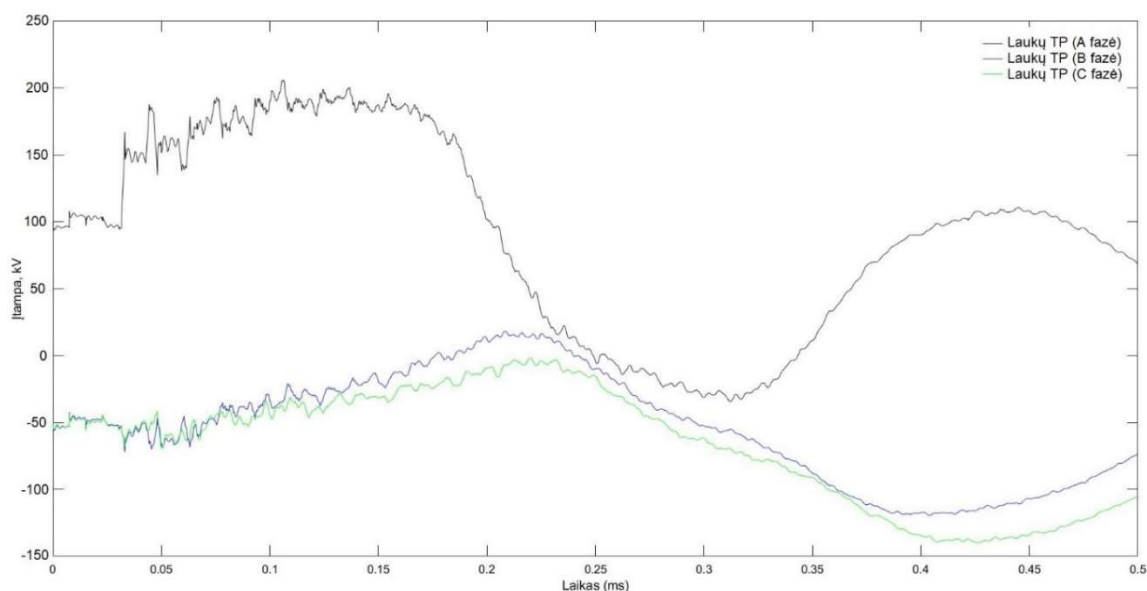
58 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos tarp atramos Nr. 10 ir atramos Nr. 14

Pastebimas pirmos kabelių linijos didžiausia įtampa (žr. pav. 58): A fazėje – 251,56 kV, B fazėje – -128,77 kV, C fazėje – -148,32 kV.



59 pav. Pereinamieji vyksmai Senamiesčio TP

Senamiesčio TP užfiksuota didžiausia įtampa (žr. pav. 59): A fazėje – 147,12 kV, B fazėje - -89,52 kV, C fazėje - -111,44 kV.

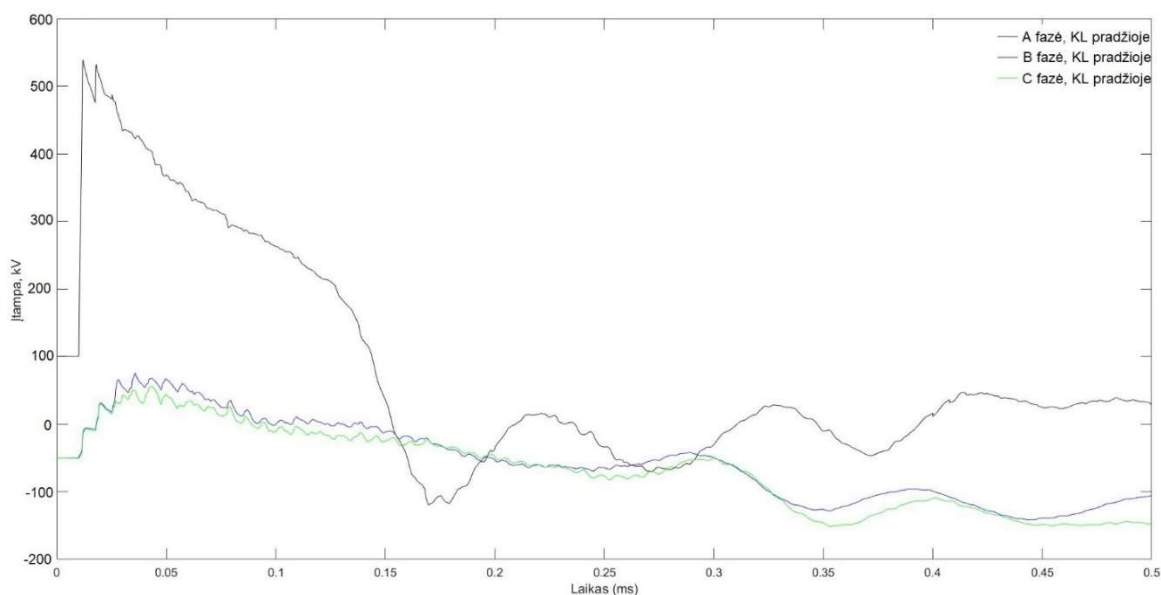


60 pav. Pereinamieji vyksmai Laukų TP

Laukų TP užfiksuota didžiausia įtampa (žr. pav. 60): A fazėje – 205,45 kV, B fazėje – -117,77 kV, C fazėje – -139,97 kV.

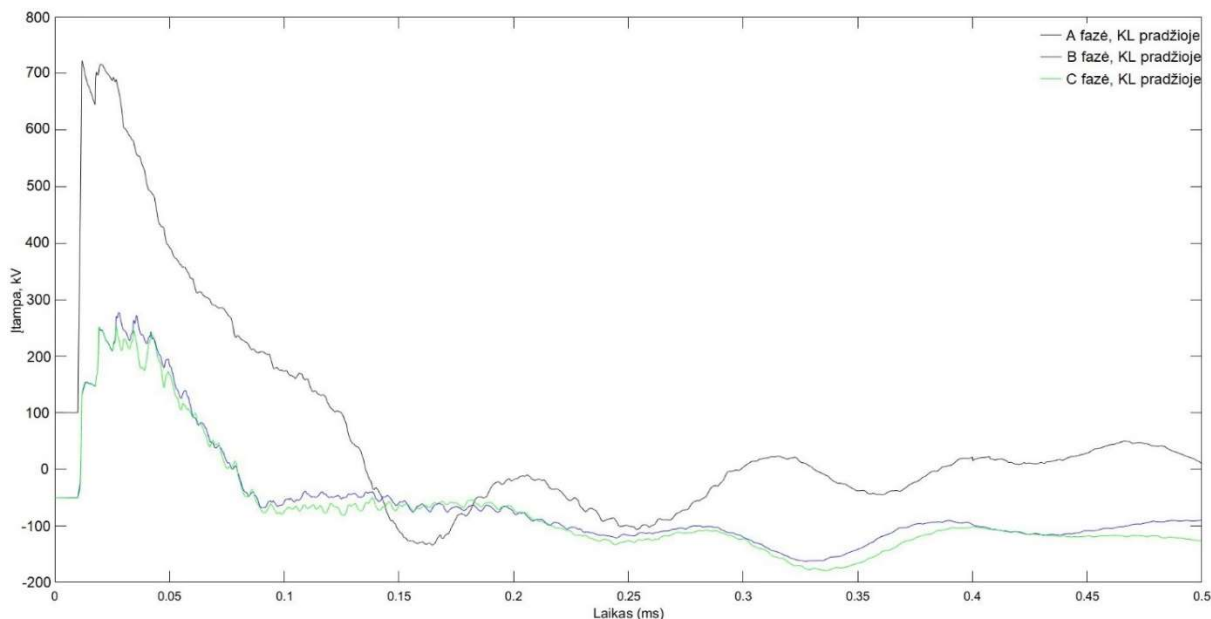
Ketvirtas modeliavimo režimas atliekamas, kai kabelių linija yra 600 m ilgio, bet keičiama kabelių įžeminimo varža, įžeminimo būdas ir viršįtampių modeliavimo vieta ant oro linijos atramos.

Pereinamųjų vyksmų grafike (žr. pav. 61) viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti šalia oro linijos izoliatorių, įžeminimo kontūrų varža - 10 Ω. Užfiksuoti didžiausi viršįtampiai A fazėje – 537,46 kV, B fazėje – -141,28 kV, C fazėje – -150,24 kV.



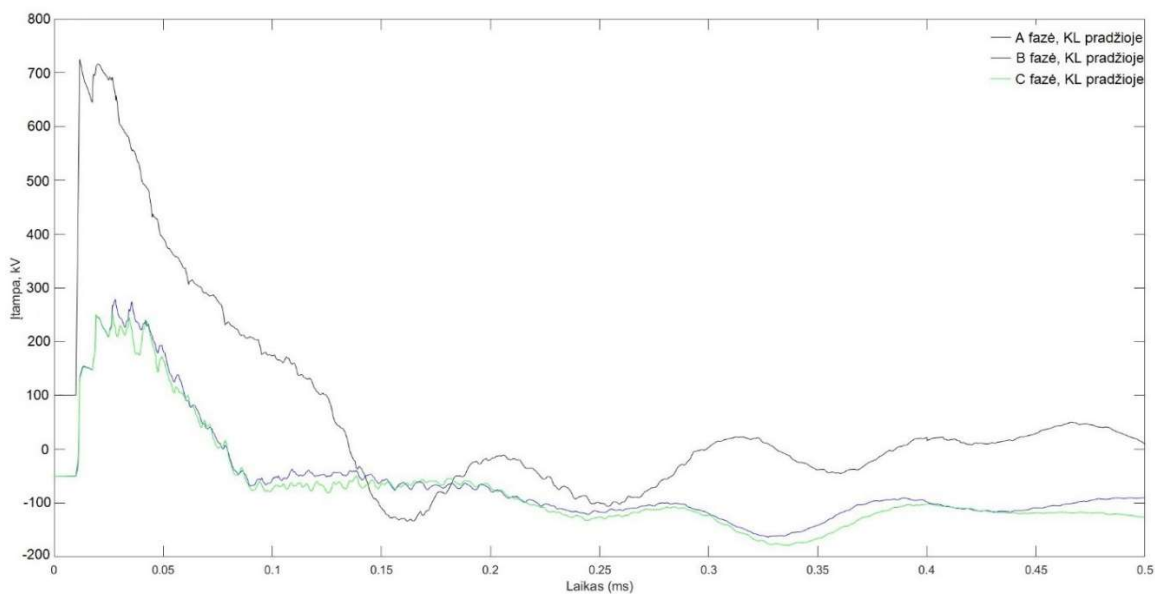
61 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti šalia OL izoliatorių

Kitame grafike (žr. pav. 62) viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti prie OL izoliatorių, bet atramos Nr. 24, viršįtampių ribotuvų ir kabelių ekranų įžeminimo kontūro varža siekia 30Ω . Užfiksuoti didžiausi viršįtampiai A fazėje – 720,69 kV, B fazėje – 275,98 kV, C fazėje – 246,14 kV.



62 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti šalia OL izoliatorių ir įžeminimo kontūro varža - 30Ω

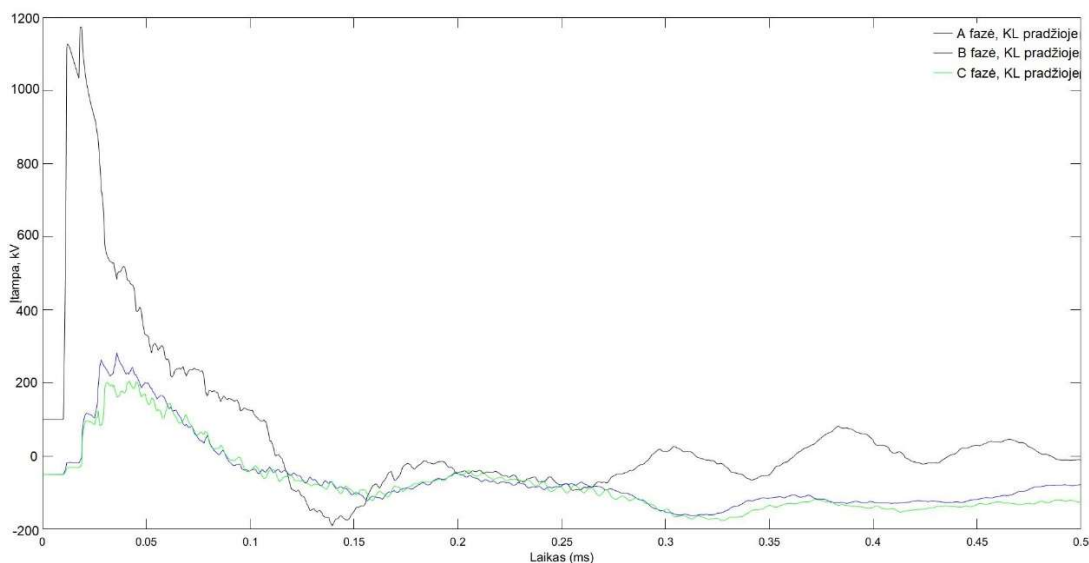
Sekančiame grafike (žr. pav. 63), sumodeliuota atramos Nr. 24, viršįtampių ribotuvų ir kabelių ekranų įžeminimo kontūro varža, kuri siekia 30Ω , viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti viename lygyje, atramos apačioje, kitame kabelių linijos gale įžeminimo kontūro varža - 10Ω . Užfiksuoti didžiausi viršįtampiai A fazėje – 723,76 kV, B fazėje – 278,39 kV, C fazėje - 249,32 kV.



63 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m, įžeminimo kontūro varža - 30Ω ir viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti viename lygyje

Visi sekantys modeliavimai atliekami, kai įžeminimo kontūrų varža - 10Ω .

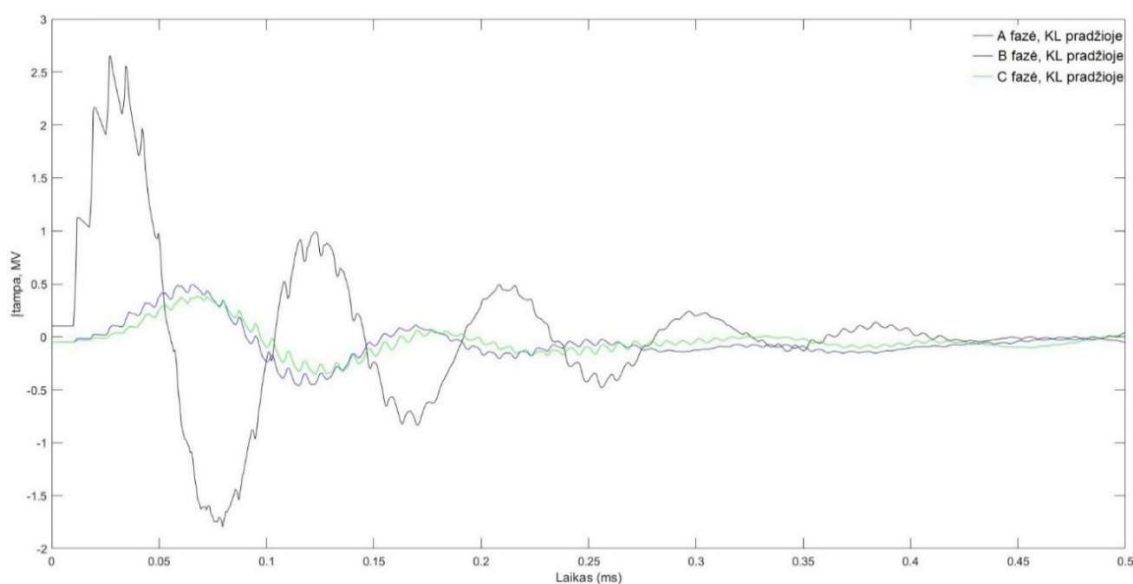
64 paveikslėlyje pavaizduoti pereinamieji vyksmai, kai žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą, kabelių ilgis yra 600 m, abiejų kabelių ekranai išžeminti, išžeminimo kontūro varža - 10Ω , ir tik kabelių linijos gale yra sumodeliuoti viršįtampių ribotuvai.



64 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir kabelių linijos pradžioje nėra viršįtampių ribotuvų

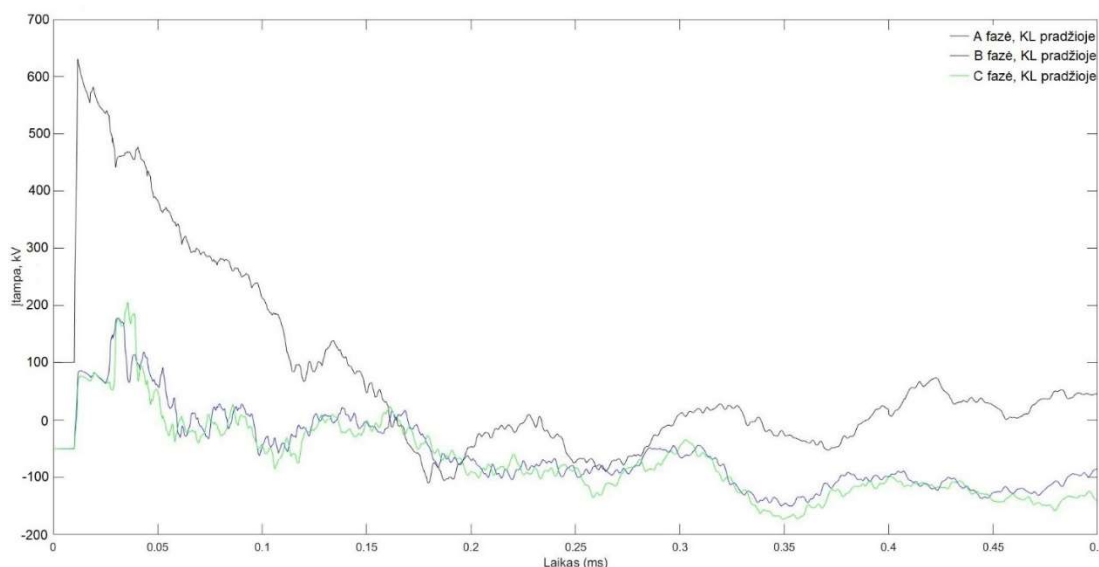
Pastebimi labai dideli viršįtampiai: A fazėje – 1173,07 kV, B fazėje – 278,57 kV, C fazėje – 200,46 kV.

65 paveikslėlyje pavaizduoti pereinamieji vyksmai, kai žaibas pataiko į oro linijos fazinį laidą, kabelių ilgis yra 600 m, abiejų kabelių ekranai išžeminti, išžeminimo kontūro varža - 10Ω ir nėra viršįtampių ribotuvų.



65 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir kabelių linijoje nėra viršįtampių ribotuvų

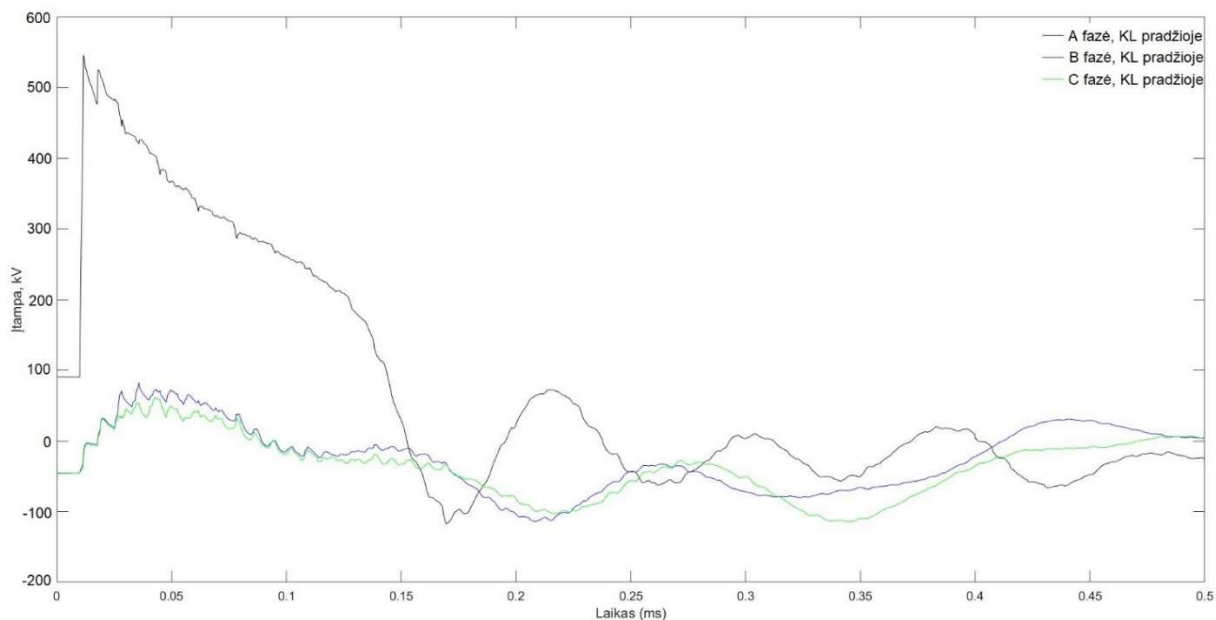
Viršįtampių ribotuvų nebuvimas sukelia labai didelius viršįtampius (žr. pav. 63): A fazėje – 2,65198 MV, B fazėje – -0,44921 MV, C fazėje - -0,35187 MV.



66 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m ir kabelių ekranai neižeminti

Didžiausia užfiksuota įtampa A fazėje – 629,32 kV, B fazėje – 177,71 kV, C fazėje – 205,36 kV (žr. pav. 66).

Sekančiame modeliavime, sumodeliuoti 3 klasės viršįtampių ribotuvai, kurių energijos absorbuojama – 3,2 kJ/kV, ilgalaikė maksimali vardinė įtampa – 6 kV. Šie viršįtampių ribotuvai prijungti prie kabelių ekranų, kabelių linijų pradžioje, kitame kabelių linijų gale kabelių ekranai tik ižeminti.



67 pav. Pereinamieji vyksmai pirmos kabelių linijos, kurios ilgis yra 600 m, KL pradžioje sumodeliuoti ekranų viršįtampių ribotuvai

Pirmos kabelių linijos pradžioje užfiksuotos didžiausios įtampos: A fazėje – 545,53 kV, B fazėje – -116,75 kV, C fazėje – -116,21 kV (žr. pav. 56).

2.2.3. Modeliavimo suvestinė

6 lentelė. Modeliavimo rezultatų suvestinė

Kabėlių linijos ilgis, m	Įžem. kontūro varža, Ω	Viršįtampių ribotuvai KL pradžioje ir pabaigoje	Žaibo išlydžio vieta	Kabėlių ekranai įžeminti KL pradžioje ir pabaigoje	KL numeris	Nustatytas didžiausias viršįtampių lygis KL pradžioje, A fazėje, kV	Nustatytas didžiausias viršįtampių lygis KL pradžioje, B fazėje, kV	Nustatytas didžiausias viršįtampių lygis KL pradžioje, C fazėje, kV
100	10	Yra (sumodeliuoti viename lygyje)	Žaibosaugos trosas	Taip	(1)	245,74	258,16	257,72
					(2)	236,43	255,54	255,25
			OL fazinis laidas (A fazė)		(1)	573,39	-144,11	-161,74
					(2)	198,54	-125,31	-163,65
300	10	Yra (sumodeliuoti viename lygyje)	Žaibosaugos trosas	Taip	(1)	251,81	263,01	263,42
					(2)	236,46	260,16	260,33
			OL fazinis laidas (A fazė)		(1)	559,60	-150,97	-177,66
					(2)	153,76	-95,64	-111,36
600	10	Yra (sumodeliuoti viename lygyje)	Žaibosaugos trosas	Taip	(1)	244,45	270,63	271,58
					(2)	224,39	266,44	265,59
			OL fazinis laidas (A fazė)		(1)	542,11	-141,10	-148,96
					(2)	148,53	-88,43	-123,71
600	30	Yra (sumodeliuoti viename lygyje)	OL fazinis laidas (A fazė)	Taip	(1)	723,76	278,39	249,32
600	10	Yra (sumodeliuoti šalia OL izoliatorių)	OL fazinis laidas (A fazė)	Taip	(1)	537,46	-141,28	-150,24
600	30	Yra (sumodeliuoti šalia OL izoliatorių)	OL fazinis laidas (A fazė)	Taip	(1)	720,69	275,98	246,14
600	10	Tik KL pabaigoje (sumodeliuoti viename lygyje)	OL fazinis laidas (A fazė)	Taip	(1)	1173,07	278,57	200,46
600	10	Nėra	OL fazinis laidas (A fazė)	Taip	(1)	2651,98	-449,21	-351,87
600	10	Yra (sumodeliuoti viename lygyje)	OL fazinis laidas (A fazė)	Ne	(1)	629,32	177,71	205,36
600	10	Yra (sumodeliuoti viename lygyje)	OL fazinis laidas (A fazė)	KL pradžioje KL ekranai su viršįtampių ribotuvais, gale - įžeminti	(1)	545,53	-116,75	-116,21

3. Modeliavimo rezultatai

Modeliavimo rezultatai apibendrinami palyginimo būdu.

- Žaibo išlydžio sukelti impulsai 100 m, 300 m ir 600 m ilgio kabelių linijoje parodo, kad vieta, kurioje susidaro žaibo išlydis yra labai svarbi. Atliktame tyrime buvo imituojamas žaibo išlydis į 110 kV oro linijos atramą, kurioje sumodeliuotos kabelių linijos. Žaibo išlydis imituojamas į žaibosaugos trosą. Iš gautų modeliavimo rezultatų pastebima, kad didžiausia žaibo išlydžio sukelta indukuota įtampa, kai žaibas pataiko į žaibosaugos trosą, 100 m ilgio kabelių linijoje yra 258,16 kV, 300 m ilgio kabelių linijoje – 263,42 kV, 600 m ilgio KL – 271,58 kV. Šios indukuotos įtampos nepaveiks 110 kV kabelių linijų izoliacijos, nes kabeliai pagaminti pagal standartą IEC 62271-1:2017/AMD1:2021, turi atlaikyti elektrinį atsparumą žaibo impulsui iki 550 kV.
- Modeliavimo metu, kai žaibo išlydis buvo imituojamas į oro linijos A fazės laidą, užfiksuoti rezultatai rodo, kad kabelių linijų ilgis turi didelę įtaką sukeltų viršįtampių dydžiui. Kabelių linijos buvo sumodeliuotos su III klasės viršįtampių ribotuvais ir įžemintais kabelių ekranais. Pirmoje 100 m ilgio kabelių linijoje, A fazėje, didžiausias viršįtampis buvo užfiksuotas – 573,39 kV, B fazėje indukuota įtampa – -144,11 kV, C fazėje – -161,74 kV. Antroje kabelių linijoje užfiksuotos indukuotos įtampos – 198,54 kV, B fazėje – -125,31 kV, C fazėje – -163,65 kV. Modeliavimo rezultatai rodo, kad pirmos kabelių linijos, A fazės kabelis, patirtų izoliacijos pažeidimus dėl per didelio viršįtampio, kuris viršija leistiną 550 kV (pagal standartą IEC 62271-1:2017/AMD1:2021) įtampą 23,39 kV, o kiti kabeliai išliktų nepažeisti. 300 m ilgio, A fazės kabelis, taip pat būtų pažeistas, nes viršytų leistiną elektrinį atsparumą žaibo impulsui 9,6 kV, tačiau 600 m ilgio kabelio izoliacija nebūtų pažeista, nes jos didžiausias užfiksuotas viršįtampis siekia 542,11 kV, kas yra mažiau už minimalią leistiną reikšmę pagal standartą IEC 62271-1:2017/AMD1:2021.
- 110 kV atramos, viršįtampių ribotuvų ir ekrano įžeminimo kontūro varža turi didelę reikšmę viršįtampių slopinimui. Palyginti dviejų modeliavimų rezultatai, kai viršįtampių ribotuvai sumontuoti viename lygyje, atramos apačioje, kabelių ekranai įžeminti, kabelių linijų ilgis yra 600 m ir įžeminimo kontūro varža yra 30 Ω ir 10 Ω . Kai įžeminimo kontūro varža yra 30 Ω ir žaibo išlydis imituojamas į oro linijos A fazės laidą, didžiausi užfiksuoti viršįtampiai pirmoje kabelių linijoje, A fazėje – 723,76 kV, B fazėje – 278,39 kV, C fazėje – 249,32 kV. Kai įžeminimo kontūro varža yra 10 Ω , A fazėje – 542,11 kV, B fazėje – -141,10 kV, C fazėje – -148,96 kV. Šie rezultatai rodo, kad įžeminimo kontūro varža labai įtakoja viršįtampių slopinimą.
- Keičiant viršįtampių ribotuvų modeliavimo vietas, buvo pastebėtas nežymus viršįtampių skirtumas, kai viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti šalia oro linijos izoliatorių (trumpesnis OL laidas nuo OL fazės laido iki viršįtampių ribotuvo) ir kai sumodeliuoti oro linijos atramos apačioje, viename lygyje (ilgesnis OL laidas nuo OL fazės laido iki viršįtampių ribotuvo). 600 m ilgio kabelių linijose, kai žaibo išlydis imituojamas į oro linijos A fazės laidą ir viršįtampių ribotuvai sumontuoti šalia izoliatorių, A fazės didžiausias užfiksuotas viršįtampis siekė 537,46 kV. Kai viršįtampių ribotuvai sumodeliuoti oro linijos atramos apačioje, viename lygyje, A fazėje užfiksuota – 542,11 kV. 4,65 kV skirtumas rodo, kad viršįtampių sumontavimo vieta turi būti arčiau oro linijos izoliatorių dėl trumpesnio viršįtampių ribotuvo pajungimo laido.

- Viršįtampių ribotuvų reikalingumas buvo patikrintas sumodeliavus 600 m ilgio kabelių linijas, kai kabelių linijų gale buvo palikti viršįtampių ribotuvai, o KL pradžioje panaikinti ir kitas patikrinimas buvo atliktas, kai visi viršįtampių ribotuvai buvo panaikinti. Žaibo išlydis buvo imituojamas į oro linijos A fazės laidą ir užfiksuoti rezultatai rodo, kad A fazėje viršįtampis pasiekė 1173,07 kV, kai tik viename gale buvo sumodeliuoti viršįtampių ribotuvai ir 2651,98 kV, kai viršįtampių ribotuvų nėra. Iš šių rezultatų galima teigti, kad viršįtampių ribotuvai yra pats svarbiausias kabelių linijas apsaugantis įrenginys.
- Kabelių ekranų įžeminimas patikrintas juos atjungus nuo įžeminimo kontūro. Modeliavime imituojamas žaibo išlydis į oro linijos A fazės laidą, abiejuose KL galuose yra sumodeliuoti viršįtampių ribotuvai, o KL ilgis – 600 m. Modeliavimo rezultatai parodė, kad tai įtakoja atsiradusius viršįtampius. A fazėje užfiksuota didžiausia įtampa – 629,32 kV, B fazėje indukuota įtampa – 177,71 kV, C fazėje – 205,36 kV. Palyginus analogiško modeliavimo rezultatus, kur kabelių ekranai įžeminti, galima pastebėti kabelių linijos, A fazės 87,21 kV. Kitas modeliavimas atliktas, kai KL pradžioje kabelių ekranai prijungti prie viršįtampių ribotuvų, o KL gale kabelių ekranai įžeminti. Pastebimas nedidelis viršįtampio padidėjimas (3,42 kV) dėl ekranų viršįtampių ribotuvo suveikimo laiko.

Išvados

1. Išnagrinėjus literatūros šaltinius, susijusius su aukštosios įtampos kabelių linijų panaudojimu elektros perdavimo tinkluose, buvo pastebėta, kad daugiausia kabelių linijų yra klojama ten kur yra mažas elektros linijų tiesimo koridorius, tankiai apgyvendintos vietos, privaloma išlaikyti estetinį kraštovaizdį, išmaniajam tinklui, naujai įrengiamiems jūriniam vėjo parkams ir kur ribojamas OL įrengimas dėl sveikatos apsaugos taisyklių. Taip pat, tarp 2013-2018 metų, Europoje pastebimas padidėjęs aukštosios įtampos kabelių klojimas tarp valstybių – 10,6 % (AİKS) ir 56,2 % (AİNS).
2. Apžvelgus aukštosios įtampos kabelių gedimų statistiką, pastebima, kad didžiausia dalis gedimų (64 %) atsiranda iš kabelių vidinių gedimų, iš kurių 56 % atsiranda pačio kabelio viduje, 18 % - galinėse movose, 16 % - jung. arba pereinam. movose ir likę 9 % - kituose kabelių linijų komponentuose. Išoriniai kabelių linijų gedimai sudaro mažesnę dalį – 29 %, iš kurių didžiausia dalis priskiriama trečiųjų šalių sukeltiems pažeidimams (82 %), 18 % - kitiems išoriniams gedimams ir likę 3 % - gamtos reiškinių sukeltiems gedimams.
3. Tiriamajame darbe sukurti 110 kV oro linijų, kabelių linijų, viršįtampių ribotuvų ir elektromagnetinių bangų sklidimo linijoje modeliai. Panaudojus kabelių linijų ir viršįtampių ribotuvų matematinius modelius buvo sukurti modeliavimui skirti jų modeliai. Viršįtampių ribotuvų parametrai buvo priderinti prie impulso veikiančio linijų izoliaciją parametru.
4. EMTP aplinkoje sumodeliuotas 110 kV oro linijų su kabelių linijų intarpais modelis leidžia tirti žaibo išlydžio sukeltus pereinamuosius vyksmus kabelių linijų ir oro linijų pasirinktuose taškuose. Sukurtas modelis leidžia įvertinti sumodeliuotų įžeminimo kontūrų varžų, kabelių linijų ilgių, kabelių konstrukcijų, kabelių prijungimo būdų, viršįtampių ribotuvų ir jų modeliavimo vietų parametru kitimą.
5. Atliktų 110 kV kabelių linijų modeliavimo rezultatų analize nustatyta, kad žaibo išlydžio sukelti viršįtampiai yra pavojingiausi kabelio izoliacijai, kai žaibas pataiko į kabelių intarpo artimiausią oro linijos fazinį laidą. Didžiausias pavojus kabelio izoliacijai tenka būtent tos fazės kabeliui, kai viršįtampis pasiekia daugiau nei 550 kV pagal IEC 62271-1:2017/AMD1:2021 standartą.
6. Didelę įtaką kabelių intarpo izoliacijos apsaugojimui ir kabelių linijos patikimumui turi viršįtampių ribotuvai, įžeminimo kontūro varža ir ekranų įžeminimas. Tyrimo metu nustatyta, kad norint apsaugoti kabelių izoliaciją nuo pažeidimų, reikia montuoti ne trumpesnį kaip 600 m ilgio kabelių liniją, abiejuose kabelių linijų galuose sumontuoti III klasės viršįtampių ribotuvus, kurie būtų sumontuoti šalia oro linijos izoliatorių, įžeminti visus kabelių ekranus ir užtikrinti, kad įžeminimo kontūrų varžos būtų ne didesnės kaip 10 Ω , tokiu atveju didžiausias užfiksuotas viršįtampis siektų 537,46 kV, kas yra mažiau už minimalią leistiną reikšmę pagal IEC 62271-1:2017/AMD1:2021 standartą.

Literatūros sąrašas

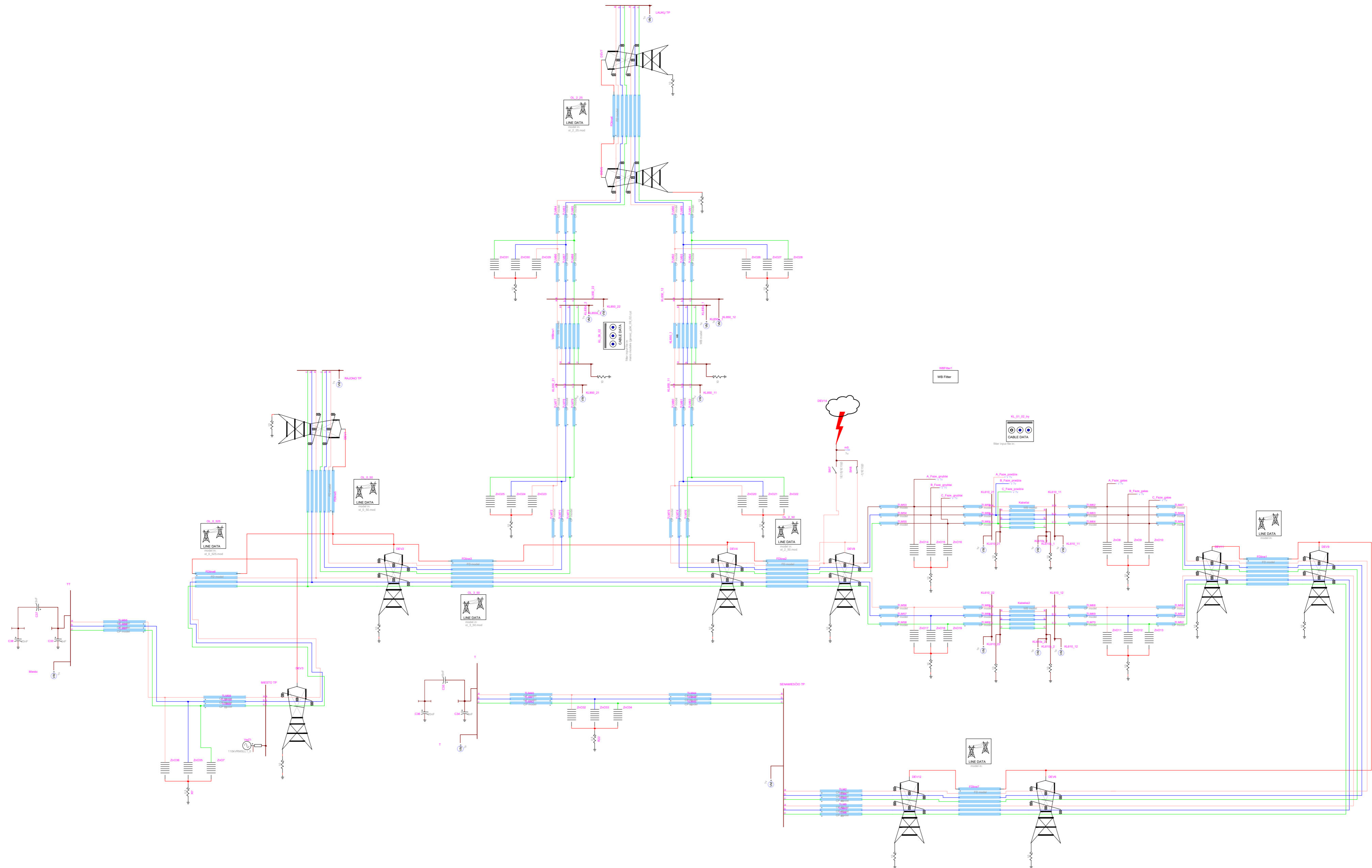
- [1] A. AMETANI, T. OHNO ir N. NAGAOKA. *Cable System Transients Theory Modeling and Simulation*. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015. ISBN 9781118702123.
- [2] C. Emanuel MUELLER, S. Inga KEIL, C. BAUER. *Underground cables vs. overhead lines: Quasi-experimental evidence for the effects on public risk expectations, attitudes, and protest behavior* [interaktyvus]. Elsevier Science, 2018 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0301-4215. Prieiga per: Science Direct.
- [3] H. CHANG, F. CHEN, C. KUO, T. CHEN. *Energy dispatching analysis of lightning surges on underground cables in a cable connection station* [interaktyvus]. Elsevier Science, 2010 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0196-8904. Prieiga per: Science Direct.
- [4] W. CHEN. *The Electrical Engineering Handbook*. Elsevier Academic Press, Elsevier Inc., 2004. ISBN 0-12-170960-4.
- [5] T. ANDRITSCH, A. VAUGHAN ir G. C. STEVENS. *Novel Insulation Materials for High Voltage Cable Systems* [interaktyvus]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2017 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0883-7554/17/. Prieiga per: IEEE Xplore.
- [6] M. MARELLI, P. ARGAUT, H. LUGSCHITZ, K. KAWAKITA. *Overhead transmission lines, gas insulated lines and underground cables*. Electra. Cigre, 2019 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: https://e-cigre.org/publication/RP_307_1-overhead-transmission-lines-gas-insulated-lines-and-underground-cables
- [7] C. Leth BAK, F. Faria da SILVA. *High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 1* [interaktyvus]. Elsevier Science, 2016 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0378-7796. Prieiga per: Science Direct.
- [8] ENTSO-E. *Statistical Factsheet 2013*. ENTSO-E AISBL, 2013 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: <https://www.entsoe.eu/publications/statistics-and-data/#statistical-factsheet>
- [9] ENTSO-E. *Statistical Factsheet 2018*. ENTSO-E AISBL, 2018 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: <https://www.entsoe.eu/publications/statistics-and-data/#statistical-factsheet>
- [10] KBV RESEARCH. *Global High Voltage Cables Market By Installation Type, By End User, By Region, Industry Analysis and Forecast, 2020 - 2026*. Report, KBV Research, 2020.
- [11] CIGRE. *Update of service experience of HV underground and submarine cable systems*. Cigre, 2020 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: <https://e-cigre.org/publication/815-update-of-service-experience-of-hv-underground-and-submarine-cable-systems>
- [12] C. DENSLEY. *Ageing Mechanisms and Diagnostics for Power Cables – An Overview* [interaktyvus]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0883-7554/01/. Prieiga per: IEEE Xplore.
- [13] Q. XIE, H. CHEN, Y. YUAN. *Heat blockage of air gap for inner overheating of high-voltage power cable and delay of early detection*. Journal of Fire Sciences, 2020 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: Research Gate.
- [14] S. HVIDSTEN, H. FAREMO, R. ERIKSSON, W. MIN. *Water Treeing and Condition Assessment of High Voltage XLPE Cables*. Journal of Fire Sciences [interaktyvus]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002 [žiūrėta 2022-03-09]. ISBN 0-7803-7337-5/02/. Prieiga per: IEEE Xplore.

- [15] N. HAMPTON. *HV and EHV Cable System Aging and Testing Issues*. Georgia Tech Research Corporation, 2016 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: https://www.neetrac.gatech.edu/publications/CDFI/3-HV-Issues-7_with-Copyright.pdf
- [16] J. BAUBLYS ir kt. *Žaibas. Apsauga nuo žaibo*. AB „Lietuvos energija“, 2006. ISBN 9986-858-28-3.
- [17] V. M. MANSOOR ir kt. *Throwing light on lightning* [interaktyvus]. Elsevier Science, 2020 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 2214-7853. Prieiga per: Science Direct.
- [18] S. ENNO, J. SUGIER, R. ALBER, M. SELTZER. *Lightning flash density in Europe based on 10 years of ATDnet data* [interaktyvus]. Elsevier Science, 2019 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0169-8095. Prieiga per: Science Direct.
- [19] S. A. LEDARI, M. MIRZAIE. *Sheat induced voltage prediction of high voltage cable based on artificial neural network*. [interaktyvus]. Elsevier Science, 2020 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0045-7906. Prieiga per: Science Direct.
- [20] SP ENERGY NETWORKS. *Case Study: HV Cable damaged on construction site*. SP Energy Networks, 2011 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: https://www.spenergynetworks.co.uk/userfiles/file/mechanical_plant_hv_damages.pdf
- [21] V. BUCHHOLZ. *Finding the Root Cause of Power Cable Failures*. Jaguar Expo Inc., 2004 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: https://electricenergyonline.com/show_article.php?article=186
- [22] M. RERAK, P. OCLON. *The effect of soil and cable backfill thermal conductivity on the temperature distribution in underground cable system* [interaktyvus]. EDP Sciences, 2016 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: Research Gate.
- [23] J. R. CARSON. *Wave propagation in overhead wires with ground return* [interaktyvus]. The Bell System Technical Journal, 1926 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0005-8580. Prieiga per: IEEE Xplore.
- [24] S. A. SCHELKUNOFF. *The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields* [interaktyvus]. The Bell System Technical Journal, 1934 [žiūrėta 2022-03-09]. ISSN 0005-8580. Prieiga per: IEEE Xplore.
- [25] A. S. AL-FUHAID, E. A. OUFU, M. M. SAIED. *Application of nonuniform-line theory to the simulation of electromagnetic transients in power systems*. Electrical Power & Energy Systems 1998, v. 20, № 3, p. 225-233.
- [26] К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А. Рейхердт. *Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них*. Новосибирск: Изд-во НГТУ 2004 p. 319.
- [27] IEEE W.G. *Application of Surge Protective Devices Committee. Modeling of metal oxide surge arresters* [interaktyvus]. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No.1, 1992 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: IEEE Xplore.
- [28] A. MEISTER, R. A. SHAYANI, M. A. G. DE OLIVIEIRA. *Comparison of metal oxide surge arrester models in overvoltage studies* [interaktyvus]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2012 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: Research Gate.
- [29] S. TOMINAGA, K. AZUMI, Y. SHIBUYA, M. IMATAKI, Y. FUJIWARA, S. NISHIDA. *Protective Performance of Metal Oxide Surge Arrester Based on the Dynamic V-I Characteristics* [interaktyvus]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: IEEE Xplore.

- [30] K. P. MARDIRA, T. K. SAHA. *A Simplified Lightning Model for Metal Oxide Surge Arrester* [interaktyvus]. The University of Queensland, 2002 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: Research Gate.
- [31] F. FERNANDEZ, R. DIAZ. *Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations* [interaktyvus]. National University of Tucuman, 2001 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: Research Gate.
- [32] LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA. *Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymas dėl Elektros linijų ir instaliacijos įrengimo taisyklių patvirtinimo*. Galiojanti suvestinė redakcija (nuo 2020-07-31), [žiūrėta 2022-03-09].
- [33] LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA. *Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymas dėl Elektros įrenginių įrengimo bendrųjų taisyklių patvirtinimo*. Galiojanti suvestinė redakcija (nuo 2020-07-31), [žiūrėta 2022-03-09].
- [34] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. [IEC 62271-1:2017/AMD1:2021]. *Amendment 1 – High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear*. International electrotechnical commission, 2021, [žiūrėta 2022-03-09].
- [35] AB LITGRID. *Standartiniai techniniai reikalavimai 110 kV įtampos kabeliams su plastmasine izoliacija*. AB Litgrid, 2020, [žiūrėta 2022-03-09].
- [36] ABB. *XLPE Land Cable Systems. User's Guide*. ABB, 2010, [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per internetą: <https://dokumen.tips/engineering/abb-xlpe-land-cable-system-users-guide.html>
- [37] A. R. SEFTIM, F. CRUZ, S. PEDEBOY, S. S. METEORAGE. *Lightning risk: how to improve the calculation?* [interaktyvus]. Cigre, 2019 [žiūrėta 2022-03-09]. Prieiga per: Research Gate.
- [38] A. GULBINAS ir kt. *Technologijos ir menas*. Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija, 2016. ISSN 2029-400X.

Priedai

1 priedas. 110 kV tinklo EMTP programos modelis



Bylos Nr		Papildoma informacija 1 Priedas		Medžiaga		Mastelis	
Atsakinga žinyba EEF		Konsultantas		Dokumento tipas Schema		Dokumento statusas Mokomasis	
Savininkas KTU E MEEI-0		Rengė D. Šliuža Tikrino		Antraštė 110 kV tinklo EMTP programos modelis			
Laida A	Data	Kaiba lt	Lapas 1				