



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Viršitampių įtakos įrenginių izoliacijai tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Justinas Gražys

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Viršįtampių įtakos įrenginių izoliacijai tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Justinas Gražys

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Doc. Renata Miliūnė

Recenzentė

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Justinas Gražys

Viršįtampių įtakos įrenginių izoliacijai tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Gražys, Justinas. Viršįtampių įtakos įrenginių izoliacijai tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: viršįtampiai, patikimumas, skirstomasis tinklas.

Kaunas, 2020. 66 p.

Santrauka

Viršįtampių pereinamųjų vyksmų elektros sistemose apskaičiavimas ir prognozavimas yra svarbus uždavinys, parenkant izoliacijos lygį, įvertinant apsaugos priemonių nuo viršįtampių darbo sąlygas. Ypač svarbu nustatyti viršįtampių pereinamųjų vyksmų parametrus veikiančius elektros įrenginių izoliaciją kartojant linijos įjungimą. Dėl sudėtingos elektros schemos ir elektromagnetinių bangų savybių elektros tinklo įrenginių izoliacija, ypač kartojant jungimą su liekamuoju krūviu po linijos atjungimo, gali būti paveikta aukštesnės amplitudės ir trukmės pereinamojo vyksmo įtampų, viršijančių standartines gamintojo garantuotas bandomąsias įtampas. Remiantis atliktais tyrimais ir metodine medžiaga, siekiant išvengti aukšto viršįtampių lygio automatiškai kartojant linijos jungimą, apskaičiuota optimali automatinio kartotinio įjungimo pauzė taip, kad kartotinio jungimo metu liekamasis krūvis būtų leistinas ir nepažeistų įrenginių izoliacijos.

Gražys, Justinas. Evaluation of the Effect of Overvoltages on the Insulation of Equipment. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Gudžius Saulius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area: power engineering, engineering sciences.

Keywords: overvoltages, distribution network, reliability.

Kaunas, 2020. 66.

Summary

The calculation and prediction of overvoltage transients in electrical systems is an important task in selecting the level of insulation, taking into account the working conditions of overvoltage protection measures. It is especially important to determine the parameters of overvoltage transients that affect the insulation of electrical equipment when repeating the switching on of the line. Due to a complex electrical circuit and the characteristics of the electromagnetic waves, the insulation of mains equipment, especially when reconnecting a line that has residual charge, may be affected by transient voltages of higher amplitude and duration exceeding the standard test voltages guaranteed by the manufacturer. Based on the performed research and methodological material, in order to avoid high overvoltage levels during automatic line reconnection, the optimal automatic reconnection pause was calculated so that the residual load during reconnection would be within allowed levels and would not damage the equipment insulation.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Viršįtampiai.....	13
1.1. Atmosferos įtaka viršįtampiams	13
1.2. Viršįtampių klasifikavimas.....	14
2. Elektros energijos kokybė.....	16
2.1. Įtampos nuokrypis	16
2.2. Staigūs įtampos pokyčiai	16
2.3. Staigūs įtampos kryčiai.....	16
2.4. Trumpieji tiekiamos įtampos pertrūkiai	16
2.5. Ilgieji tiekiamos įtampos pertrūkiai	17
2.6. Įtampos dažnis	17
2.7. Pramoninio dažnio viršįtampiai tarp laidininko ir žemės.....	17
2.8. Įtampos asimetrija	17
2.9. Pereinamieji viršįtampiai tarp laidininkų ir žemės.....	17
3. Elektros įrenginių izoliacija.....	19
3.1. Skirstomojo elektros tinklo gedimų analizė	19
4. Automatinis kartotinis įjungimas	21
5. Viršįtampių pereinamųjų vyksmų matematiniai modeliai.....	22
5.1. Elektros oro linijų modeliai	22
5.2. Elektros kabelių linijų modeliai.....	28
5.3. Elektromagnetinių bangų sklaidos linijoje modeliai	30
5.4. Viršįtampių ribotuvo modelio charakteristikų suderinimas	34
6. Įžemėjimo sukeltų viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas	40
6.1. Pereinamųjų vyksmų registravimas.....	40
6.2. Tinklo charakteristikų nustatymas.....	43
6.3. AKĮ pauzės kombinuotame oro ir kabelių tinkle trukmės tyrimas.....	47
6.3.1 Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Molėtų TP L-600 linijoje.	47
6.3.2. Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Rokiškio TP L-300 linijoje.	51
6.3.3. Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Rokiškio TP L-900 linijoje.	55
6.3.4. Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Rokiškio SP-4 LR-1000 linijoje.....	58
6.4. AKĮ pauzės kombinuotame oro ir kabelių tinkle parinkimas.....	60
Išvados	63
Literatūros sąrašas	64

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Ilgi elektros energijos nutraukimai (gedimų skaičius/100 km/metus)	20
2 lentelė. Faktorių A_0 ir A_1 vertės	36
3 lentelė. Atrinktų tyrimams linijų charakteristika	47
4 lentelė. AKĮ paūzės nustatymo iliustracija	62

Paveikslų sąrašas

1 pav. Lietuvos teritorijos suskirstymas pagal perkūnijos trukmę.....	13
2 pav. Vidinių viršįtampių tipinė forma aukštosios įtampos įrenginiuose [3].....	15
3 pav. Impulsinis pereinamasis procesas	18
4 pav. Švytuojantis pereinamasis procesas	18
5 pav. Linijos geometriniai parametrai: h_k – laido pakabinimo aukštis; d_{ks} – atstumas tarp laidų; b'_{ks} – atstumas tarp veidrodinio atspindžio ir gretimo laido; k, s – laidai; k' – veidrodinis atspindys. ...	23
6 pav. Lyginamojo linijos laido žemės impedanso modulio priklausomybė nuo dažnio; 1 – Carson'o integralu; 2 – su patikslinta grunto įtaka; savitasis grunto laidis – 0,1 mS/m, santykinė grunto dielektrinė konstanta – 10.....	23
7 pav. Laido banginės varžos priklausomybė nuo aukščio iki laido, kai laido spindulys: (1) – 5 mm, (2) – 8 mm ir (3) – 11 mm.....	24
8 pav. Linijos banginių kanalų absoliutinės dažninės funkcijų charakteristikos; 1 – tarplaidinių kanalų, 2 – kanalo laidai-žemė	26
9 pav. Linijos banginių kanalų realiosios dažninių perdavimo funkcijų charakteristikos; 1 – tarplaidinių kanalų, 2 – kanalo laidai-žemė.....	27
10 pav. Linijos banginių kanalų pereinamųjų funkcijų charakteristikos; 1 – tarplaidinių kanalų, ...	27
11 pav. Kabelio ekranas ir apsauginis šarvas.....	28
12 pav. Izoliacinis tarpas tarp elektrodų	28
13 pav. Žaibo impulsinės bangos sklaida linijoje	30
14 pav. IEEE modelio ekvivalentinė viršįtampių ribotuvo schema.....	35
15 pav. Supaprastinta ekvivalentinė viršįtampių ribotuvo schema.....	35
16 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su induktyvumu	36
17 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su netiesiniu induktyvumu	37
18 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis	37
19 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis be talpos elemento.....	38
20 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis	38
21 pav. Standartinis žaibo srovės impulsas derinant klasikinį IEEE modelį	39
22 pav. Registruojančio įtaiso prijungimo prie įtampos transformatoriaus schema	40
23 pav. Molėtų TP L-600 linijos schema įžemėjimo eksperimentui	41
24 pav. Specialus srovės ir įtampos matavimo transformatorius registratoriui	41
25 pav. Molėtų linijos 600/14 atramoje prie vidurinio laido prijungtas specialus srovės ir įtampos matavimo transformatorius.....	42
26 pav. Transformatorinėje MT M-633 prijungtas viršįtampių registratorius.....	42
27 pav. Įtampos pereinamasis vyksmas nepažeistoje fazėje atjungiant įžemėjusią liniją.....	44
28 pav. Linijos atjungimo pereinamasis vyksmas atjungiant liniją be įžemėjimo.....	44
29 pav. Viso eksperimento įtampos vyksmo registracija.....	45
30 pav. Fazinės srovės pereinamojo vyksmo registracija viso eksperimento metu.....	45
31 pav. Pradinis fazinės srovės nepažeistoje fazėje pereinamasis vyksmas jungiant liniją su įžemėjimu	46
32 pav. Pradinis fazinės srovės pereinamasis vyksmas jungiant liniją	46
33 pav. Molėtų TP L-600 linijos schema	48
34 pav. Molėtų TP L-600 linijos skaičiuojamoji schema	49
35 pav. Molėtų TP L-600 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas .	50

36 pav. Molėtų TP L-600 linijos (įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas	51
37 pav. Rokiškio L-300 linijos schema.....	52
38 pav. Rokiškio L-300 linijos ekvivalentinė schema	53
39 pav. Rokiškio TP L-300 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas	54
40 pav. Rokiškio TP L-300 linijos (įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas	54
41 pav. Rokiškio L-900 linijos schema.....	55
42 pav. Rokiškio L-900 linijos ekvivalentinė schema	56
43 pav. Rokiškio TP L-900 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas	57
44 pav. Rokiškio TP L-900 linijos (įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas	57
45 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos schema.....	58
46 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos ekvivalentinė schema	59
47 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas	59
48 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos (įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas.....	60
49 pav. Kombinuotos oro ir kabelių linijos supaprastintos schemos iliustracija	61

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

AKI – automatinis kartotinis įjungimas;

Terminai:

Elektros inžinerinis tinklas (elektros tinklas) – tarpusavyje sujungtų oro bei kabelių elektros linijų, skirstyklų, transformatorių pastočių, skirstomųjų punktų bei transformatorių, kurios skirtos elektros perdavimui bei skirstymui, visuma.

Elektros įrenginio patikimo veikimo būklė – elektros įrenginio būklė, kuomet jis geba atlikti visokias jam priskirtas funkcijas, išlaikydamas tokius naudojimo parametrus, kurie yra nurodyti dokumentuose, tai yra norminius ar konstravimo (projektavimo).

Elektros įrenginys susilpninta izoliacija – toks elektros įrenginys, kurio izoliacija srovinėse dalyse (kuri atitinka tam tikram įrenginiui keliamus reikalavimus) apsaugo nuo elektros smūgio bei kurio apsaugojimui nuo atmosferinių viršįtampių turėtų būti panaudojamos specialiosios priemonės.

Elektros energijos persiuntimo atkūrimo trukmė – laikas, per kurį klientui turėtų būti atkurtas elektros energijos persiuntimas po nutraukto elektros energijos persiuntimo pasak nustatytos aprūpinimo elektra patikimumo kategorijos.

Įžemėjimas – kompensuotosios ar izoliuotosios neutralės tinklų elektros įrangos aktyviųjų dalių su įžemintomis įrenginio dalimis ar su žeme atsitiktinis susijungimas.

Įžemėjimo srovė – srovė įžemėjimo vietoje tekanti į žemę.

Nenormalus režimas – įrangos darbinio režimo esminių dydžių nukrypimas toliau negu nustatytosios ribos, pavyzdžiui, perkrova (srovės padidėjimas), įtampos padidėjimas arba sumažėjimas bei t. t.

Vienfazis įžemėjimas – toks, kuris nesukelia didelių srovių, trumpasis jungimas tarp fazinio laido bei žemės izoliuotosios (ar įžemintos per kompensacinę ritę) neutralės tinkle.

Dvigubasis įžemėjimas – trumpasis jungimas tarp žemės bei dviejų fazinių laidų dvejose skirtingose vietose izoliuotosios neutralės (ar įžemintos per kompensavimo ritę) tinkle.

Viršįtampių ribotuvas – elektros aparatas su nuosekliai sujungtais nelinijiniais metalo oksido varžais be kibirkštinių tarpų, kuris saugo įrenginius nuo atmosferos bei vidinių viršįtampių.

Patikimumas – objekto savybė tam tikrą laiką atlikti savo funkcijas ir išlaikyti tam tikrus nustatytus eksploatacijos savybių parametrus, rodiklių vertes.

Ilgamžiškumas – objekto savybė išlaikyti darbingumą iki ribinės būsenos, įskaitant priežiūros ir remonto pertraukas.

Gedimas – visiškas arba dalinis objekto darbingumo praradimas. Gedimai gali būti klasifikuojami pagal ryšį su kitais gedimais į priklausomus ir nepriklausomus.

Įvadas

Elektros tinkle dėl įvairių vidinių ir išorinių veiksnių susidaro sąlygos pereinamųjų vyksmų metu įtampai pakilti virš didžiausios leistinos įtampos. Elektros įrenginių izoliacija yra suprojektuota taip, kad trumpą laiką išlaikytų įtampos šuolius. Viršįtampių pažeminimui yra taikomos įvairios priemonės, keičiant linijos režimo parametrus (šuntuojantys reaktoriai), naudojant valdomus jungtuvus su šuntuojančiomis varžomis komutaciniams viršįtampiams pažeminti, o veiksmingiausiai viršįtampių lygius pažemina įvairių tipų iškrovikliai bei viršįtampių ribotuvai. Linijų veikimo atstatymo operatyvumui padidinti yra taikomas automatinis kartotinis įjungimas (AKI).

Viršįtampių pereinamųjų vyksmų elektros sistemose apskaičiavimas ir numatymas yra svarbus uždavinys, parenkant izoliacijos lygį, įvertinant apsaugos priemonių nuo viršįtampių darbo sąlygas. Ypač svarbu nustatyti viršįtampių pereinamųjų vyksmų parametrus veikiančius elektros įrenginių izoliaciją pakartotinai įjungiant liniją. Dėl gana sudėtingos schemos ir elektromagnetinių bangų savybių elektros tinklo įrenginių izoliacija, ypač kartojant jungimą su liekamuoju krūviu po linijos atjungimo, gali būti paveikta aukštesnės amplitudės ir trukmės pereinamojo vyksmo įtampų, viršijančių standartines gamintojo garantuotas bandomąsias įtampas. Siekiant, kad būtų išvengta aukšto viršįtampių lygio automatiškai kartojant linijos jungimą, turi būti kontroliuojamas krūvio nutekėjimas atjungus liniją arba parenkama AKI pauzė taip, kad kartotinio jungimo metu liekamasis krūvis būtų leistinas ir nepažeistų įrenginių izoliacijos.

Viršįtampių modeliavimui kombinuotoje oro ir kabelių linijoje reikia sudaryti elektros tinklų skaičiuojamąją schemą, apskaičiuoti jos elementų parametrus ir pasirinktu metodu, sprendžiant elektromagnetinių procesų lygtis, apskaičiuoti galimą viršįtampių lygį. Pagal apskaičiavimų rezultatus galima nustatyti, kokie liekamųjų įtampų lygiai elektros tinkluose gali būti pavojingi bei kokias apsaugos priemones naudoti.

Viršįtampių pereinamųjų vyksmų analizei, apskaičiavimui bei jų lygio prognozei galėtų būti panaudojami specializuoti skaitmeniniai viršįtampių analizatoriai. Viršįtampių analizatorius, kuris įvertina elektros sistemos struktūrą ir įvairius veiksnius, gali ganėtinai greitai bei tiksliai nustatyti viršįtampių statistines arba funkcines charakteristikas, prognozuoti izoliacijos pajėgumą, įvertinti įrenginių izoliacijos bei apsaugos nuo viršįtampių priemonių darbo sąlygas. Šių parametrų nustatymas yra vienas svarbiausių uždavinių patikimam įrenginių darbui garantuoti. Pastaruoju metu viršįtampių pažeminimui naudojami ribotuvai, kurie gana sėkmingai pakeitė iškroviklius. Viršįtampių ribotuvai jungiami į tinklą be kibirkštinio tarpelio ir pradeda veikti tuomet, kai įtampa tinkle viršija didžiausią leistinąją ilgalaikio darbo įtampa, todėl jie taip pat riboja ir komutacinius bei ferorezonansinius viršįtampius, taip pat ir pagreitina krūvio nutekėjimą atjungus.

Darbo tikslas – sudaryti viršįtampių pereinamųjų vyksmų matematinį modelį ir ištirti krūvio nutekėjimo vyksmą atjungus liniją, esant įžemėjimui galvaniškai sujungtame elektros tinkle.

Darbo aktualumas – elektros energijos vartotojai tampa vis labiau priklausomi nuo patikimo ir pastovaus elektros energijos tiekimo. Elektros įrenginių ir linijų patikimumas priklauso nuo izoliacijos būklės, išorinių veiksnių, gedimų skaičiaus ir kt. Šiame darbe bus apžvelgta viršįtampių įtaka elektros įrenginiams, linijoms ir jų izoliacijai nuo kurių tiesiogiai priklauso elektros energijos tiekimo patikimumas.

Darbo uždaviniai:

1. atlikti viršįtampių charakteristikų elektros skirstomajame tinkle analizę ir įvertinti jų įtaką elektros tinklo patikimumui;
2. patikslinti skaitmeninio viršįtampių elektros tinkle modelio parametrus, naudojantis eksperimentiškai nustatytais tinklo charakteristikomis;
3. ištirti elektros tinklo charakteristikų įtaką viršįtampių lygiui automatinio kartotinio įjungimo metu.

1. Viršitampiai

1.1. Atmosferos įtaka viršitampiams

Atmosferos išlydis, yra įvardijamas kaip vienas iš pavojingiausių reiškinų elektros įrangai bei jos izoliacijai. Pažeidimų gausa priklauso nuo perkūnijos trukmės, t. y., nuo žaibavimo valandų skaičiaus per metus. Nustatyta, kad įvairiuose Lietuvos rajonuose žaibuoja vidutiniškai nuo 24 iki 50 valandų per metus. Lietuvos teritorijos suskirstymas pagal perkūnijos trukmę pavaizduotas 1 pav.. [1]



1 pav. Lietuvos teritorijos suskirstymas pagal perkūnijos trukmę

Žaibas – vienas iš pavojingiausių ir pagrindinių priežasčių, sukeliančių atsijungimus vidutinės įtampos skirstomajame tinkle. Žaibai sukelia neigiamų padarinių: elektros linijose sukelia viršitampius, sugadina elektros įrenginius bei jų izoliaciją, sukelia įtampos trikdžius. Lietuvoje kasmet dėl žaibo iškrovų patiriami didžiuliai nuostoliai. Žaibas, pataikęs į energetikos objektą, padaro tiesioginę arba netiesioginę įtaką [2]. Perkūnijos metu elektros linijose susidaro viršitampiai.

Viršitampiu vadinamas bet koks įtampos padidėjimas virš aukščiausios leistinosios tinklo įtampos. Susiformavę viršitampiai elektros tinkle gali iki kelių kartų viršyti aukščiausią leistinąją įtampą ir elektros įrenginių izoliaciją veikti skirtingą laiko tarpą. Poveikio trukmė elektros įrenginių izoliacijai labai priklauso nuo viršitampius sukėlusio trikdžių pobūdžio. Viršitampiai, atsirandantys elektros grandinėse, yra skirstomi į tris tipus, t. y., atmosferinius, vidinius bei statinius.

- Vidiniai viršitampiai, kitaip vadinami komutaciniais, atsiranda įjungiant bei išjungiant didelės galios elektros vartotojus, itin indukcinio ar talpinio pobūdžio;
- Atmosferiniai – atsiranda kuomet žaibo išlydis pataiko į maitinamą elektros tinklą arba šalia;
- Statiniai – kyla elektrostatiinių iškrovų metu, susikaupus skirtingiems elektros krūviams.

Šiuolaikiniai elektros vartotojai turi daugybę naudojamų elektroninių prietaisų kurie yra jautrus viršitampiams (kompiuteriai, televizijos ir radijo imtuvai, vaizdo aparatūra, matavimo prietaisai, valdymo ir apsaugos sistemos). Trumpalaikių viršitampių nuostoliai pasireiškia ne tik nuostoliais,

bet ir sugadintais elektroniniais prietaisais, dažnai sunaikinama įrenginyje buvusi svarbi informacija.

Viršįtampiai elektros tinkle, susiformavę dėl įvairių išorinių ir vidinių trikdžių, gali viršyti elektros įrenginių gamintojų garantuotas bandomąsias įtampas. Viršįtampių ribotuvai reikalingi tam, kad viršįtampių sukelta įtampa būtų sumažinta, žvelgiant į tai galime daryti išvadą, kad izoliacijos bei viršįtampių lygis turi didelę įtaką elektros linijų medžiagų kainai ir patikimumui.

1.2. Viršįtampių klasifikavimas

Viršįtampiai klasifikuojami:

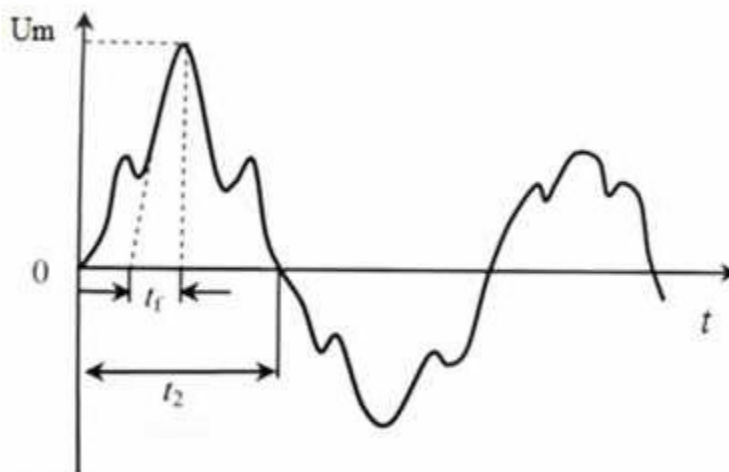
- ilgalaikė leistinoji didžiausia pramoninio dažnio įtampa;
- laikinieji viršįtampiai (rezonansiniai);
- pereinamieji viršįtampiai (trumpos trukmės viršįtampiai, t_f – impulso fronto trukmė, t_2 – viršįtampių impulso trukmė):
 - nuožulnaus fronto viršįtampis, $20 \mu\text{s} \leq t_f \leq 5000 \mu\text{s}$, $t_2 \leq 2\text{ms}$;
 - stataus fronto viršįtampis, $0,1 \mu\text{s} \leq t_f \leq 20 \mu\text{s}$, $t_2 \leq 300\mu\text{s}$;
 - labai stataus fronto viršįtampis, pikinis laikas $\leq 0,1 \mu\text{s}$, suminis laikas $< 3 \text{ms}$, dažnis $30\text{kHz} < f < 100\text{MHz}$.

Viršįtampių lygis yra vertinamas santykiniais vienetais (1 s. v. yra leistinoji elektros tinklo nominalioji įtampa). Priklausomai nuo įvairių elektros tinklo parametrų pokyčio aplinkybių, viršįtampių lygiai gali būti tokie:

- **1,0 – 1,5 s. v.** Linijos ar kabelio aktyviosios galios bei reaktyviosios apkrovos atjungimas. Šių svyravimų viršįtampių dažnis yra artimas tinklo dažniui;
- **1,5 – 2,0 s. v.** Trumpojo jungimo atjungimas. Šių viršįtampių dydis yra priklausantis nuo elektros sistemos vietos, t. y. trumpasis jungimas galėtų būti generatoriuje ar linijoje, bei taipogi nuo nulinės ir tiesioginės varžų santykio (Z_C/Z_1).
 - Linijos bei kabelio prijungimas per induktyvumą. Panašios, tačiau sudėtingesnės formos bangos yra gaunamos, kuomet žemosios įtampos pusėje yra prijungiama linija ar kabelis su transformatoriumi;
 - Rezonansiniai viršįtampiai energetikos sistemoje galėtų atsirasti pasikeitus santykiui sistemos fizikinių parametrų. Ši situacija energetinėje sistemoje galėtų susidaryti trumpojo jungimo atjungimo metu. Linija trumpai lieka prijungta viena ar dviem fazėmis bei vadinamas nepilnafazis režimas.
- **2,0 – 2,05 s. v.** Linijos atjungimas. Viršįtampio dydis nutolusiame atvirame gale yra priklausantis nuo jungtuvų visų trijų polių susijungimo vienalaikiškumo;
- **2,5 – 3,0 s. v.** Transformatoriaus ar reaktoriaus atjungimas tuščiosios veikos srovės. Viršįtampių dydis yra priklausantis nuo jungtuvu nutrauktos srovės dydžio, kuomet lankas jungtuve yra gesinamas anksčiau nei tuščiosios veiklos srovė pakeičia ženklą. Viršįtampiai susidaro dėl indukcinėje grandinėje liekamosios srovės.
 - Įjungimas linijos su transformatoriumi gale. Jei transformatorius yra nutolusios linijos gale, tai prie jo atvirų antrinės grandinės gnybtų bus dvigubai aukštesnė

įtampa, kuomet bangos sklidimo linija trukmė yra lygi transformatoriaus švytavimų periodui, įmanoma sudaryti ir daug aukštesnę įtampą.

- **3,0 s. v. ir daugiau.** Kartotinis kabelio ar linijos įjungimas. Įtampa nutolusiame atvirame gale išauga dėl krūvio, išlikusio po veikiančios linijos atjungimo. Grandinė su reaktyviosios galios kompensavimo įrenginiais po atjungimo švytuoja kelias dešimtąsias sekundės su amplitude, kuri yra lygi pilnai apkrovai, bei dažniu artimu pramoniniam. Jeigu linijos liekamojo krūvio ir šaltinio įtampų fazių skirtumas didžiausias (iki 2,0 s. v.) kartotinio įjungimo momentu likęs krūvis galėtų sukelti papildomą įtampos padidėjimą 1,0 s. v.



2 pav. Vidinių viršįtampių tipinė forma aukštosios įtampos įrenginiuose [3]

2. Elektros energijos kokybė

Elektros energijos kokybė tapo svarbia elektros energetikos sistemų dalimi. Elektros energija yra produktas ir kaip bet kuris kitas produktas, turi atitikti tinkamus kokybės reikalavimus. Elektros energijos kokybės tyrimai apima eksperimentinę plėtrą, suprantamą kaip sistemingą darbą, atliekamą besiremiant tyrimu arba įgytomis žiniomis praktinės veiklos metu ir kurio tikslas yra sukurti naujus produktus, medžiagas arba įrenginius, diegti naujas ar iš pagrindo tobulinti jau anksčiau sukurtas bei įdiegtas sistemas, procesus, paslaugas. Pastaraisiais metais Lietuvoje elektros tinklo įtampos kokybės kontrolės problema tampa vis aktualesne. Tuo ypač suinteresuoti klientai, kurių įrenginiai arba prietaisai yra jautrūs elektros įtampos iškraipymams. Kita vertus, tiekėjai taip pat nėra abejingi šiai problemai, kadangi kai kurių klientų prietaisai dėl savo veikos principo patys skleidžia triukšmą ir iškraipymus į tinklą.

Pagrindinis dokumentas, kuriame aptariami reikalavimai elektros energijos kokybei, yra LST EN 50160:2010 „Viešųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos“ standartas, apibūdinantis elektros energijos įtampos parametrus elektros tinklų sistemose.

2.1. Įtampos nuokrypis

Europos LST EN 50160:2010 standartas rekomenduoja, kad įtampa skirstomuose elektros tinkluose ne mažiau negu 95 procentus laiko nuo nominaliosios skirtųsi ne daugiau negu $\pm 10\%$.

$$\Delta U = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

Čia: U – faktinė imtuvo įtampa V ;

U_n – nominalioji įtampa V .

Įtampos nuokrypis galėtų atsirasti dėl šaltinio įtampos nuostolių, didelių apkrovų prijungimo, vienfazių įžemėjimų taip pat apkrovos perjungimo iš vieno šaltinio į kitą.

2.2. Staigūs įtampos pokyčiai

Vardinės įtampos svyravimai, viršijantys 10 proc. Svyravimai kurie kartojasi periodiškai yra vadinami mirgėjimais ir jų lygis priklauso nuo kartojimosi dažnio.

2.3. Staigūs įtampos kryčiai

Įtampos svyravimai viršijantys 10 proc. vardinės įtampos. Įtampa tinkle gali pažemėti iki 40 proc. vardinės įtampos, tačiau tai yra trumpalaikiai kryčiai ir jie trunka iki 1 s. Tokių trikdžių per metus gali būti iki 1000. Šiuos trikdžius dažniausiai sukelia trumpieji jungimai tinkle. Jie yra pavojingi automatikos ir valdymo įrenginiams.

2.4. Trumpieji tiekiamos įtampos pertrūkiai

Įtampa elektros tinkle gali visiškai pranykti mažiau nei 1 s. Tokių įtampos pertrūkių gali būti iki kelių šimtų per metus.

2.5. Ilgieji tiekiamos įtampos pertrūkiai

Ilgesni nei 3 minučių įtampos pertrūkiai yra laikomi ilgaisiais įtampos pertrūkiais ir jų gali būti 10 – 50 per metus.

2.6. Įtampos dažnis

Vardinis tiekiamos įtampos dažnis turėtų būti 50 Hz. Vidutinis sistemos pagrindinės harmonikos dažnis normaliomis darbo sąlygomis per 10 s turėtų būti $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ t. y. nuo 49,5 Hz iki 50,5 Hz ir toks dažnis turėtų būti 99,5 % per metus.

2.7. Pramoninio dažnio viršįtampiai tarp laidininko ir žemės

Fazinė įtampa žemosios įtampos elektros tinkle gali pasiekti ir linijinę vertę. Viršįtampis trunka tol, kol pašalinamas gedimas. Gedimų trukmė ir skaičius neribojami.

2.8. Įtampos asimetrija

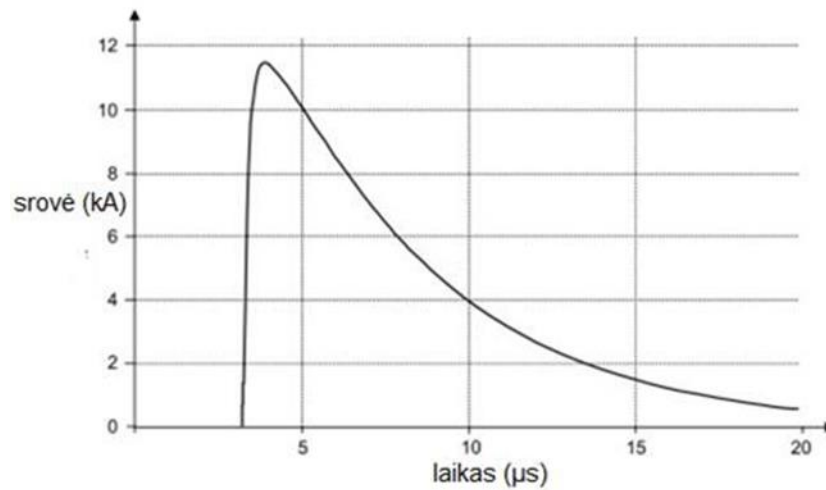
Tiekiamos įtampos asimetrija yra trifazės sistemos būseną, kuomet fazių tarpusavio kampai ar fazių įtampų vidutinės vertės nėra lygios. Tam tikrose vietose, kuriose kliento įranga yra iš dalies vienfazė ar dvifazė, trifazė įtampos asimetrija elektros tinklo nuosavybės arba eksploatavimo atsakomybės ribos taškuose galėtų siekti 3 %.

Visi šie rodikliai apibrėžia elektros energijos kokybę. Elektros energijos kokybės ir patikimumo problema Lietuvai yra aktuali. Kaip yra nurodyta Nacionalinėje energetikos strategijoje, didžioji tinklų įrenginių dalis yra 25 – 30 metų amžiaus, o juos pakeisti yra reikalingos didelės lėšos. Vis dėlto, šiuo metu didelė dalis įrenginių jau yra keičiami naujais.

2.9. Pereinamieji viršįtampiai tarp laidininkų ir žemės

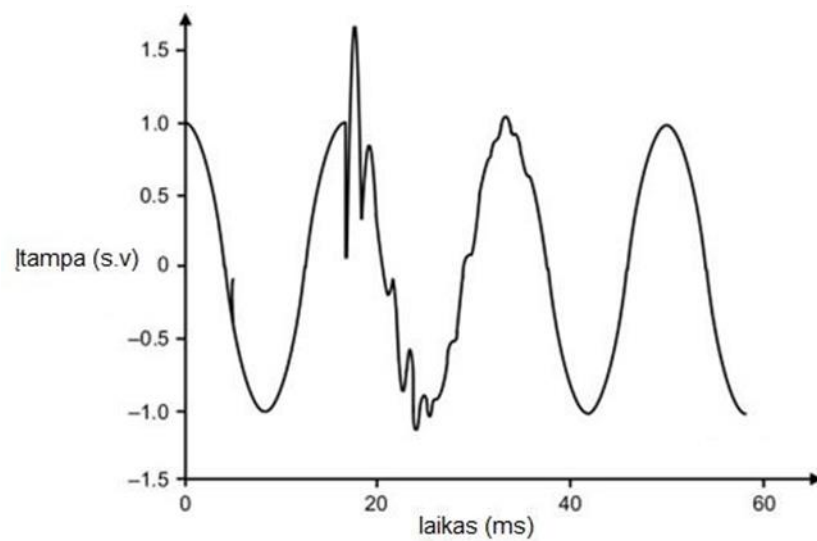
Tai trumpi impulsai, susidarantys dėl žaibo ar komutacinių reiškinių ir trunkantys nuo 1 mikrosekundės iki 1 milisekundės. Elektros sistemose pereinamieji procesai yra trumpalaikiai įvykiai sukelti įtampos iškreipimus. Pereinamųjų procesų bangos forma ir charakteristikos priklauso nuo elektros tinklo parametrų tokių kaip induktyvumas, talpa ir varža. Jie klasifikuojami į dvi kategorijas: impulsinius ir švytuojančius. Tai lemia pereinamojo proceso amplitudę, trukmę, švytavimo dažnis, pakilimo trukmę.

- **Impulsinis pereinamasis procesas.** Tai staigus įtampos ar srovės (arba abiejų) pakilimas. Impulsinius pereinamuosius procesus dažniausiai sukelia žaibo iškvos į elektros įrenginius. Žaibo iškvos gali sukelti įtampą elektros tinkle. Pavyzdys pateiktas 2 paveiksle;



3 pav. Impulsinis pereinamasis procesas

- **Švytuojantis pereinamasis procesas.** Tai staigus įtampos ar srovės (arba abiejų) dažnio pasikeitimas, turintis neigiamą ir teigiamą poliškumą. Švytuojantis pereinamasis procesas dažniausiai atsiranda dėl staigių apkrovos perjungimų. Pavyzdys pateiktas 2 paveiksle.



4 pav. Švytuojantis pereinamasis procesas

3. Elektros įrenginių izoliacija

Elektros įrenginių apsaugai nuo viršįtampių priemonės gali būti skirstomos pagal veikimo principą, tai yra į tolygiai ir šuoliškai ribojančias viršįtampių lygį. Viršįtampių ribotuvų darbo režimas yra paprastas, per ribotuvą srovė praktiškai neteka normalaus darbo režimo metu dėl didelės ribotuvo vidinės varžos, elektros tinkle atsiradus viršįtampiams srovė didėja tolygiai. Ribotuvai viršįtampius pažemina apie 20 – 35 % ir tai leidžia apsaugoti elektros įrenginių izoliaciją.

Parenkant viršįtampių ribotuvus, pagal laukiamus maksimalius viršįtampių parametrus, svarbu nustatyti, kokios bus pagrindinės, viršįtampių ribotuvo veikimo patikimumą garantuojančios, charakteristikos. Viršįtampių ribotuvai turi būti parinkti ir išdėstyti taip, kad garantuotų patikimą įrenginių apsauga. Svarbiausia viršįtampio techninė savybė yra ilgalaikė leistinoji veikimo įtampa. Tikslesnį viršįtampių ribotuvo charakteristikos parinkimą lemia rezonansinių viršįtampių trukmė ir viršįtampių įrengimo vieta. Viršįtampių ribotuvų darbo sąlygoms nustatyti bei jų vietoms parinkti yra privaloma atlikti reikiamuosius pereinamųjų procesų sukeltų žaibo išlydžio ir viršįtampių, atsirandančių įvairiausių perjungimų metu, skaičiavimus, atlikti jų analizę.

Viršįtampių ribotuvų parametrus parinkti viršįtampių lygio bei ribotuvo sroviniai parametrai yra nustatomi modeliuojant įvairius režimus. Kabelių ir kitų elektros įrenginių vidinės izoliacijos atsparumo mažėjimą lemia dalinių išlydžių intensyvumas, kuris priklauso nuo elektros įrenginių veikiančio viršįtampių lygio, elektros įrenginių izoliacijos išilimo temperatūros bei drėgmės. Didele įtaką elektros įrenginių izoliacijos darbui turi darbo sąlygos, viršįtampių dažnis, perkrovos ir pan. Ilgametė elektros įrenginių darbo ir atsiradusių defektų, taip pat gedimų analizė gali duoti tik apibendrintas vidutines patikimumo charakteristikas. Elektros sistemoje visi elektros įrenginiai, neatsižvelgiant į jų darbo sąlygas yra bandomi nustatytomis bandomosiomis įtampomis ir tai atliekama periodiškai.

3.1. Skirstomojo elektros tinklo gedimų analizė

Gedimų dažnis, pagal statistinius duomenis Lietuvoje, skirstomas pagal ilguosius (ilgiau nei 3 minutes) ir trumpuosius nutraukimus, kuriuos sukelia: vėjas ir audros (30 %), žaibai (7 %), sniegas ir ledas (6 %), kitos priežastys, susijusios su gamtos padariniais (3 %), gyvūnai (4 %). Remiantis iš AB „Energijos skirstymo operatorius“ gautais Lietuvos regionų duomenimis, Lietuvoje priskiriami pagrindiniai gedimus sukeliantys veiksniai:

- vėjas ir audros;
- žaibavimas ir jo sukelti viršįtampiai;
- sniegas ir ledas;
- gyvūnai;
- kiti gamtos reiškiniai;
- techniniai gedimai;
- mechaniniai gedimai;
- nežinomos kilmės gedimai.

Lietuvos skirstomieji tinklams priskiriamos šios pažeidimų priežastys [1]:

- „*Force majeure*“ (nenugalima jėga): gaivaliniai gamtos reiškiniai (potvyniai, perkūnijos, apšalas, audros, ir pan.), gaisrai, sistemos priešvarinės automatikos poveikis, klimato pokyčiai, dėl kurių buvo viršyti leistinieji techniniai normatyvai;
- Išorinio poveikio priežastys: pažeidimai, kurie įvyko dėl vartotojų kaltės, sutrikimai, avarijos, gedimai kito operatoriaus tinkluose, dėl kurių padarytas pažeidimas;
- Operatoriaus klaidos.

Didžiausią įtaką elektros skirstomojo tinklo atsijungimams turi:

- ydingas tinklo projektas;
- nusidėvėjimas;
- oro sąlygos;
- išoriniai aplinkos trikdžiai.

AB „Energijos skirstymo operatorius“ duomenimis, atlikti skaičiavimai linijoms, kabeliams, kurie yra labiausiai pažeidžiami tam tikrų, gedimus sukeliančių veiksnių (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. Ilgi elektros energijos nutraukimai (gedimų skaičius/100 km/metus)

Gedimai	Neizoliuotas laidas	Izoliuotas laidas	Oro kabelis	Požeminis kabelis
Gamtos reiškiniai	3,86	0,31	0,09	0,08
Vėjas ir audros	2,72	0,23	0,09	0,01
Sniegas ir ledas	0,38	0,07	0,07	0,00
Žaibas	0,21	0,03	0,06	0,05
Kiti oro poveikiai	0,20	0,01	0,03	0,03
Gyvūnai	0,12	0,01	0,00	0,33
Techniniai	0,44	0,04	0,11	0,3
Mechaniniai	0,32	0,03	0,09	0,35
Klaidos	0,12	0,03	0,01	0,11
Kiti sukėlimai	0,61	0,04	0,02	0,36
Visuomeninis netinkamas elgesys	0,22	0,01	0,01	0,21
Nežinomi	0,46	0,03	0,04	0,13

Pagal 1-oje lentelėje pateiktus duomenis, galima teigti, kad mažiausiai elektros energijos nutraukimų yra oro kabelinėse linijose. Patikimumą lemia laidų, atramų, izoliatorių kokybė bei specifinės jų savybės. Priežasčių pasiskirstymas žiemą yra apie 60 proc. atjungimų dėl vėjų ir apledėjimų, vasarą apie 90 proc. – dėl žaibų.

Elektros energijos tiekimo sutrikimai, yra viena iš didžiausių šiandieninių problemų. Atsijungimai, elektros tinklo pertrūkiai, gali padaryti didelę žalą elektros energijos vartotojams, gaminamai produkcijai, ar net klientų įrangai. Todėl esamų įrenginių gerinimas, reguliariai tikrinant, prižiūrint ir laiku keičiant susidėvėjusius elementus, gali padėti išvengti neplanuotų atsijungimų.

4. Automatinis kartotinis įjungimas

Tinkamas reagavimas į sistemos trukdžius ir greitas sistemos atstatymas yra labai svarbus mažinant avarijos žalą. Patikimumą lemia elektros sistemos galimybė išvengti elektros tiekimo nutraukimo, o jei to nepavyksta išvengti, stengiamasi po sutrikimų tęsti elektros energijos tiekimą vartotojams taip, kad jie nepajustų tinklo gedimo pasekmių. Tam dažnu atveju yra naudojama automatinio kartotinio įjungimo apsauga. Ši apsauga po avarinio linijos atsijungimo leidžia be papildomo personalo įsikišimo greitai atstatyti elektros energiją esamiems vartotojams. Eksploatuojant elektros linijas pastebėta, kad kai kurie gedimai išnyksta savaime, atjungus juos veikiančią įtampą. Tai ir atmosferos viršįtampių sukeltas oro izoliacijos pažeidimas, ir laidų suartėjimas, ir pašalinių daiktų atsiradimas ant laidų, ir judančių objektų prisilietimai [1]. Automatiškai vėl prijungus elektros liniją dažnu atveju jos veikia įprastai ir gedimas pasišalina savaime. Trumpalaikis įtampos nutraukimas dažnu atveju vartotojams nekenkia. AKĮ taip pat naudojamas šynoms, transformatoriams ir kabelių linijoms, kurių gedimo priežastis dažniausiai būna izoliacijos pažeidimas.

Oro linijų sėkmingų įjungimų periodas svyruoja nuo 0,5 min. (oro linijoms) iki 15 min. (transformatoriams ir šynoms). AKĮ gali veikti vieną, du arba tris kartus. Dažnu atveju AKĮ automatika yra naudojama vieną kartą, retesniais atvejais du kartus iš eilės. AKĮ kartotinumui skaičiaus didinimas sėkmingų įjungimų tikimybę padidina palyginti nedaug (0,05 – 0,15), tačiau gedimui nedingus ir vėl suveikus relinei apsaugai, smarkiai sumažinamas jungtuvo naudojimo pajėgumas [2].

Dėl sudėtingos schemos ir elektromagnetinių bangų savybių elektros tinklo įrenginių izoliacija, ypač kartojant jungimą su liekamuoju krūviu po linijos atjungimo, gali būti paveikta aukštesnės amplitudės ir trukmės pereinamojo vyksmo įtampų, viršijančių standartines gamintojo garantuotas bandomąsias įtampas. Tam, kad išvengti aukšto viršįtampių lygio automatiškai kartojant linijos jungimą turi būti kontroliuojamas krūvio nutekėjimas atjungus liniją arba parenkama AKĮ pauzė taip, kad kartotinio jungimo metu liekamasis krūvis būtų leistinas ir nepažeistų įrenginių izoliacijos.

5. Viršįtampių pereinamųjų vyksmų matematiniai modeliai

5.1. Elektros oro linijų modeliai

Žaibo sukeltos elektromagnetinės aukštų potencialų bangos linijose sukelia viršįtampių pereinamuosius vyksmus. Elektromagnetinės bangos, sklisdamos elektros 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 stiprūs 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.

Linijos varžos (impedanso) išraiškos susietos su elektriniu ir magnetiniu laukais laido kryptimi Maksvelo lygtimis /1, 2/. Nuosavąjį k -ojo laido žemės impedansą Z_{gk} aprašo Carson'o integralas:

$$Z_{gk} = \frac{j\omega\mu_o}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{e^{-2h_k u}}{\sqrt{u^2 + j\omega\mu_o\sigma_g + u}} \cdot du, \quad (5.1)$$

tarpusavio žemės impedansą Z_{gik} tarp i -ojo bei k -ojo laidų:

$$Z_{gik} = \frac{j\omega\mu_o}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{e^{-2(h_i+h_k)u} \cdot \cos(b_{ik}u)}{\sqrt{u^2 + j\omega\mu_o\sigma_g + u}} \cdot du, \quad (5.2)$$

Čia: h_i ir h_k – i -ojo ir k -ojo laidų aukštis (5 pav.);

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

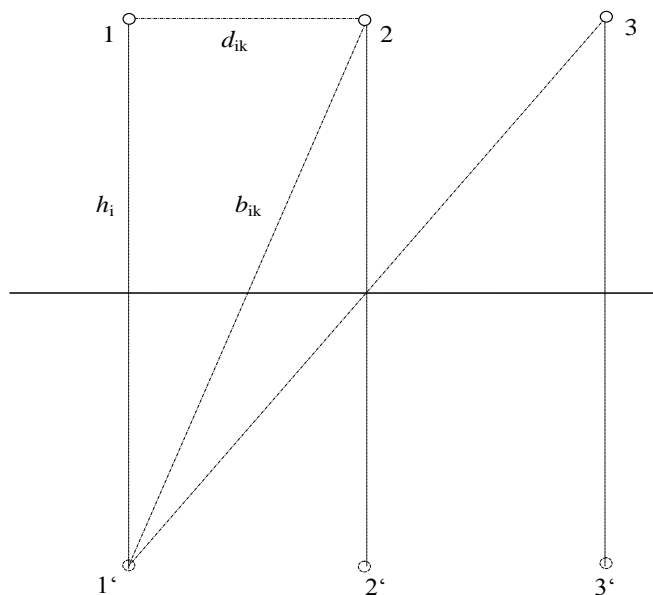
μ_o ir σ_g – magnetinė oro konstanta ir grunto savitasis laidumas.

Elektromagnetinius vyksmus, viršįtampius ir antsvorius, transformatorių pastotės skirstyklose lemia daugkartiniai atsklidusių linijomis bangų atspindžiai nuo įrenginių bei atsišakojimų prijungimo šynose vietų. Bangų atspindėjimo ar lūžio savybes, atspindžio ar lūžio koeficientus, apsprendžia linijų ar šynų bangų varža. Ši savo ruožtu priklauso nuo linijų ir šynų specifinių impedansų bei laidžių, taigi nuo laidų išsidėstymo ore bei laidų ir žemės specifinės varžos.

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

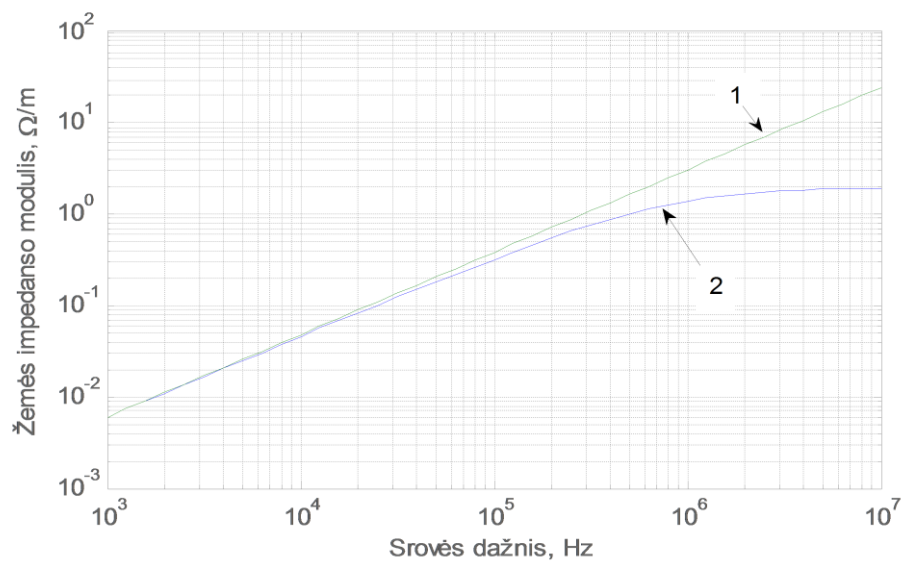
„Idealios linijos“ specifiniai impedansai:

$$\begin{cases} Z_{ok} = \frac{j\omega\mu_o}{2\pi} \ln \frac{2h_k}{r_{ek}}, \\ Z_{oik} = \frac{j\omega\mu_o}{2\pi} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}; \end{cases} \quad (5.3)$$



5 pav. Linijos geometriniai parametrai: h_i – laido pakabinimo aukštis; d_{ik} – atstumas tarp laidų; b_{ik} – atstumas tarp veidrodinio atspindžio ir gretimo laido; k, s – laidai; k' – veidrodinis atspindys

6 pav. parodyta lyginamoji žemės impedanso priklausomybė nuo dažnio.



6 pav. Lyginamojo linijos laido žemės impedanso modulio priklausomybė nuo dažnio; 1 – Carson'o integralu; 2 – su patikslinta grunto įtaka; savitasis grunto laidis – 0,1 mS/m, santykinė grunto dielektrinė konstanta – 10

Specifiniai laidžiai matricoje:

$$\mathbf{Y} = j\omega(\alpha_{ik})^{-1}, \quad (5.4)$$

Čia: α_{ik} – potenciniai koeficientai:

$$\begin{cases} \alpha_k = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{2h_k}{r_{ek}}, \\ \alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}; \end{cases} \quad (5.5)$$

Viršitampius pastotėje ar linijos laiduose bei antsvorius ribotuvuose 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:

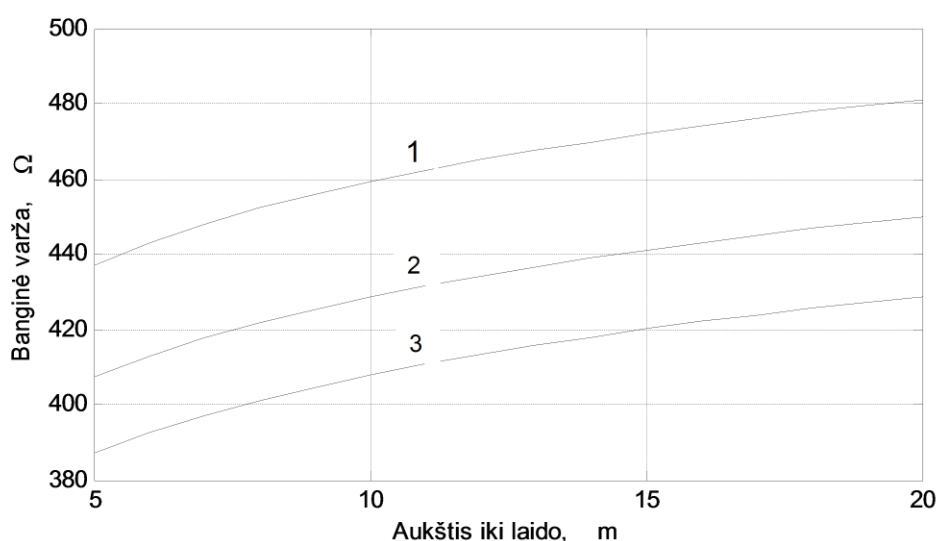
$$k_{12} = \frac{2 \cdot W_2}{W_1 + W_2}; \quad (5.6)$$

Čia: W_1 ir W_2 – linijų atkarpu (1) ir (2) banginės varžos.

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

$$k_{10} = \lim_{W_2 \rightarrow \infty} \frac{2 \cdot W_2}{W_1 + W_2} = 2, \quad (5.7)$$

Oro linijos laido banginę varžą lemia laido aukštis virš žemės paviršiaus, laido ekvivalentinis spindulys bei grunto lyginamoji varža. 7 pav. parodyta laido banginių varžų priklausomybė nuo aukščio iki laido 5 –ių, 8 –ių ir 11 –os milimetrų spindulio laidams.



7 pav. Laido banginės varžos priklausomybė nuo aukščio iki laido, kai laido spindulys: (1) – 5 mm, (2) – 8 mm ir (3) – 11 mm.

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

$$W = \sqrt{\frac{Z}{Y}}; \quad (5.8)$$

Čia: Z ir Y – laido savitoji 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 savitoji varža.

Trifazėje elektros sistemoje elektromagnetinės bangos linijose ir pastočių šynose plinta banginiais kanalais: tarplaidiniais ir tarp laidų bei žemės. Skirtinguose kanaluose sklisdamos bangos keičiasi skirtingai – kanale tarp laidų ir žemės bangos slopsta intensyviau lyginant su tarplaidiniais kanalais. Banginius kanalus bei vyksmus, kurie juose vyksta, apibūdina kanalų (modų ar sekų) banginės varžos, perdavimo funkcijų dažnių charakteristikos ir įtampoms bei srovės bangoje kaitos pereinamoji charakteristika.

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

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} \underline{\mathbf{U}}_f = \mathbf{P}_f \underline{\mathbf{U}}_f, \\ \frac{d^2}{dx^2} \underline{\mathbf{I}}_f = \mathbf{P}'_f \underline{\mathbf{I}}_f; \end{cases} \quad (5.9)$$

Čia: \mathbf{P}_f – sklaidos faktorių matrica:

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{Z}_f \cdot \mathbf{Y}_f; \quad (5.10)$$

\mathbf{Z}_f ir \mathbf{Y}_f – savitųjų impedansų ir laidžių matricos fazėms ir tarp fazių (fazinėse koordinatėse);

$$\mathbf{Z}_f = (\mathbf{Z}_{ik}); \quad (5.11)$$

$$\mathbf{Y}_f = (\mathbf{Y}_{ik}); \quad i, k \in \{a, b, c\}; \quad (5.12)$$

Vyksmams banginiuose kanaluose (5.6) tipo telegrafinės lygtys turi pavidalą:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} \underline{\mathbf{U}} = \mathbf{P} \underline{\mathbf{U}}, \\ \frac{d^2}{dx^2} \underline{\mathbf{I}} = \mathbf{P} \underline{\mathbf{I}}; \end{cases} \quad (5.13)$$

Čia: $\underline{\mathbf{U}}$ ir $\underline{\mathbf{I}}$ – įtampų ir srovių banginiuose kanaluose matricos-stulpeliai, su faziniais dydžiais susieti modalinėmis matricomis:

$$\begin{cases} \underline{\mathbf{U}}_f = \mathbf{T}\underline{\mathbf{U}}, \\ \underline{\mathbf{I}}_f = \mathbf{T}_I\underline{\mathbf{I}}; \end{cases} \quad (5.14)$$

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

$$\mathbf{P} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{P}_f\mathbf{T}; \quad (5.15)$$

$$\mathbf{T}_I = \mathbf{T}';$$

\mathbf{T} ir \mathbf{T}' – modalinė ir transponuota modalinė matricos;

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

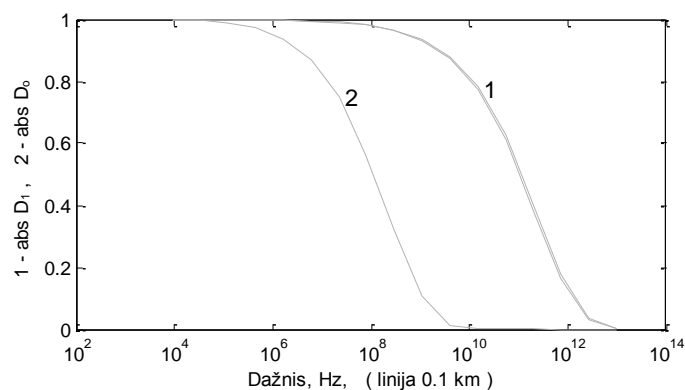
$$\text{diag}(\gamma_k) = \mathbf{P}^{\frac{1}{2}}; \quad (5.16)$$

Kanalų banginių varžų matrica randama taip:

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Z}_f\mathbf{T}_I; \quad (5.17)$$

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

8 pav. pateiktos absoliutinės dažinės perdavimo funkcijos 100 metrų linijos tarplaidiniams kanalams (1 kreivė) ir kanalui laidai – žemė (2 kreivė). Laidai išsidėstę lygiagrečiai žemės paviršiumi 10 metrų aukštyje, 0,9 metro atstumu vienas nuo kito. Laidų spindulys – 8 mm. Grunto lyginamoji varža – 100 Ωm .



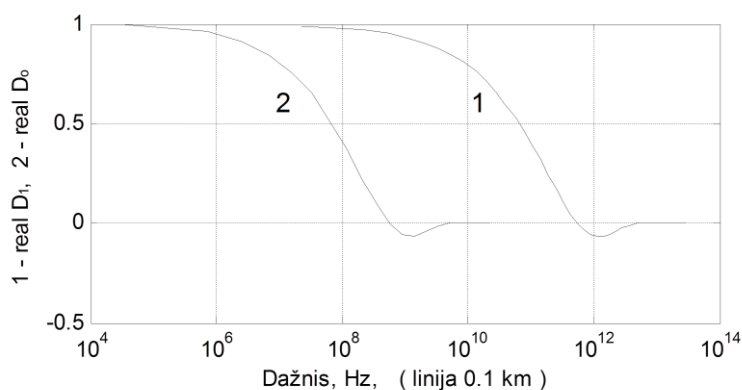
8 pav. Linijos banginių kanalų absoliutinės dažinės funkcijų charakteristikos; 1 – tarplaidinių kanalų, 2 – kanalo laidai-žemė

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

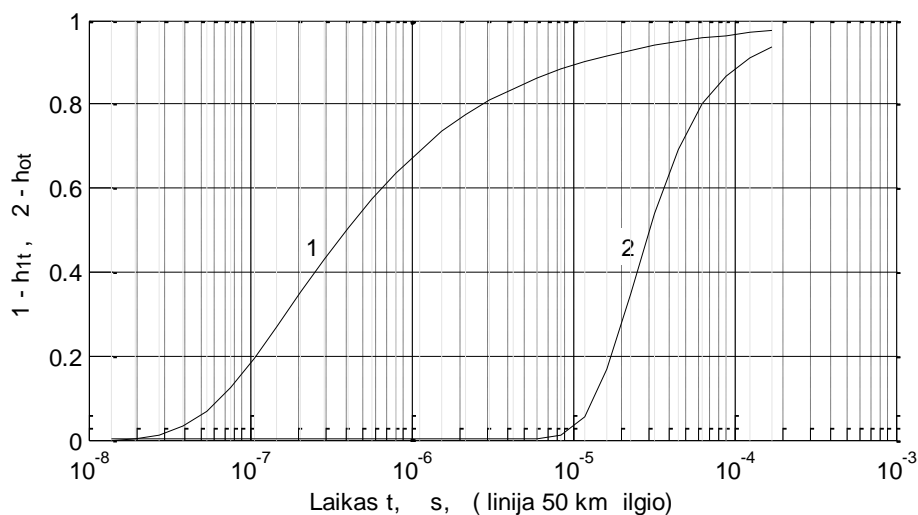
$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re} D(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega; \quad (5.18)$$

Čia: $\operatorname{Re} D(\omega)$ – realioji dažninė perdavimo funkcija.

9 pav. parodytos realiųjų dažniųjų perdavimo funkcijų charakteristikos nagrinėtam 100 m linijos atvejui, o 10 pav. atitinkamo joms – pereinamosios laiko funkcijos.



9 pav. Linijos banginių kanalų realiosios dažniųjų perdavimo funkcijų charakteristikos; 1 – tarplaidinių kanalų, 2 – kanalo laidai-žemė



10 pav. Linijos banginių kanalų pereinamųjų funkcijų charakteristikos; 1 – tarplaidinių kanalų, 2 – kanalo laidai-žemė

Pereinamoji linijos banginių kanalų funkcija apskaičiuojama skaitmeninant (5.12) integralą. Po dažniųjų perdavimo funkcijų suskaidymo į mažus intervalus (ω_1, ω_2).

5.2. Elektros kabelių linijų modeliai

Modeliavimą elektromagnetinių vyksmų kabelyje patogiausia yra atlikti naudojantis cilindrinėmis matematinėmis fizikos funkcijomis. Jų pagrindas yra sudarytas iš banginės lygties, kuri yra atrandama iš Maksvelo lygčių:

$$\Delta \underline{\psi} + k^2 \underline{\psi} = 0; \quad (5.19)$$

Čia: $\underline{\psi}$ – bet kuri (\underline{E}) elektrinio stiprio arba (\underline{H}) magnetinio stiprio elektromagnetiniame lauke dedamoji;

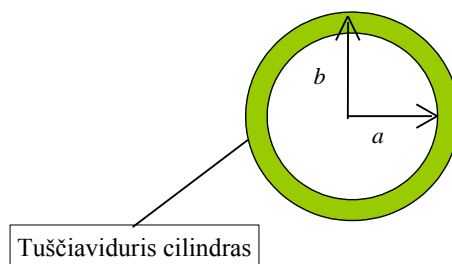
$$k = \sqrt{\mu \cdot (\varepsilon - j\sigma\omega)} - \text{aplinkos banginis skaičius};$$

μ , ε ir σ – aplinkos magnetinė, elektrinė konstantos bei savitasis laidis.

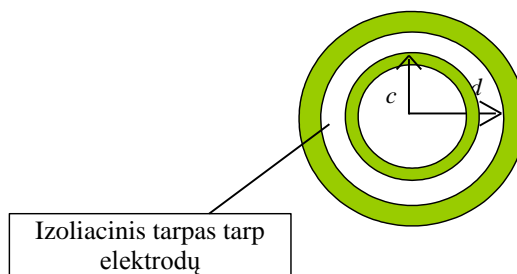
Δ – diferencialusis Laplaso operatorius, kuris cilindrinėse koordinatėse yra:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \quad (5.20)$$

Kabelio ekranas ir apsauginis šarvas turi tuščiavidurio cilindro pavidalą, kaip parodyta 11 pav. ir izoliacinį tarpą tarp elektrodų (12 pav.).



11 pav. Kabelio ekranas ir apsauginis šarvas



12 pav. Izoliacinis tarpas tarp elektrodų

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

$$Z_{aa} = \frac{m}{2\pi a \sigma} \frac{I_0(ma)K_1(mb) + K_0(ma)I_1(mb)}{I_1(mb)K_1(ma) - K_1(mb)I_1(ma)}; \quad (5.21)$$

$$Z_{bb} = \frac{m}{2\pi b \sigma} \frac{I_0(mb)K_1(ma) + K_0(mb)I_1(ma)}{I_1(mb)K_1(ma) - K_1(mb)I_1(ma)}; \quad (5.22)$$

Čia: σ – cilindro metalo savitasis laidis;

m – banginis skaičius laido metale.

Savitarpio tarp vidinio ir išorinio cilindro paviršių apibūdina išraiška:

$$Z_{ab} = \frac{1}{2\pi ab \sigma (I_1(mb)K_1(ma) - K_1(mb)I_1(ma))}; \quad (5.23)$$

Impedansas tarp dviejų elektrodų (tarp apvalkalo bei gyslos ar, pavyzdžiui, tarp dviejų cilindų, kaip yra parodyta 8 pav.) yra nustatomas šia išraiška:

$$Z_i = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{d}{c}; \quad (5.24)$$

Čia: μ – izoliacijos sluoksnio magnetinė konstanta.

Impedansas tarp apvalkalo ir žemės grunto, esant baigtinei žemės grunto varžai ρ plačiame dažnių diapazone, ne blogesniu nei 1 % tikslumu, gali būti apskaičiuotas taip:

$$Z_{ig} = Z_{igo} + Z_g; \quad (5.25)$$

$$Z_g = \frac{\rho m^2}{2\pi} \left[K_0(mr) + \frac{2}{4 + (mr)^2} e^{-2ym} \right]; \quad (5.26)$$

Čia: r ir y – apvalkalo spindulys ir kabelio gylis žemėje;

$$m = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\rho}}; \quad (5.27)$$

Čia: μ – žemės grunto magnetinė konstanta.

Kabelio lyginamoji talpa tarp gyslos ir ekraninio apvalkalo bei apvalkalo ir žemės grunto skaičiuojami pasiremiant 12 pav. schema, formule:

$$C_i = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{c}}; \quad (5.28)$$

Kablyje elektromagnetinė banga plinta lėčiau nei oro linijoje, praktiškai $\sqrt{\epsilon_r}$ kartų. Čia ϵ_r - reliatyvioji kabelio izoliacijos dielektrinė konstanta. XLPE kablyje $\epsilon_r \approx 2,856$. Tokiame kablyje

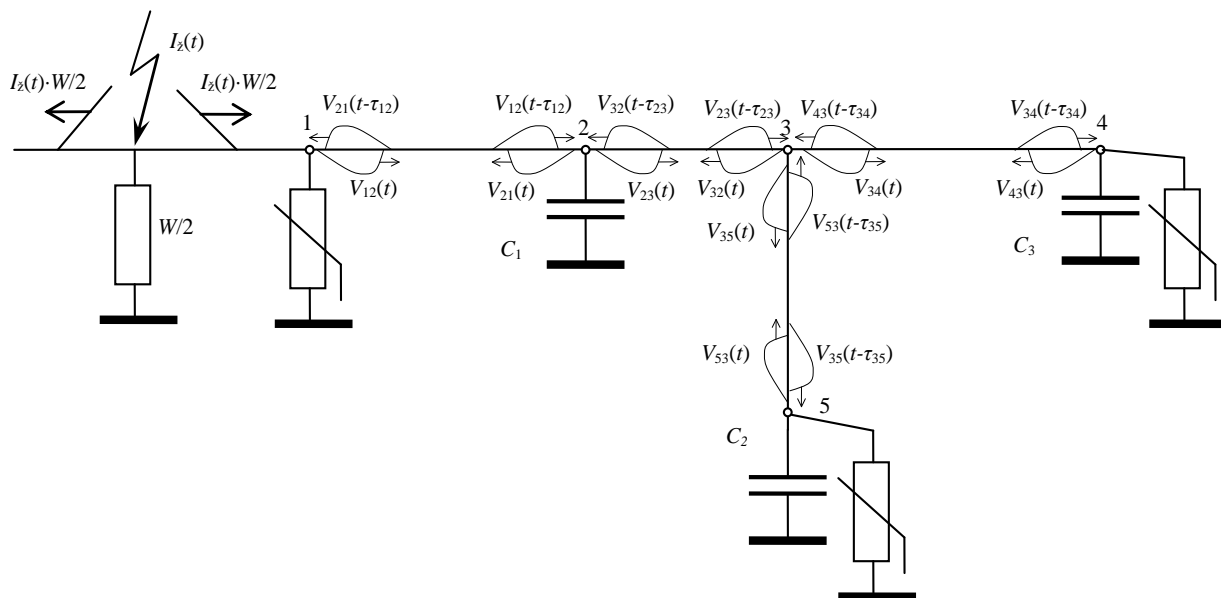
apskaičiuotas bangos greitis gysla-ekranas kanale lėtesnis nei ore 1,69 kartų. Banga 1 km ilgio kabelį praskrieja per 5,63 μs, tačiau dėl dispersinių reiškinų kabelio galą per šį laiką pasiekia tik apie 30% bangos amplitudės (kai bangos fronto trukmė nulinė). Skaitmeniniame modelyje kabelių atkarpose įvertinamas lėtesnis elektromagnetinės bangos sklaidos greitis.

5.3. Elektromagnetinių bangų sklaidos linijoje modeliai

Žaibo išlydžiui įvykus į oro liniją ar šalia jos, laiduose susidaro viršįtampių banga. Sukelta žaibo viršįtampio impulsinė banga nuo žaibo išlydžio vietos linijoje yra sklindanti į abejas puses. Oro linijose tokios bangos greitis yra artimas šviesos greičiui, o kabeliuose banga sklinda kiek lėčiau, kadangi yra nevienoda banginė varža. Banginė varža oro linijose siekia iki 400 Ω, o kabelinėse – nuo 3 iki 40 Ω bei priklauso nuo kabelio skerspjūvio, įtampos bei jo konstrukcijos. Elektromagnetinė banga, susiformavusi linijoje, atsklinda į transformatorių pastotės skirstyklą (13 pav.).

Elektromagnetinės žaibo išlydžio sukeltos impulsinės bangos potencialas φ_1 sklinda linijos dalimi 1-2, kuri turi banginę varžą V_{12} , ir taške 2 pereina į kitą linijos dalį 2-3, kuri turi banginę varžą V_{23} , elektromagnetinio lauko struktūra bangoje pakinta: dalis energijos sugrižta atgal į liniją 1-2, o kita dalis pereina į linijos atkarpą 2-3. Tad dalis potencialo φ_1 sklinda tokia pat kryptimi, kaip ir krintančioji banga, tai yra vadinama lūžusiaja bangos dalimi φ_1'' , o kita dalis φ_1' taške 2 atsispindi – vadinama atspindėtają bangos dalimi. Toks potencialo pasiskirstymas yra užrašomas taip:

$$\varphi_1 + \varphi_1' = \varphi_1'' \quad (5.29)$$



13 pav. Žaibo impulsinės bangos sklaida linijoje

Atspindėtoji bangos dalis bus lygi:

$$\varphi_1' = \beta \varphi_1, \quad (5.30)$$

Čia: $\beta = \frac{W_{21} - W_{12}}{W_{21} + W_{12}}$ – atspindžio koeficientas.

Lūžusioji bangos dalis bus lygi:

$$\varphi_1'' = \alpha \varphi_1 \quad (5.31)$$

Čia: $\alpha = \frac{2W_{21}}{W_{21} + W_{12}}$ – lūžio koeficientas.

Atitinkamai tekančių impulsinių srovių suma:

$$I_1 + I_1' = I_1'' \quad (5.32)$$

$$I_1' = -\beta I_1 = -\beta \frac{\varphi_1}{W_{12}} \quad (5.33)$$

Minuso ženklas parodo, kad esant vienodos krypties atspindėtosios bei krintančiosios bangų dalių elektriniams laukams, jų magnetiniai laukai, kurie yra sukurti tekančių srovių, yra priešingų krypčių.

Taške 2 lūžusioji srovės bangos dalis bus lygi:

$$I_1'' = \frac{\varphi_1''}{W_{21}} = \frac{\alpha \varphi_1}{W_{21}} = \alpha I_1 \frac{W_{12}}{W_{21}} \quad (5.34)$$

$$\text{arba } I_1'' = \frac{2 \varphi_1}{W_{21} + W_{12}} \quad (5.35)$$

Panašiai elektromagnetinės bangos impulsas lūžta ir atsispindi kituose schemos (13 pav.) mazguose. Sudarant elektromagnetinių bangų sklidimo skirstykloje modelį kiekviename mazge kiekvienam modaliniam kanalui sudaromos lygtys:

$$u_i(t) + W_{ei} i_i(t) = V_{ei}(t), \quad (5.36)$$

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:

$$\begin{cases} V_{ij}(t) = 2u_i(t) - V_{ji}(t - \tau_{ij}), \\ V_{ji}(t) = 2u_j(t) - V_{ij}(t - \tau_{ij}); \end{cases} \quad (5.37)$$

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:

$$n_{ij} = l_{ij}/(vh); \quad (5.38)$$

Čia: h – skaičiavimo žingsnis, [μ s];

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

l_{ij} – linijos elemento ilgis, [m].

Elektromagnetinės bangos gesimas, jai sklindant linija, preliminariai gali būti įvertintas taip:

$$\begin{cases} V_{ij}(t) = [2u_i(t) - V_{ji}(t - \tau_{ij})] \cdot e^{-r_0 l_{ij}/(2W_{ij})}, \\ V_{ji}(t) = [2u_j(t) - V_{ij}(t - \tau_{ij})] \cdot e^{-r_0 l_{ij}/(2W_{ij})}; \end{cases} \quad (5.39)$$

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;

$V_{ji}(t - \tau_{ij})$, $V_{ij}(t)$ – elektromagnetinės bangos atsklidusios iš mazgo j į mazgą i ir atsispindėjusios nuo jos charakteristika;

$V_{ji}(t)$, $V_{ij}(t - \tau_{ij})$ – elektromagnetinės bangos atsklidusios iš mazgo i į mazgą j ir atsispindėjusios nuo jos charakteristika.

Įtampa skirstyklos įrenginių prijungimo, šynų atšakos gale ar schemos išsišakojimo mazge apskaičiuojama (pagal 5.27) taip:

$$u_i(t) = V_{ei}(t) - W_{ei} i_i(t). \quad (5.40)$$

Srovė mazgo i -tajame elemente apskaičiuojama taikant rekurentinę formulę:

$$i_i(t) = a_1 \cdot i_i(t - h) + a_2 \cdot W_{ei}(t) + a_3 \cdot W_{ei}(t - h), \quad (5.41)$$

Čia: a_1 , a_2 ir a_3 – rekurentinės formulės koeficientai, kurie apskaičiuojami pritaikius diferencinių lygčių prieaugių ekvivalentiškumo taisyklę pagal prijungto mazge 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 $t-h$.

Modalinių transformacijos matricių struktūra priklauso nuo laidų išsidėstymo bei grunte laukui sąlygų, todėl kiekvienu atskiru atveju linijos turi individualias joms nustatytas matricas. Norint algoritme sujungti tokias linijas į bendrą vyksmų sistemą, reikia atlikti papildomas įtampų, srovių bei parametru transformacijas. Skaičiavimų algoritme bazinė, suvienodinanti vyksmų vaizdą skaičiuojamosios schemos mazguose, pasirinkta Klarko sekų sistema, simetrinę trifazę įtampų ar srovių vektorių grupę keičianti į vienas kitam statmenus „ α “ ir „ β “ vektorius. Vektoriaus α kryptis fazinių dydžių simetrijos atveju sutampa su „ a “ fazės kryptimi.

Prie Klarko sekų prijungus nulinę 3 –iąją seką yra gaunama tokia transformacijų matricių pora:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{pmatrix}; \quad T^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}. \quad (5.42)$$

Šios Klarko matricos pilnai simetrines matricas pakeičia į simetrinių dedamųjų parametru įstrižinę matricą.

Dalamberto charakteristikų lygtis k -ajai linijai sujungtai su mazgu atrodo taip:

$$W_k^{-1}(u_{k\gamma}) + (i_{k\gamma}) = (V_{k\gamma}) \quad (5.43)$$

arba

$$Z_k^{-1} T_{kU} G_{kS} T_{kU}^{-1} (u_{k\gamma}) + (i_{k\gamma}) = (V_{k\gamma}), \quad (5.44)$$

Čia: W_k – k linijos banginių varžų matrica; $W_k = T_{kU} W_{kS} T_{kU}^{-1}$;

$(u_{k\gamma}), (i_{k\gamma})$ – įtampų, srovių vektoriai (matricos stulpeliai) fazinėse koordinatėse;

$(V_{k\gamma})$ – atsklidusių iš k linijos srovių bangų vektorius.

Kai mazge yra prijungta n linijų, tuomet mazgo įtampas ir srovės suriša pirmasis Kirchhofo dėsnis:

$$(i_\gamma) = \sum_{k=1}^n (i_{k\gamma}) \quad (5.45)$$

ir (1.30) lygtis tampa tokia:

$$\left\{ \sum_{k=1}^n Z_k^{-1} T_{kU} G_{kS} T_{kU}^{-1} \right\} (u_\gamma) + (i_\gamma) = \sum_{k=1}^n T_{kU} (V_{kS}) \quad (5.46)$$

Klarko sekų pavidale ši lygtis įgyja formą:

$$\left\{ \sum_{k=1}^n T^{-1} Z_k^{-1} T_{kU} G_{kS} T_{kU}^{-1} T \right\} (u_v) + (i_v) = \sum_{k=1}^n T^{-1} T_{kI} (V_{kS}) \quad (5.47)$$

Atsispindėjusios nuo mazgo srovių bangos tuomet surandamos taip:

$$(V_{kS}^-) = 2 \cdot T_k^{-1} Z_k^{-1} T_{kU} G_{kS} T_{kU}^{-1} T (u_v) - (V_{kS}) \quad (5.48)$$

Tokiu būdu algoritme, po išeities duomenų paruošimo, yra tikslinga sudaryti specialų linijų parametrų banką, kuriame skaičiavimų metu būtų laikomos matricos:

$$\mathbf{A}_k = Z_k^{-1} T_{kU} G_{kS} T_{kU}^{-1} T,$$

$$\mathbf{B}_k = T^{-1} T_{kI}.$$

Tuomet (5.35) ir (5.36) formulės supaprastėja:

$$\begin{cases} \left\{ \sum_{k=1}^n T^{-1} \mathbf{A}_k \right\} (u_v) + (i_v) = \sum_{k=1}^n \mathbf{B}_k (V_{kS}), \\ (V_{kS}^-) = 2 \cdot T_k^{-1} \mathbf{A}_k (u_v) - (V_{kS}). \end{cases} \quad (5.49)$$

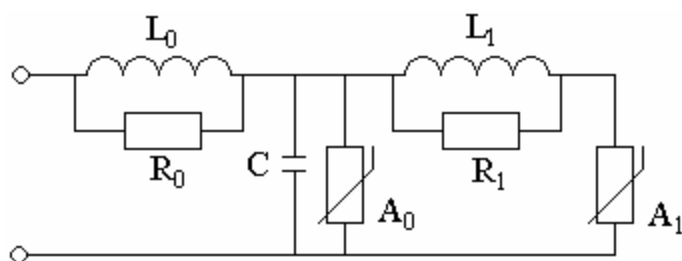
Žaibo ir komutacinių viršįtampių kompiuteriniam modeliavimui yra sukurtos programos, kurių algoritmuose yra panaudojamos banginių vyksmų linijose lygtys su adekvačiu energijos disipacinių reiškinių įvertinimu ir laidų išsidėstymu aplinkoje. Tam, kad būtų galima adekvačiau atspindėti elektromagnetinių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

5.4. Viršįtampių ribotuvo modelio charakteristikų suderinimas

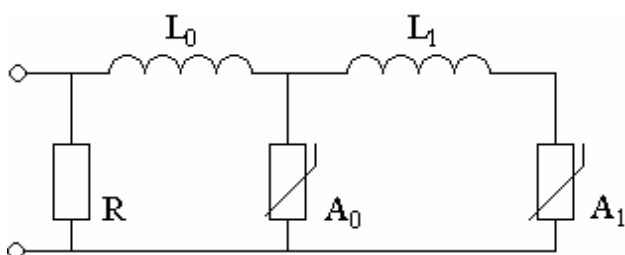
Žaibo sukeltos elektromagnetinės aukštų potencialų bangos linijose sukelia viršįtampių pereinamuosius vyksmus. Viršįtampių lygiui pažeminti iki bandomųjų įtampų lygio taikomos įvairios viršįtampių žeminimo priemonės. Priemonių veiksmingumui įvertinti atliekami tyrimai tinklo skaitmeniniuose modeliuose.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

Yra gana daug būdų modeliuoti metalo oksido (ZnO) viršįtampių ribotuvą tiriant jų veiksmingumą ir parenkant reikiamus parametrus. Metalo oksido viršįtampių ribotuvų duomenų analizė parodė, kad elektromagnetinės bangos reakcija gali būti įvertinta tik 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 pasiekia savo amplitudę. Metalo oksido viršįtampių ribotuvas pradeda riboti atėjusios elektromagnetinės bangos amplitudę šiek tiek vėluodamas.

IEEE (the Institute of Electrical and Electronics Engineers) publikacijose rekomenduojama viršįtampių ribotuvo ekvivalentinė schema parodyta 14 pav. [35], o supaprastinta – 15 pav. [35].



14 pav. IEEE modelio ekvivalentinė viršįtampių ribotuvo schema



15 pav. Supaprastinta ekvivalentinė viršįtampių ribotuvo schema

Viršįtampių ribotuvo ekvivalentinė schema parodyta 14 pav. tinkama modeliuoti pereinamuosius vyksmus, sukeltus dėl linijos jungimo ar žaibo išlydžio. Indukciniai parametrai pagal kataloguose nurodytus viršįtampių ribotuvų duomenis gali būti apskaičiuoti taip:

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{U_{r1/T_2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_n \quad [\mu\text{H}], \quad (5.50)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{U_{r1/T_2} - U_{r8/20}}{U_{r8/20}} U_n \quad [\mu\text{H}], \quad (5.51)$$

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 gėstančios impulso dalies pusės amplitudės [μs].

Netiesinių voltamperinių charakteristikų faktoriai A_0 ir A_1 8/20 bangai, kai srovė 10 kA pateikti 2-oje lentelėje.

2 lentelė. Faktorių A_0 ir A_1 vertės

I , [kA]	A_0 (s.v.)	A_0 (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

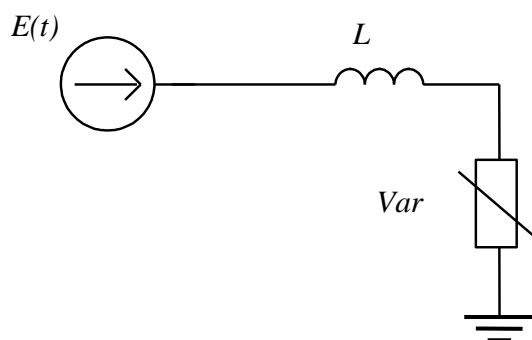
Pagal antrąjį modelį (5.2 pav.) reikia tik kataloginių duomenų, o tai supaprastina modelio parametrų nustatymą. Antrasis modelis be varžų praktiškai neturi įtakos modeliavimo rezultatams.

Viršįtampių pereinamųjų vyksmų modeliavimo programoje yra panaudotas eksponentinis netiesinis voltamperinės charakteristikos modelis [31]. Kiekvienam įtampos intervalui parenkamos kelios eksponentės, srovės ir įtampos priklausomybė išreiškiama taip:

$$i = p \left(\frac{v}{U_r} \right)^q. \quad (5.52)$$

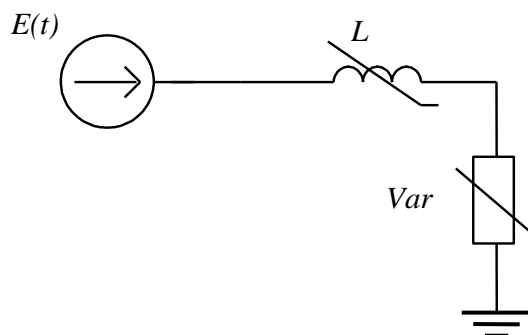
Šiame skaitmeniniame modelyje dalis charakteristikos (iki U_c) yra tiesinė, kuri praktiškai neturi įtakos viršįtampių pereinamajam procesui, nes šiame diapazone yra labai silpna srovė per viršįtampių ribotuvą. Kita dalis modeliuojama pagal funkcinę priklausomybę (5.4). Antra modelio netiesinė dalis yra apibrėžta parametrų p , q ir mažiausio įtampos lygmens. Kai įtampa per viršįtampių ribotuvą viršija ilgalaikę leistinąją įtampą (U_c), algoritmas imituoja voltamperinę charakteristiką. Kuo labiau modelis yra eksponentinis, tuo tikslesnis yra rezultatai. Šiame modelyje priimta, kad statuso fronto bangoms, didžiausia įtampa ir srovė įvyksta tuo pačiu metu.

Viršįtampių ribotuvo modeliui patikslinti imituojuant priklausomybę tarp įtampos ir srovės, varistoriui nuosekliai į grandinę prijungiamas induktyvumas (16 pav.) (Tominaga ir al., 1979). Naudojant šį modelį turi būti tinkamai parinktas induktyvumas skirtingiems elektromagnetinės bangos frontams. Pavyzdžiui, pasirinktas induktyvumas modeliui gali duoti tikslią rezultatą 8 μ s bangos frontui, bet 2 μ s bangos frontui gali būti paklaidos.



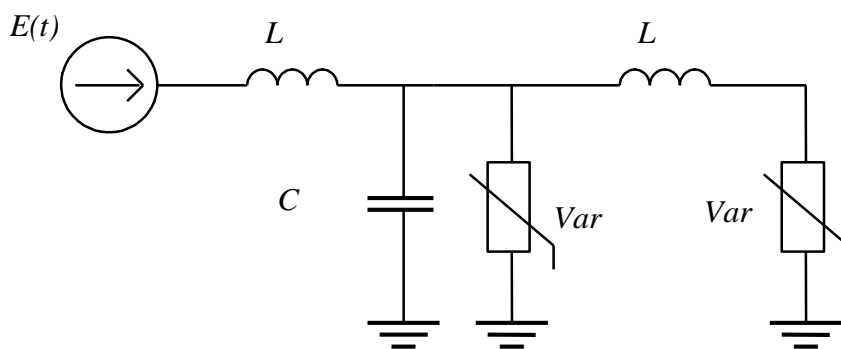
16 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su induktyvumu

Kadangi modelis su induktyvumų turėjo trūkumų dėl priklausomybės nuo elektromagnetinės bangos fronto statumo, tai šis modelis buvo patikslintas įjungiant į viršįtampių ribotuvo modelį netiesinį induktyvumą (17 pav.) (Kim ir al., 1996). Pagrindinė problema su šiuo modeliu yra tokia, kad reikia įdiegti programą, kuri apskaičiuotų netiesinį induktyvumą. Be to, daug einamųjų įtampos punktų yra būtini, kad atspindėtų bangos savybes.



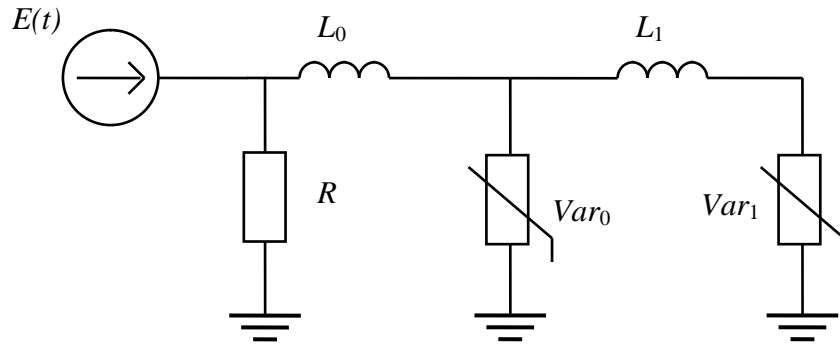
17 pav. Viršįtampių ribotuvo modelis su netiesiniu induktyvumu

IEEE modelis (14 pav.) buvo supaprastintas, buvo pašalinti ir kitas būdas apibrėžti parametrai (18 pav.) (Mardira ir Saha, 2011). Autoriai teigia, kad modelis duoda gerus rezultatus modeliuojant žaibo bangos 8/20 μ s impulsą. Tačiau, šis modelis gali sukurti paklaidas, kai veikia įvairių formų ir bangos frontų elektromagnetinės bangos.



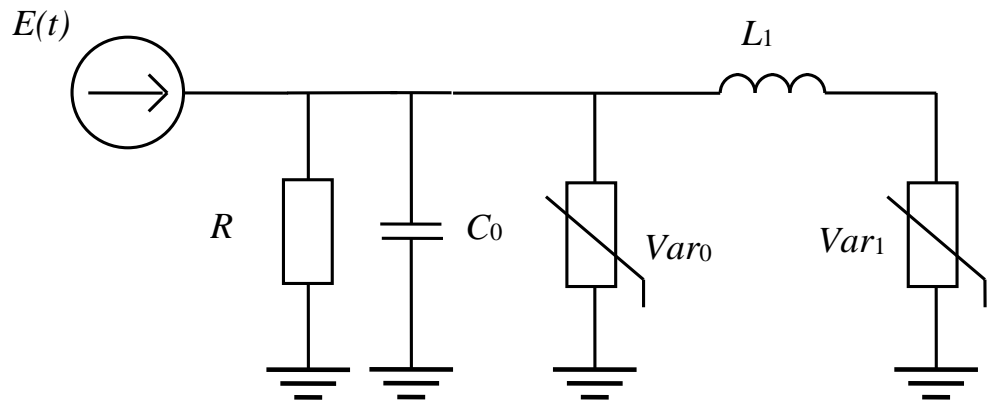
18 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis

Šiame modelyje, taip pat gautame iš IEEE viršįtampių ribotuvo modelio, visi būtini duomenys yra lengvai parenkami iš viršįtampių ribotuvų gamintojų charakteristikų, nereikia pasikartojančios korekcijos parametru, ir modelis yra gana tikslus (19 pav.) (Meister ir Oliveira, 2005a). Be to, nėra talpos elemento, ir panaudoti tik elektriniai parametrai. Dvi lygiagrečios varžos pakeičiamos viena varža R .



19 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis be talpos elemento

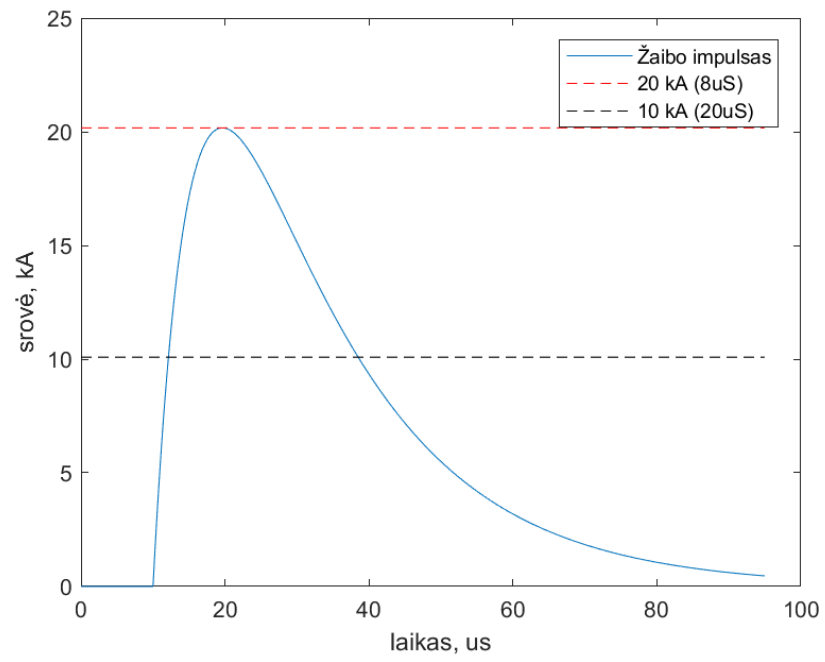
Kitais principais supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis parodytas 20 pav. (Fernandez ir Diaz, 2001). Šiame modelyje ir elektriniai ir fiziniai parametrai yra būtini. Dvi lygiagrečiai varžos pakeičia tikrai viena, lygiagrečiai prijungta talpa, o vienas induktyvusis elementas pašalintas. Ryšys tarp Var_0 ir Var_1 srovių ir jų įtampos turi būtinai būti 0,02.



20 pav. Supaprastintas IEEE viršįtampių ribotuvo modelis

Tradicinis IEEE, Pinceti ir Giannettoni, ir Fernandez ir Diaz modeliai buvo palyginti modelyje. Sudarytoje metodikoje viršįtampių ribotuvo modelis skaitmenintas. Voltamperinei charakteristikai sudaryti yra naudojamos kataloguose pateikiamos U_c , U_r ir prie įvairių srovės reikšmių nurodytos 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. 22 pav. parodytas standartinis žaibo srovės impulsas derinant klasikinį IEEE modelį (15 pav.).

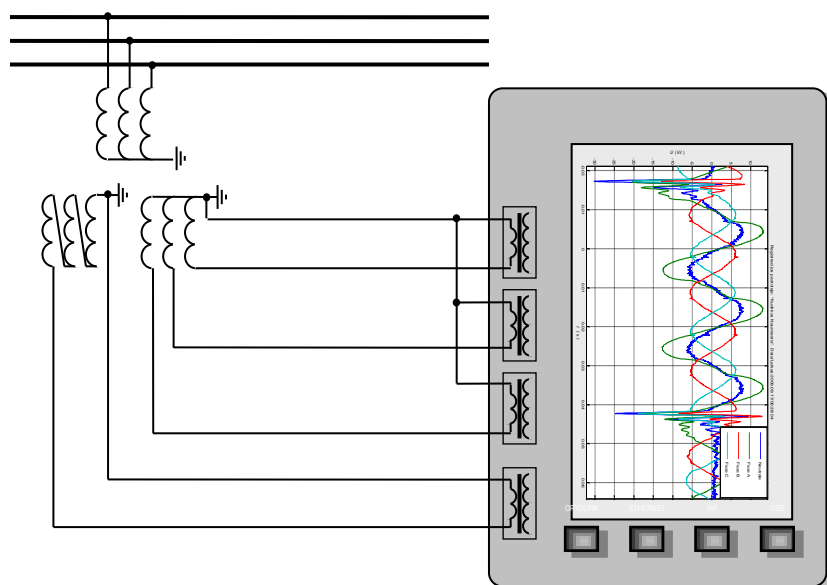


21 pav. Standartinis žaibo srovės impulsas derinant klasikinį IEEE modelį

6. Įžemėjimo sukeltų viršįtampių pereinamųjų vyksmų tyrimas

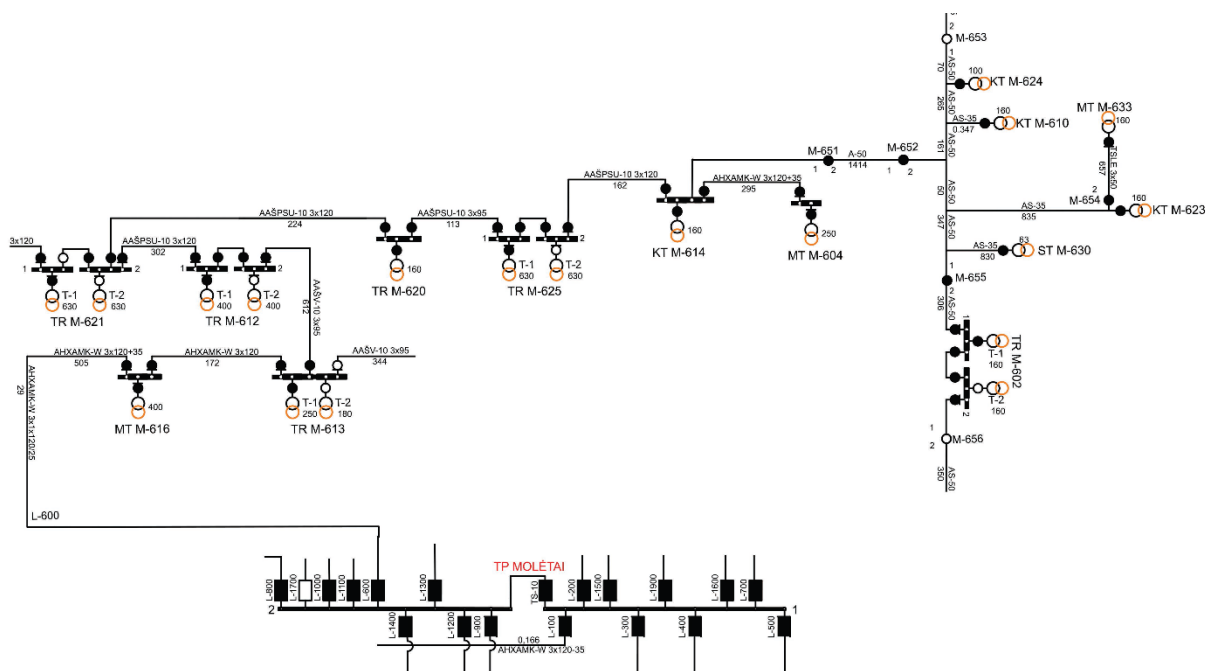
6.1. Pereinamųjų vyksmų registravimas

Krūvio nutekėjimo vyksmui nustatyti po linijos atjungimo dėl trikdžio sudaromas atliekamo eksperimento planas. Atliekant eksperimentą liekamosios įtampos išsikrovimo vyksmui registruoti svarbų parinkti režimą, kurio metu įtampa tinkle aukščiausia. Linijoje liekamasis krūvis susidaro, kai tinkle vienfazis įžemėjimas ar dvifazis trumpasis jungimas. Tokių režimų metu sveikose fazėse įtampa pakyla iki linijinės įtampos lygio. Atjungus jungtuvą sveikose fazėse krūvis nuteka per izoliaciją, viršįtampių ribotuvus ir kt. įrenginius kurių varža yra gana didelė. Kartojant linijos jungimą liekamasis krūvis turi būti ne didesnis kaip 30 procentų nuo vardinės didžiausios darbo įtampos. Tuomet kartotinio jungimo metu viršįtampiai nebus aukštesnės amplitudės nei įrenginių izoliacijos atsparumas. Bandymo metu matavimo-registravimo įtaisai jungiami prie įtampos transformatoriaus 10 kV įtampos skirstykloje (22 pav.) ir linijoje (23 pav.), kur yra galimybė prijungti matavimo-registravimo įtaisus įtampai matuoti.



22 pav. Registruojančio įtaiso prijungimo prie įtampos transformatoriaus schema

Eksperimento ciklas atliekamas dviem etapais. Pirmojo etapo metu atliekamas vienfazio įžemėjimo veiksmas registruojant įtampos kaitos vyksmą fazėse ir atvirojo trikampio apvijoje. Antrojo etapo metu atjungiamas linijos jungtuvas ir registruojamas krūvio nutekėjimo vyksmas linijoje prijungtais registravimo įtaisais.



23 pav. Molētu TP L–600 līnijas shēma izmēģinājuma eksperimentam

Ītampos ir srovēs išsikrovimo vyksmams registruoti vienoje fazėje (kurioje nebus dirbtinio izmēģinājuma) prijungiamas specialus ģtampos ir srovēs matavimo transformatorius (6.3 pav.).



24 pav. Specialus srovēs ir ģtampos matavimo transformatorius registratoriui

Transformatorius matavimams līnijoje krūvio nutekējimo vyksmui registruoti buvo ģrengtas Molētu līnijas 600/14 atramoje (tarp M-651 ir M-652) prie vidurinio laido 25 pav.



25 pav. Molėtų linijos 600/14 atramoje prie vidurinio laido prijungtas specialus srovės ir įtampos matavimo transformatorius

Linijos L-600 gale prie MT M-633 prijungtas viršįtampių registratorius (26 pav.) pereinamiesiems vyksmams registruoti perjungimų metu.



26 pav. Transformatorinėje MT M-633 prijungtas viršįtampių registratorius

Molėtų TP prie L-600 narvelio buvo prijungtas keturių kanalų registratorius. Trys kanalai registravo įtampos pereinamąjį vyksmą fazėse, o vienas kanalas – nulinės sekos srovę eksperimento metu.

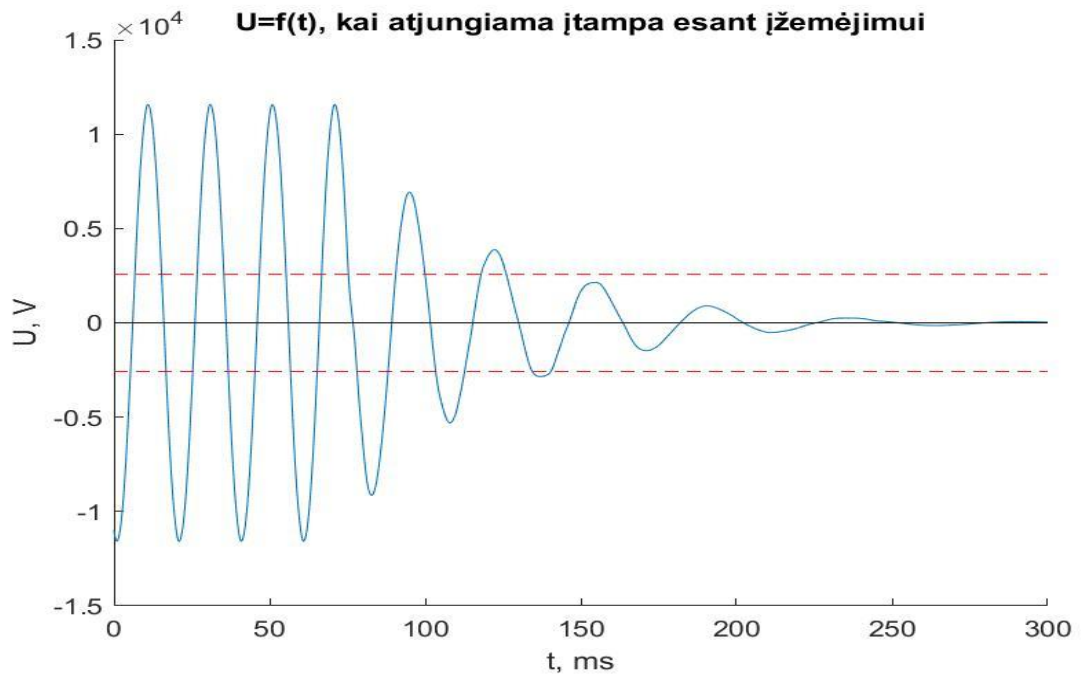
6.2. Tinklo charakteristikų nustatymas

Įžemėjimo eksperimentui atlikti numatyta Molėtų TP L-600 linija. Įžemėjimo eksperimento linijoje programinė seka:

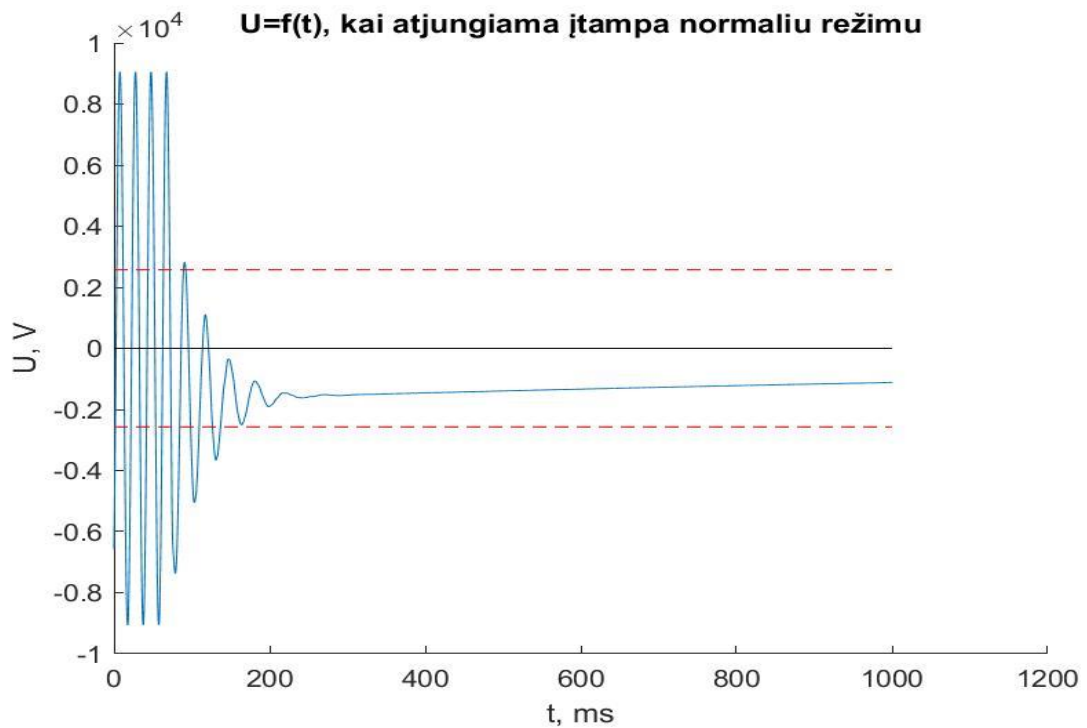
- Linijoje prijungiamas (numatytoje sveikoje fazėje) srovės ir įtampos matavimo transformatorius (24 pav.);
- Vienoje Molėtų TP L-600 linijos vietoje parengiama vienfazio dirbtinio įžemėjimo schema;
- Molėtų TP prijungiamas registratorius prie įtampos transformatoriaus antrinės apvijos fazinių gnybtų ir prie atvirojo trikampio gnybtų. Vienas matavimo kanalas prijungiamas per (išardomą registratoriaus) srovės transformatorių prie L-600 linijos nulinės sekos srovės transformatoriaus. Jeigu yra galimybė, trys registratoriaus kanalai prijungiami prie linijos įtampos indikatorių.
- Prie srovės ir įtampos matavimo transformatoriaus antrinės grandinės prijungiamas kitas registratorius išsikrovimo vyksmui registruoti;
- Sujungus registratorius ir nustačius matavimo diapazoną pasirengiama trumpalaikiam dirbtinio įžemėjimo bandymui. Molėtų TP L-600 linija prijungta;
- Molėtų TP L-600 linijoje numatytoje vietoje sudaromas dirbtinis vienfazis įžemėjimas. Linijos L-600 jungtuvas atjungiamas 15-20 sekundžių. Įžemėjimas atjungiamas, o linija L-600 įjungžiama;
- Bandymas kartojamas įsiminus registracijas ir nustačius registratorių parametrus naujam bandymui;
- Įžemėjimo bandymas kartojamas analogiškai kaip ir pirmojo bandymo metu, tačiau po linijos L-600 jungtuvo išjungimo galima per trumpiausią laiką arba tuo pat metu, išjungiamas įžemėjimas.

Svarbiausi bandymo rezultatai gaunami registruojant krūvio nutekėjimo vyksmą esant įžemėjimui po atjungimo ir išnykstant įžemėjimui po atjungimo.

Atliekant eksperimentą buvo registruojama įtampa ir srovė linijoje su įžemėjimu jį atjungiant ir atjungiant liniją be įžemėjimo. Kai atjungžiama linija su įžemėjimu ir jam neišnykstant, krūvis per įžemėjimo vietą nuteka greitai, tą ir rodo eksperimento rezultatai (27 pav.). Atjungiant liniją be įžemėjimo krūvio nutekėjimo pereinamasis vyksmas, atsijungus visoms fazėms, gęsta aperiodiškai (28 pav.). Tokia situacija gali būti, kai esant įžemėjimui atjungžiama linija be įžemėjimo, o kartotinio jungimo metu jungiant tokią liniją gali būti sukelti viršįtampiai aukštesnės amplitudės nei linijos elementų izoliacijos atsparumas.

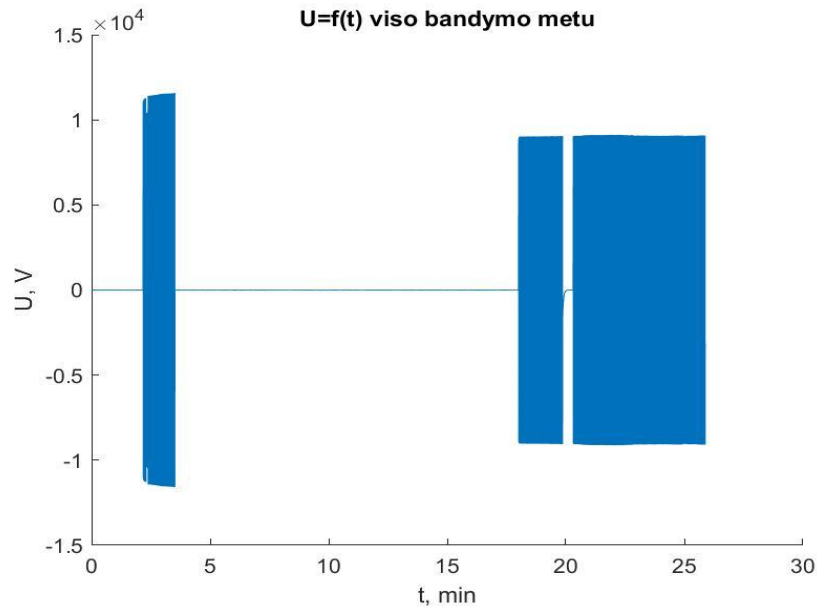


27 pav. Įtampos pereinamasis vyksmas nepažeistoje fazėje atjungiant įžemėjusią liniją



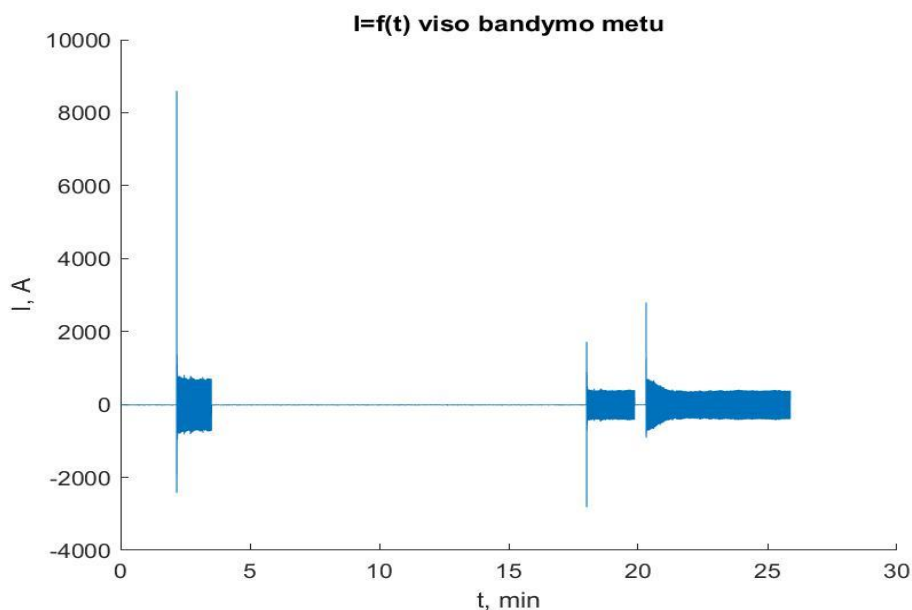
28 pav. Linijos atjungimo pereinamasis vyksmas atjungiant liniją be įžemėjimo

Viso eksperimento metu registruoto įtampos pereinamojo vyksmo registracija parodyta 29 pav., o srovės 30 pav. Pradžioje buvo registruojamas įžemėjimas (įtampa sveikoje fazėje pakilo iki linijinės įtampos, po to linija atjungiamas su įžemėjimu, įžemėjimas atjungiamas, linija be įžemėjimo įjungiamas, po trumpo veikimo atjungiamas ir po trumpo pauzės įjungiamas).



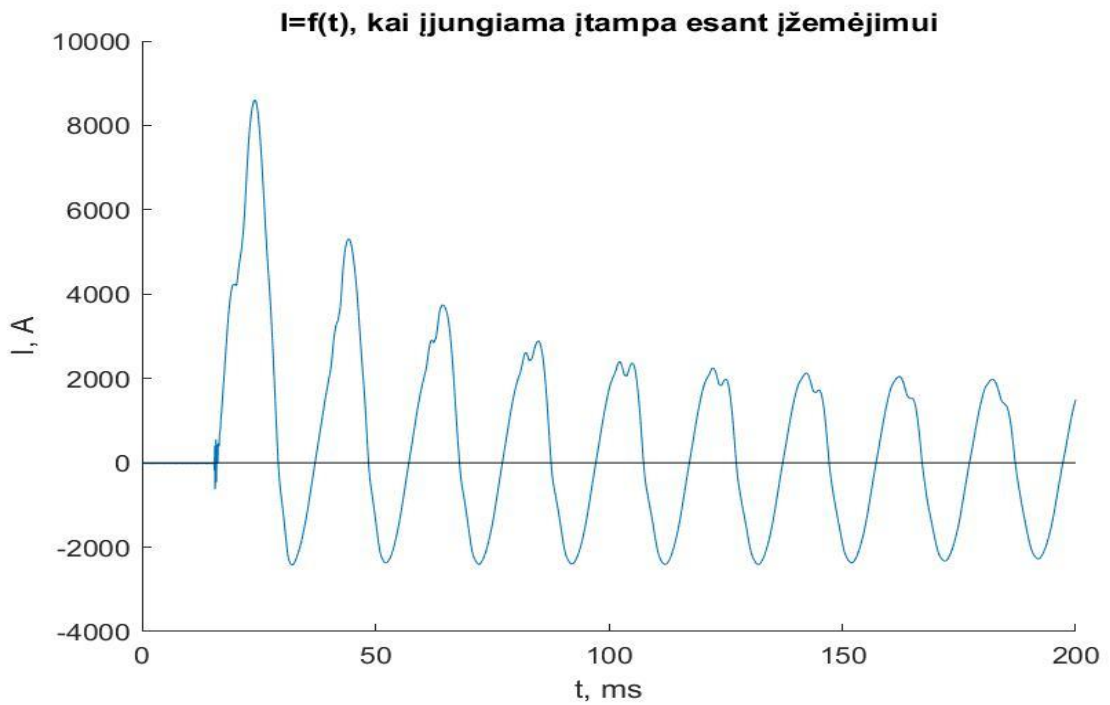
29 pav. Viso eksperimento įtampos vyksmo registracija

Eksperimentai parodė, kad krūvio nutekėjimo laikas ilgesnis tuomet, kai atjungiamą linija be įžemėjimo arba kai įžemėjimas nutrūksta atjungimo metu. Pasinaudojus eksperimento rezultatais iš charakteristikos nuo momento, kai atsijungę visos fazės (28 pav.) ir pasibaigęs pereinamasis vyksmas dėl magnetinio ryšio tarp fazių, nustatoma laiko pastovioji ir patikslinami modelio parametrai (kabelių bei kitų elementų talpa ir viršįtampių ribotuvo ekvivalentinės schemas elementų). Krūvio nutekėjimo vyksmas atsijungus jungtuvo paskutinei fazei vyksta pagal tinklo elementų charakteristikas ir priklauso tik nuo atjungimo momentų buvusios įtampos. Aukščiausia įtampa gali būti tuomet, kai linija atjungiamą, esant galvaniskai sujungtame elektros tinkle. Krūvio nutekėjimo vyksmas tęsis ilgiausiai. Linijos elementų parametrai nepriklauso nuo tinklo įtampos, todėl patikslinti parametrai pagal eksperimento rezultatus, kai atjungiamą linija, tinkami ir modeliuojant įvairius režimus, kai reikia nustatyti AKĮ pauzės ribines vertes.

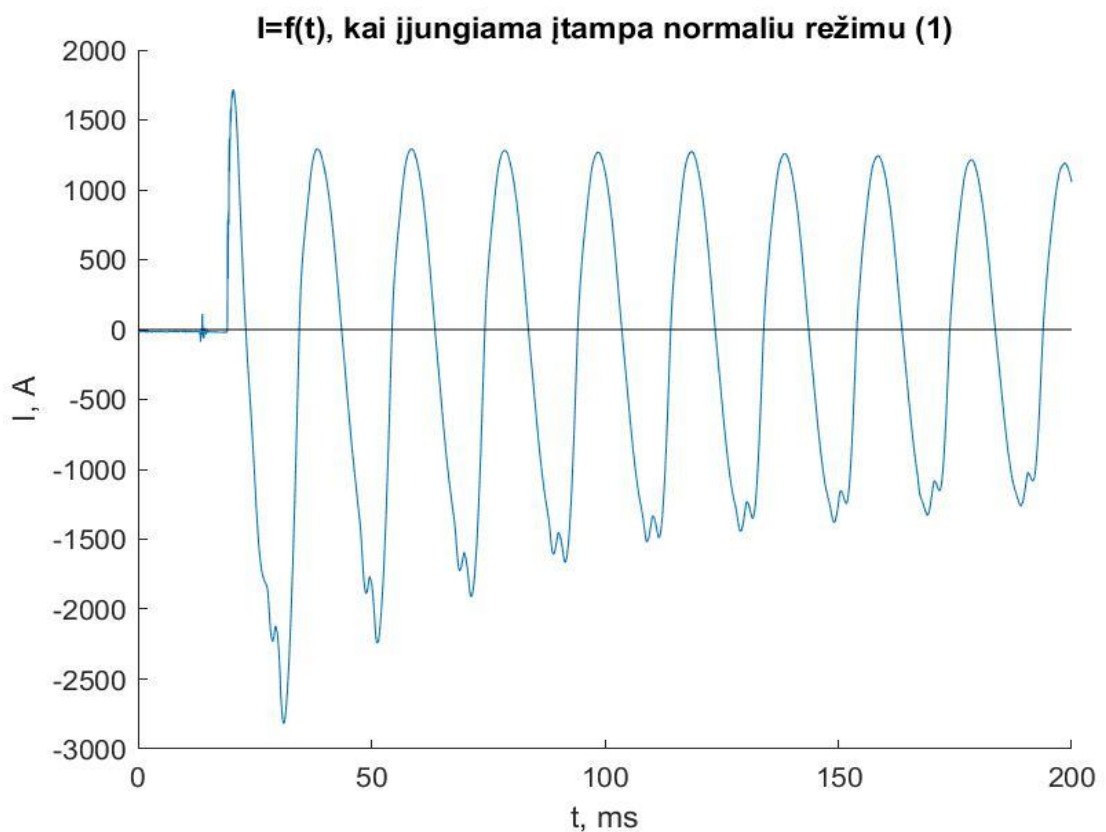


30 pav. Fazinės srovės pereinamojo vyksmo registracija viso eksperimento metu

Srovės pradinis pereinamasis vyksmas linijos jungimo su įžemėjimu metu parodytas 31 pav. o normalaus jungimo metu – 32 pav.



31 pav. Pradinis fazinės srovės nepažeistoje fazėje pereinamasis vyksmas jungiant liniją su įžemėjimu



32 pav. Pradinis fazinės srovės pereinamasis vyksmas jungiant liniją

Eksperimento metu linijoje registruoti pereinamieji vyksmai įjungiant ir atjungiant liniją su įžemėjimu ir be jo įgalino, patikslinti skaitmeninio modelio parametrai. Kitose tiriamose elektros tinklo schemose, išrinktose pagal procentinį oro ir kabelių ilgį linijoje (3 lentelė), sudarius skaitmeninius modelius buvo nustatyti ribiniai parametrai diegiant AKĮ į mišrias oro ir kabelių linijas. Įvertinus tyrimo, eksperimento ir modeliavimo rezultatus nustatytos rekomendacinės AKĮ pauzės įvertinus kabelio ilgį ir viršįtampių ribotuvų skaičių linijoje.

3 lentelė. Atrinktų tyrimams linijų charakteristika

Linija Tipas	Rokiškio TP L-900	Rokiškio TP L-300	Rokiškio TP SP-4	Molėtų TP L-600
OL ilgis	6609 m	11747 m	3298 m	4278 m
KL ilgis	2103 m	9159 m	2910 m	3071 m
Visas ilgis	8712 m	20906 m	6208 m	7349 m
OL%	75,86	56,19	53,13	58,21
KL%	24,14	43,81	46,97	41,79

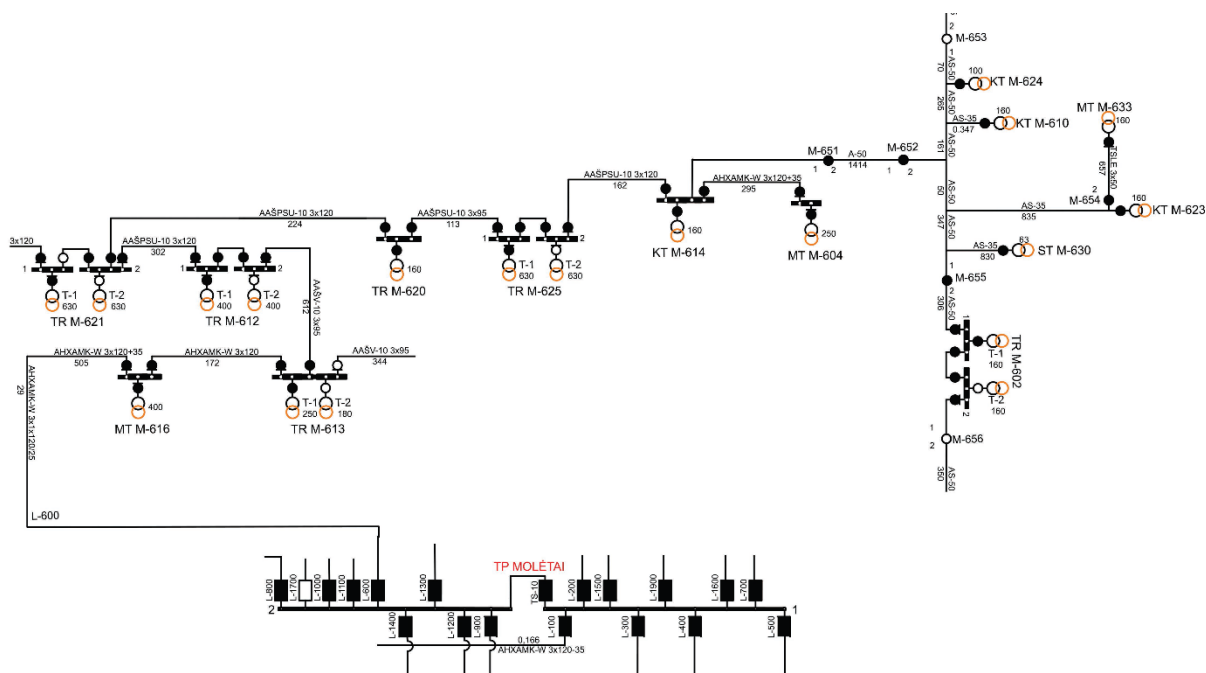
6.3. AKĮ pauzės kombinuotame oro ir kabelių tinkle trukmės tyrimas

Tyrimams atrinktos 10 kV linijos pagal tokius kriterijus:

- apie 50 % oro linija su atšakomis apie 50 % kabelių linija;
- apie 70 % oro linija su atšakomis apie 30 % kabelių linija;
- apie 30 % oro linija su atšakomis apie 70 % kabelių linija.

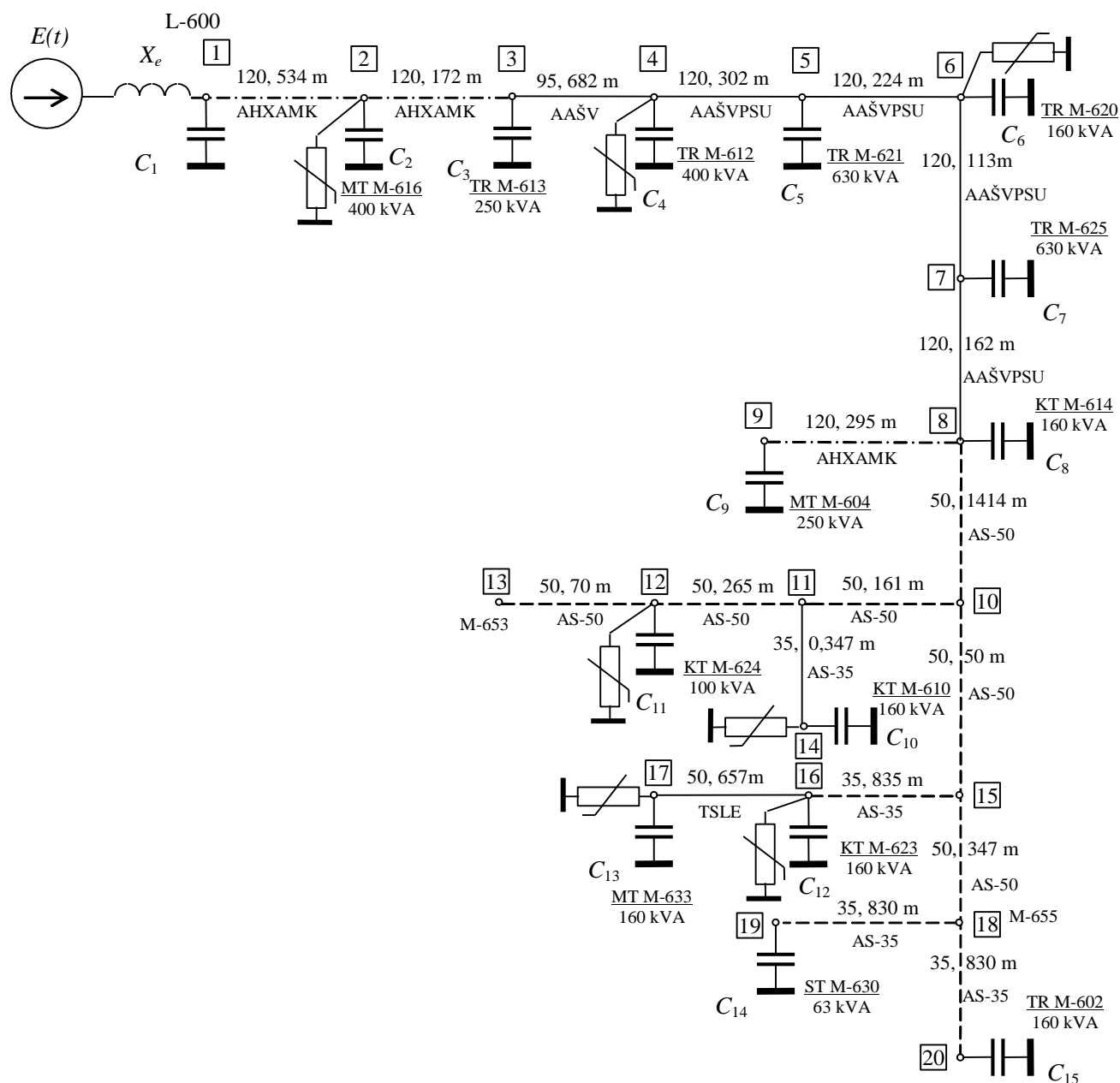
6.3.1 Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Molėtų TP L-600 linijoje

AKĮ pauzei nustatyti, buvo sudarytas skaitmeninis modelis įvertinantis oro linijos dalies ir kabelių talpas bei viršįtampių ribotuvų charakteristikas. Kaip parodė eksperimentai ir modeliavimo rezultatai svarbu sudaryti elektros tinklo modelį parenkant adekvačius tinklo elementų parametrus. Iškvirkliai krūvio nutekėjimo po atjungimo vyksmui įtakos neturi todėl gali būti modelyje nevertinami. Ribotuvai neturi kibirkštinio tarpelio, yra jungiami tiesiogiai, todėl įtakoja išsikrovimo vyksmo trukmę. Nuo ribotuvų skaičiaus prijungto prie tiriamos schemos linijos modelyje priklauso krūvio nutekėjimo greitis. Molėtų TP L-600 linijos sujungimų schema parodyta 33 pav. Skaičiuojamoji schema skaitmeniniam linijos modeliui sudaryti parodyta 34 pav.



33 pav. Molėtų TP L-600 linijos schema

Modeliuojant buvo nustatyti blogiausias elektros tinklo režimas, kai atjungiamoje fazėje įtampa didžiausia, o linijoje atjungimo momentų nebėra įžemėjimo. Krūvio nutekėjimo vyksmui didžiausią įtaką turi kabelių linijų ilgis ir viršįtampių ribotuvų skaičius. Įžemėjimo vieta įtakos krūvio nutekėjimo vyksmui įtakos neturi. Modeliuojant krūvio nutekėjimo vyksmą apskaičiuojamas nusistovėjęs režimas, po to, atjungiamas linijos jungtuvas ir modeliuojamas išsikrovimo vyksmas pagal apskaičiuotas pradines nusistovėjusio režimo sąlygas.



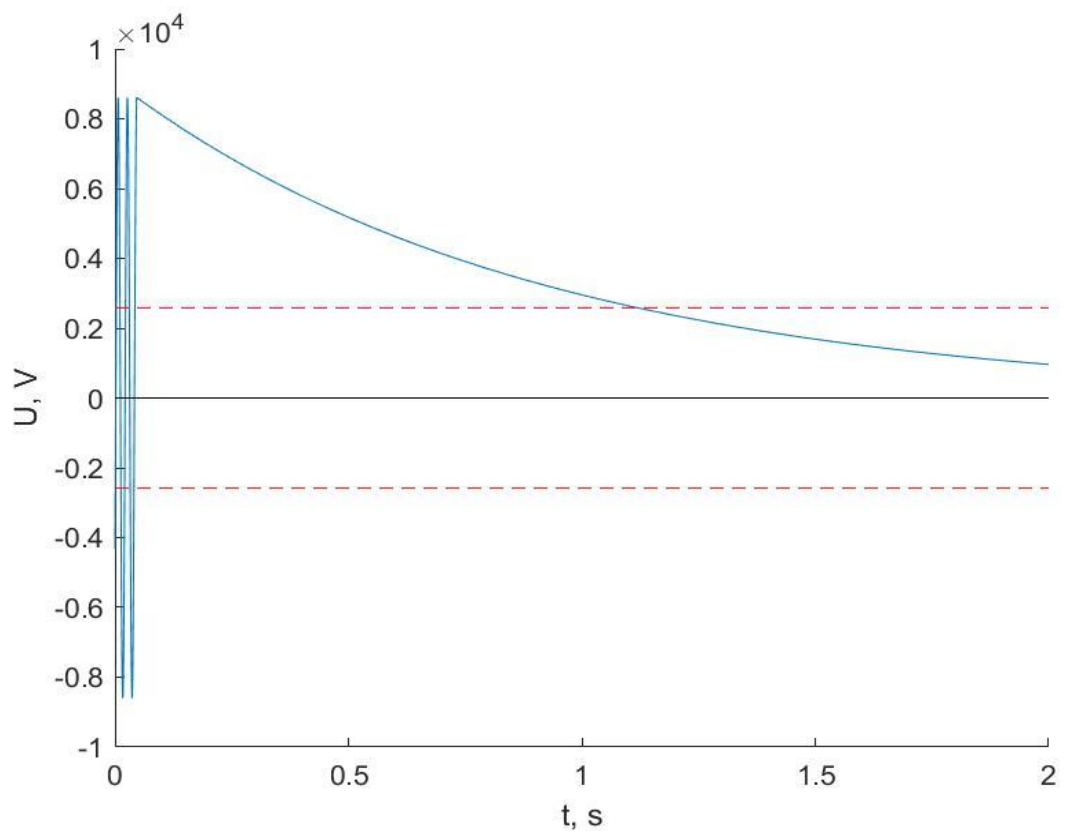
34 pav. Molėtų TP L-600 linijos skaičiuojamoji schema

Modeliuojami du galimi ribiniai režimai:

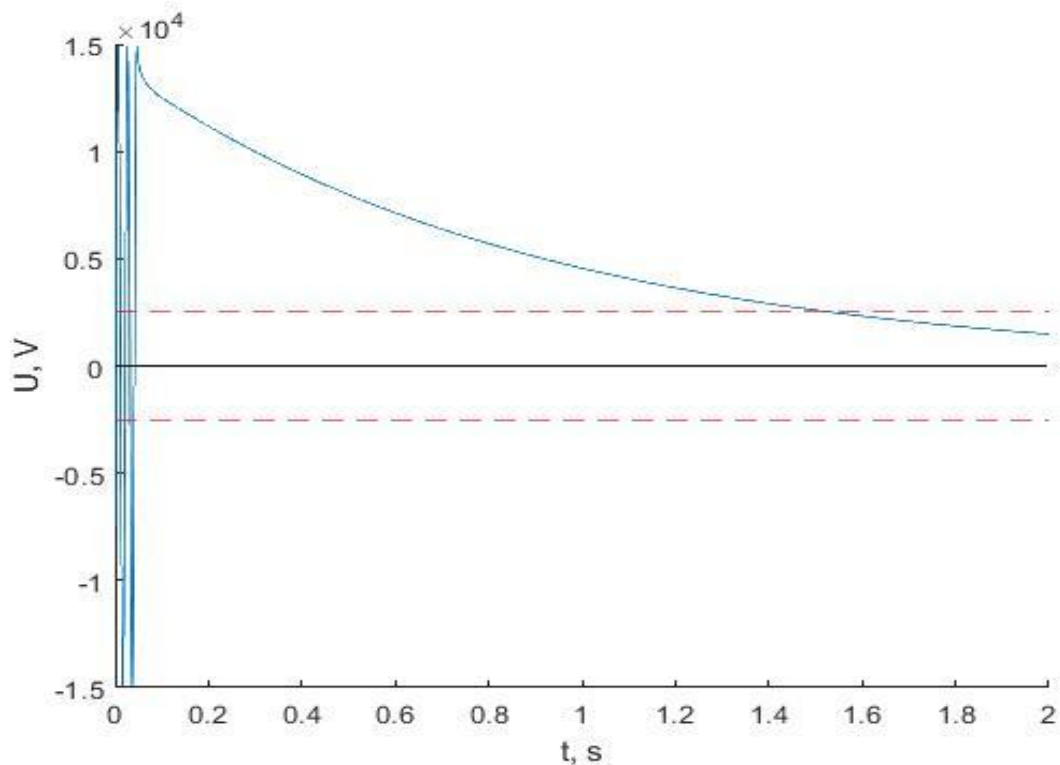
- Linijos atjungimas normalaus režimo metu;
- Linijos atjungimas, kai tinkle (ne atjungiamoje linijoje) įžemėjimas.

Krūvio nutekėjimo vyksmo, atjungus liniją, fiksuojamas laikas, kai liekamasis krūvis sudaro ne daugiau, kaip 30 procentų fazinės įtampos. Kartojant linijos jungimą su tokiu liekamuoju krūviu komutacinių viršįtampių lygis neviršija $3,5 F_M$.

Molėtų TP L-600 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas parodytas 35 pav., o atjungiant liniją, kai įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje, parodytas 36 pav.



35 pav. Molėtų TP L-600 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas

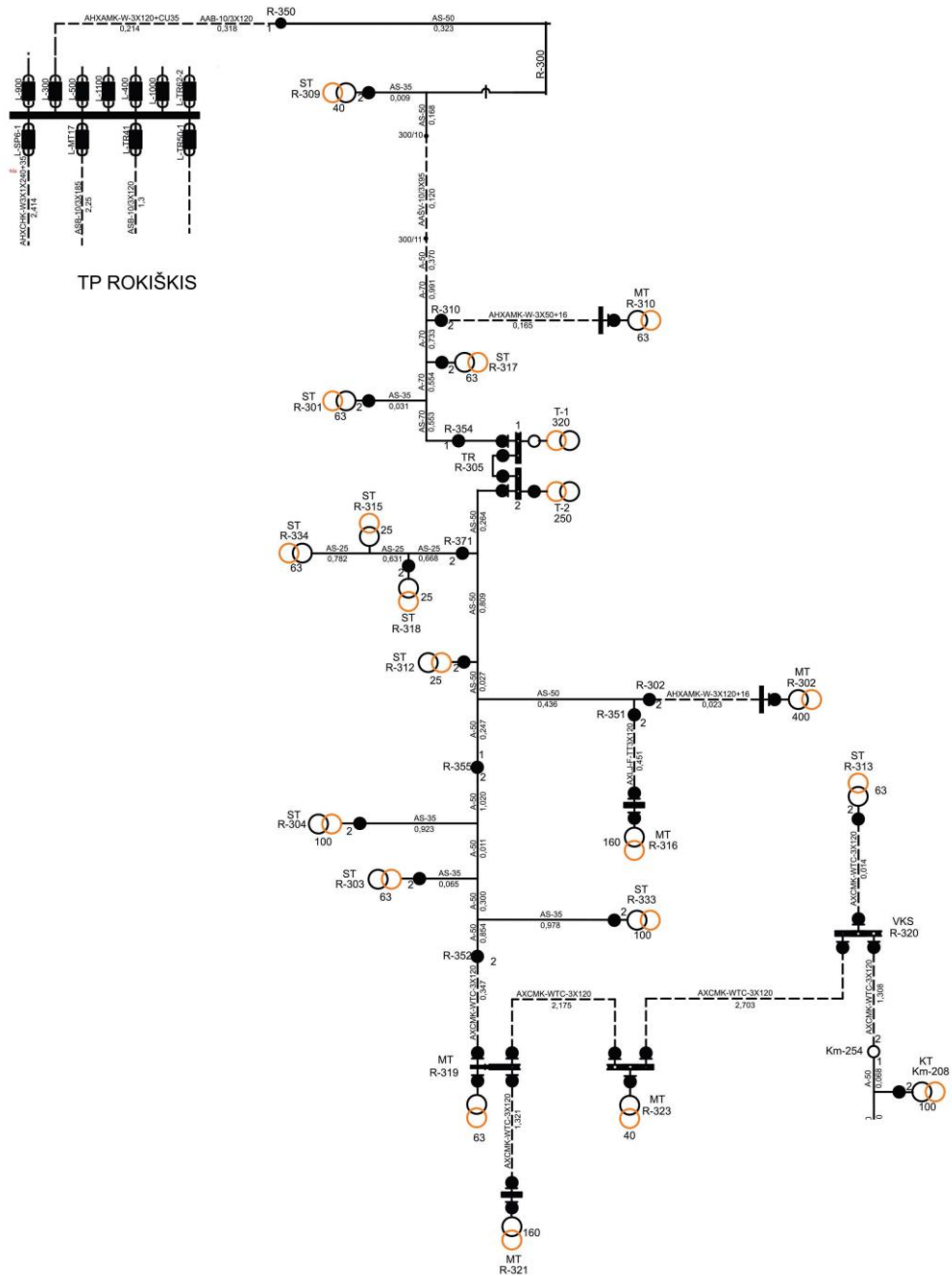


36 pav. Molėtų TP L-600 linijos (įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas

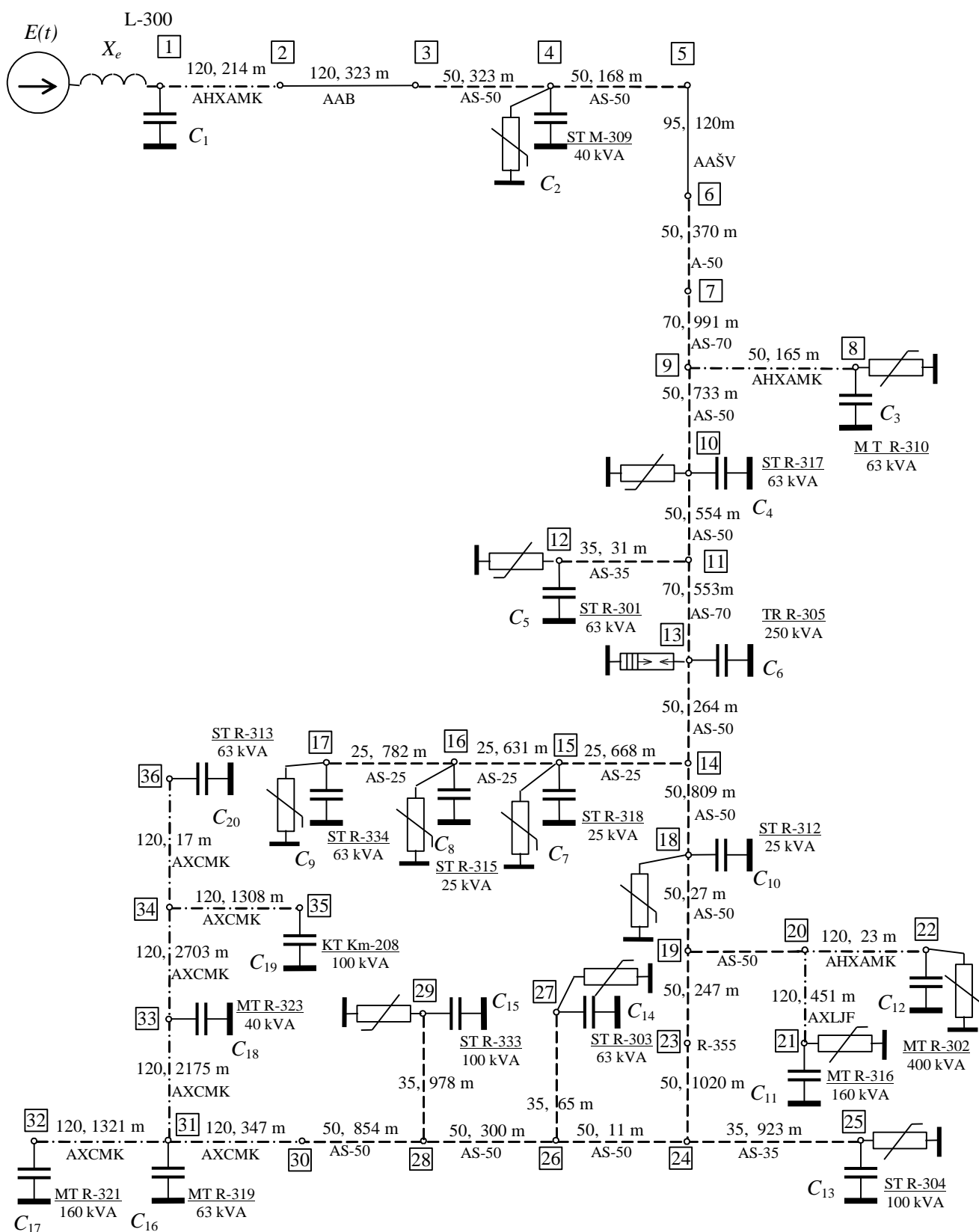
Normalaus režimo metu AKĮ pauzė turi būti ne trumpesnė kaip 1,12 sekundės. Įvertinus galimo įžemėjimo tikimybę AKĮ pauzė Molėtų TP L-600 linijai (33 pav.) turi būti ne trumpesnė kaip 1,51 sekundės, kai kabelių ilgis 3,071 km.

6.3.2. Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Rokiškio TP L-300 linijoje

AKĮ pauzei Rokiškio TP L-300 linijoje nustatyti, buvo sudarytas skaitmeninis modelis įvertinantis oro linijos dalies ir kabelių talpas bei viršįtampių ribotuvų charakteristikas. Sudarant skaitmeninį modelį buvo įvertintos analogiškos sąlygos kaip ir sudarant Molėtų TP L-600 linijos schemą. Rokiškio TP L-300 linijos sujungimų schema parodyta 37 pav. Skaičiuojamoji schema skaitmeniniam linijos modeliui sudaryti parodyta 38 pav.



37 pav. Rokiškio L-300 linijos schema

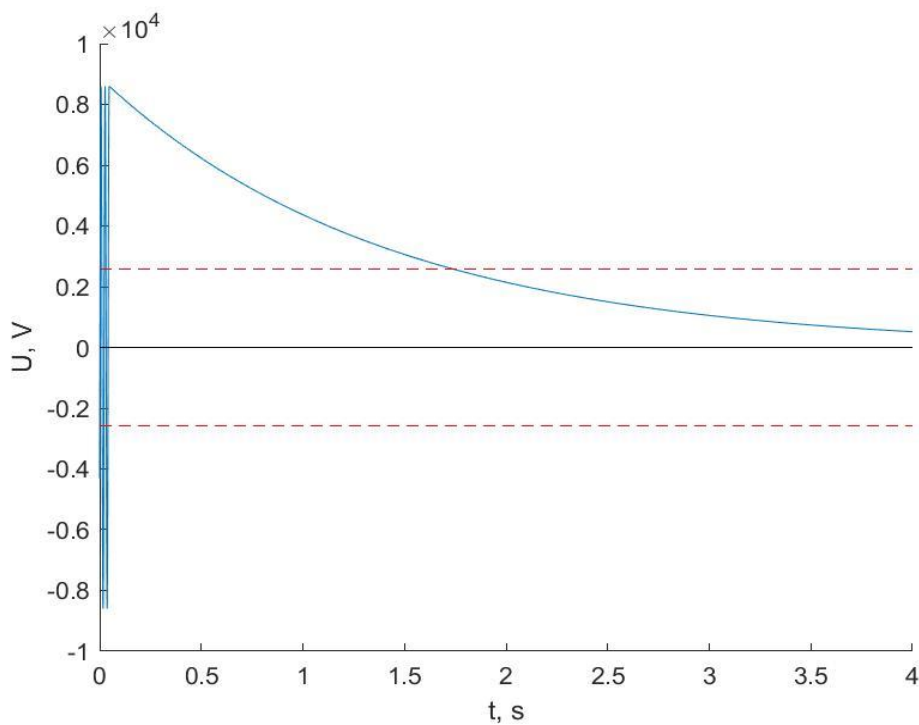


38 pav. Rokiškio L-300 linijos ekvivalentinė schema

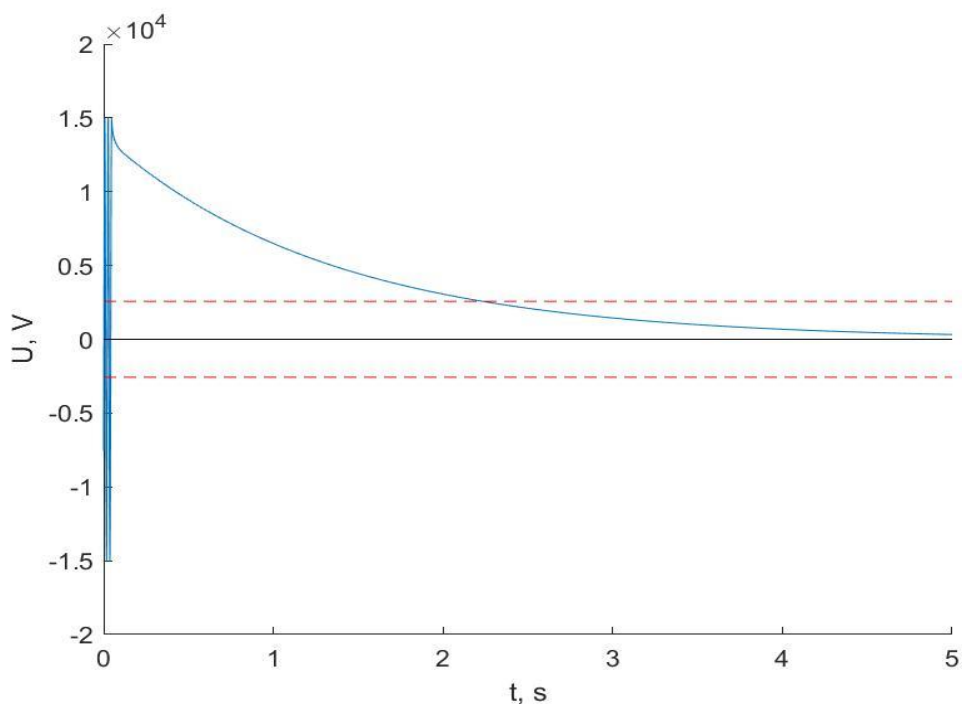
Rokiškio TP L-300 linijai modeliuojami du galimi ribiniai režimai analogiškai Molėtų TP L-600 linijai. Krūvio nutekėjimo vyksmo, atjungus liniją, fiksuojamas laikas, kai liekamasis krūvis sudaro

ne daugiau, kaip 30 procentų fazinės įtampos. Kartojant linijos jungimą su tokiu liekamuoju krūviu komutacinių viršįtampių lygis neviršija $3,5 U_{fm}$.

Rokiškio TP L-300 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas parodytas 39 pav., o atjungiant liniją, kai išemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje, parodytas 40 pav.



39 pav. Rokiškio TP L-300 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas

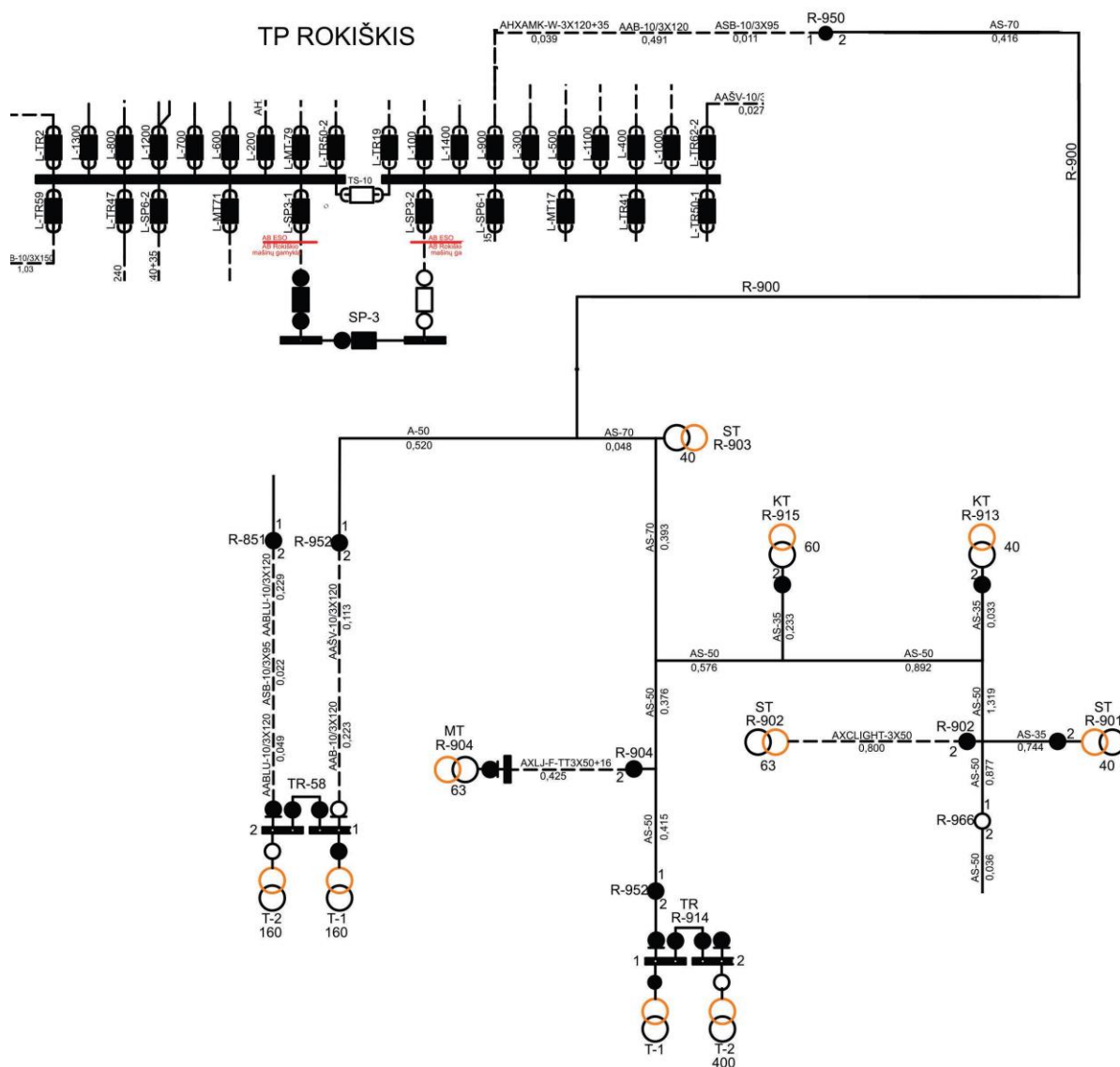


40 pav. Rokiškio TP L-300 linijos (išemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas

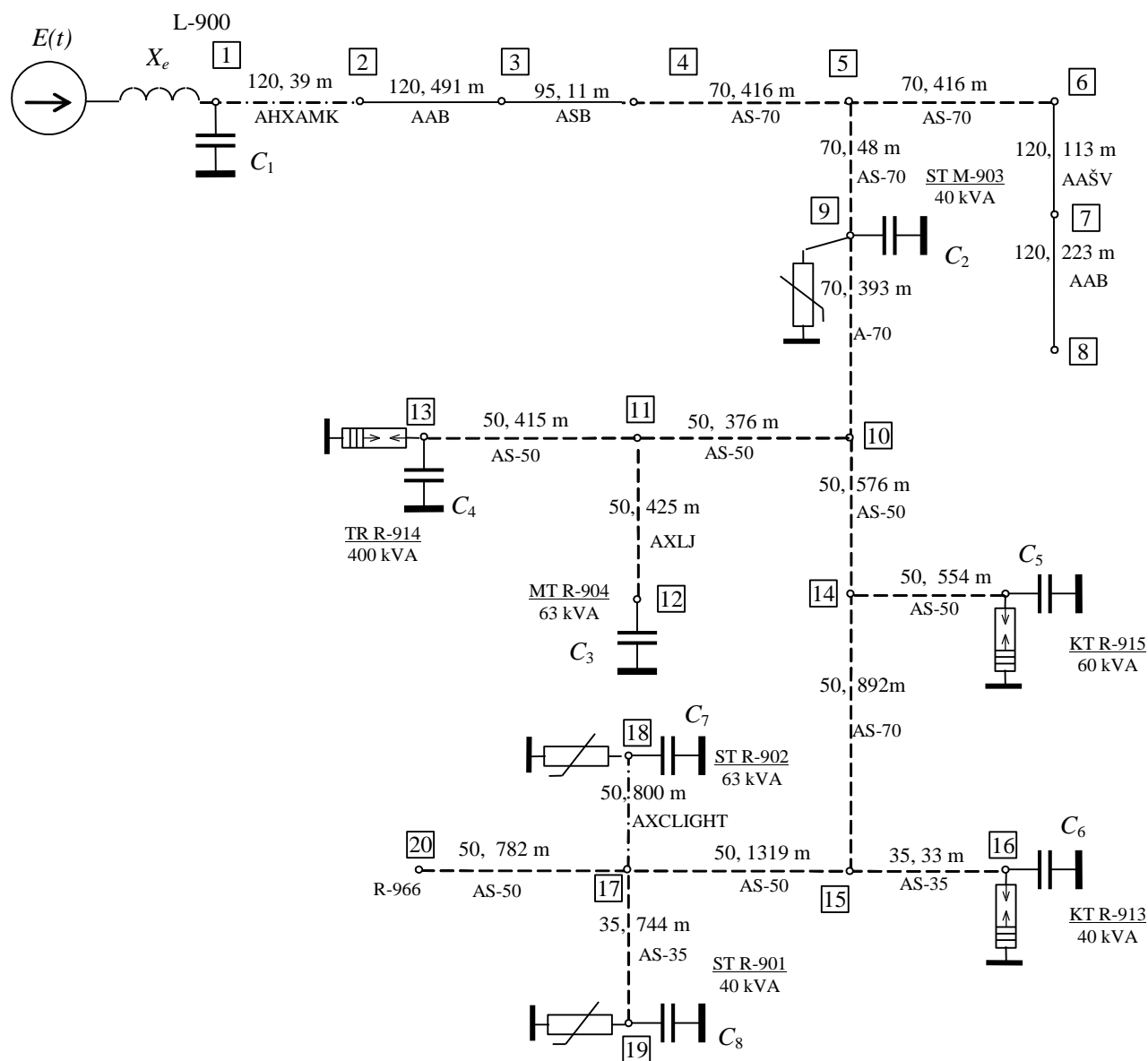
Normalaus režimo metu AKĮ pauzė turi būti ne trumpesnė kaip 1,65 sekundės. Įvertinus galimo įžemėjimo tikimybę AKĮ pauzė Rokiškio TP L-300 linijai (37 pav.) turi būti ne trumpesnė kaip 2,23 sekundės, kai kabelių ilgis 9,16 km.

6.3.3. Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Rokiškio TP L-900 linijoje

AKĮ pauzei Rokiškio TP L-900 linijoje nustatyti, buvo sudarytas skaitmeninis modelis įvertinantis oro linijos dalies ir kabelių talpas bei viršįtampių ribotuvų charakteristikas. Sudarant skaitmeninį modelį buvo įvertintos analogiškos sąlygos kaip ir sudarant Molėtų TP L-600 linijos schemą. Rokiškio TP L-900 linijos sujungimų schema parodyta 41 pav. Skaičiuojamoji schema skaitmeniniam linijos modeliui sudaryti parodyta 42 pav.



41 pav. Rokiškio L-900 linijos schema

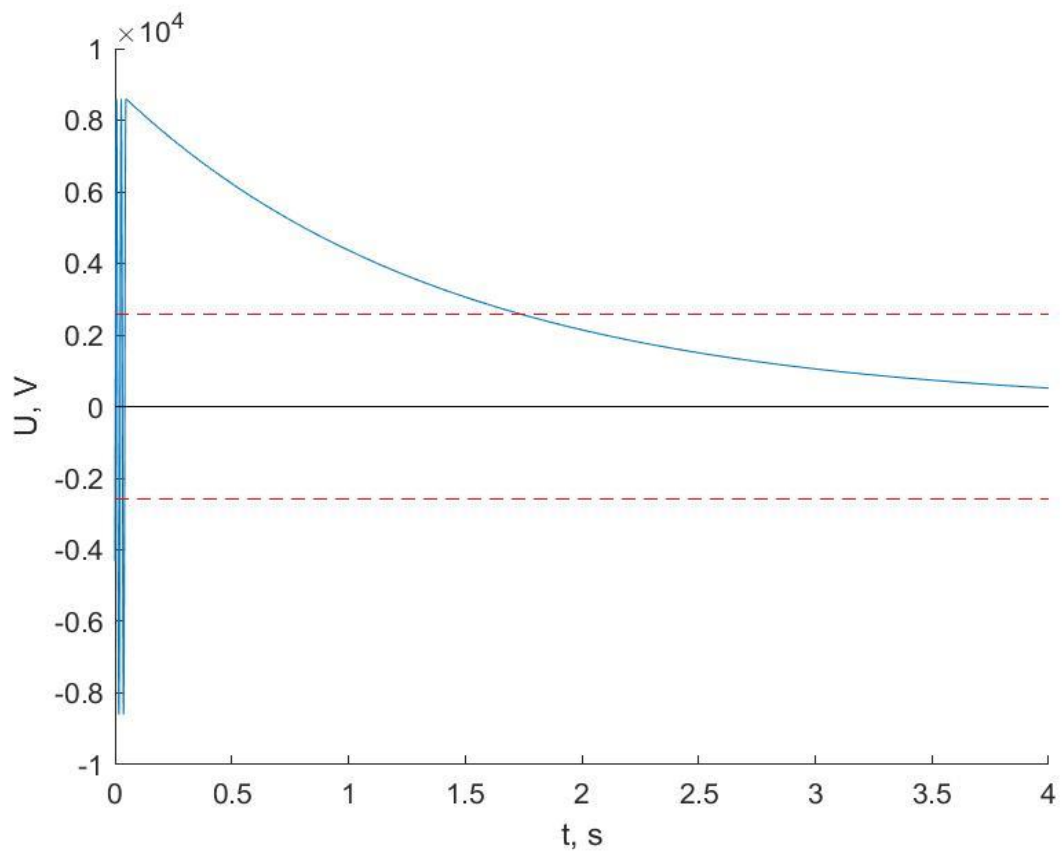


42 pav. Rokiškio L-900 linijos ekvivalentinė schema

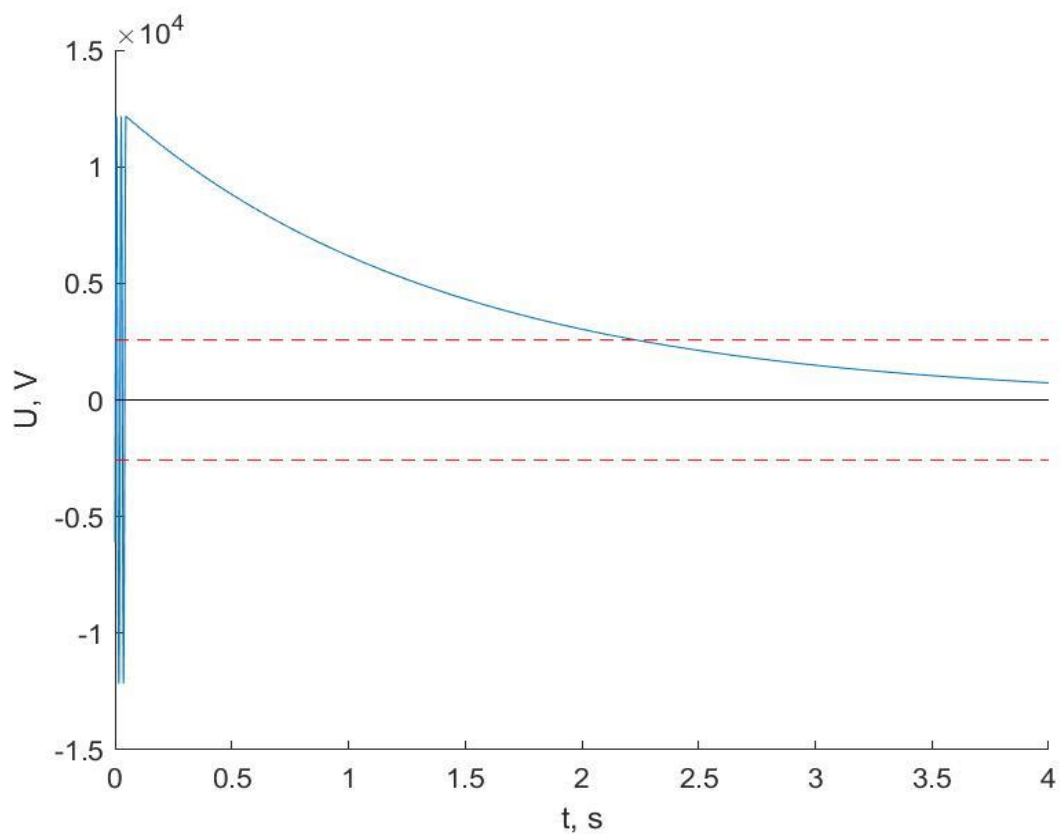
Rokiškio TP L-900 linijai modeliuojami du galimi ribiniai režimai analogiškai Molėtų TP L-600 linijai. Krūvio nutekėjimo vyksmo, atjungus liniją, fiksuojamas laikas, kai liekamasis krūvis sudaro ne daugiau, kaip 30 procentų fazinės įtampos. Kartojant linijos jungimą su tokiu liekamuoju krūviu komutacinių viršįtampių lygis neviršija $3,5 U_{fm}$.

Rokiškio TP L-900 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas parodytas 43 pav., o atjungiant liniją, kai įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje, parodytas 44 pav.

Normalaus režimo metu AKĮ pauzė turi būti ne trumpesnė kaip 1,74 sekundės. Įvertinus galimo įžemėjimo tikimybę AKĮ pauzė Rokiškio TP L-900 linijai (41 pav.) turi būti ne trumpesnė kaip 2,24 sekundės, kai kabelių ilgis 2,13 km.



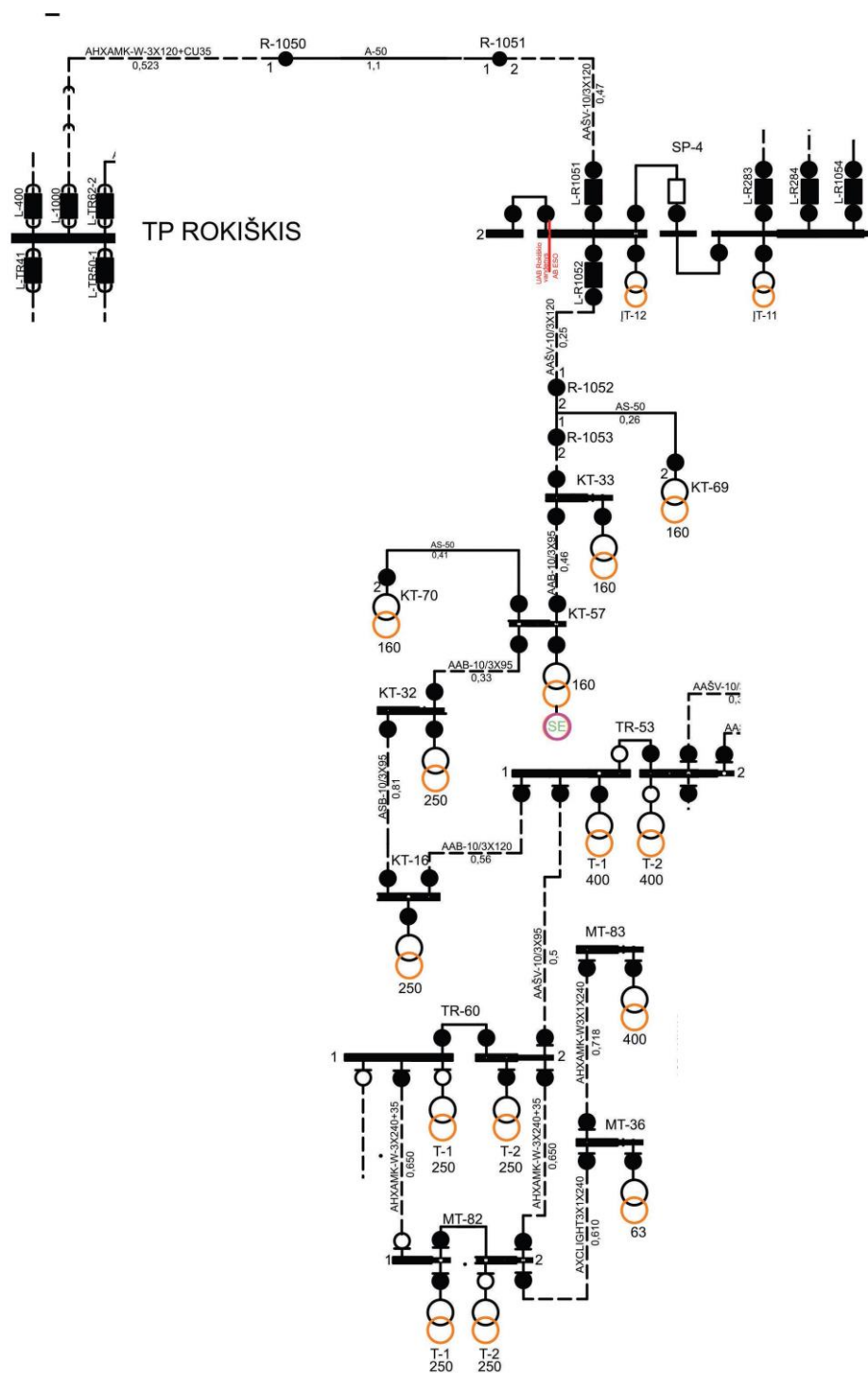
43 pav. Rokiškio TP L-900 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas



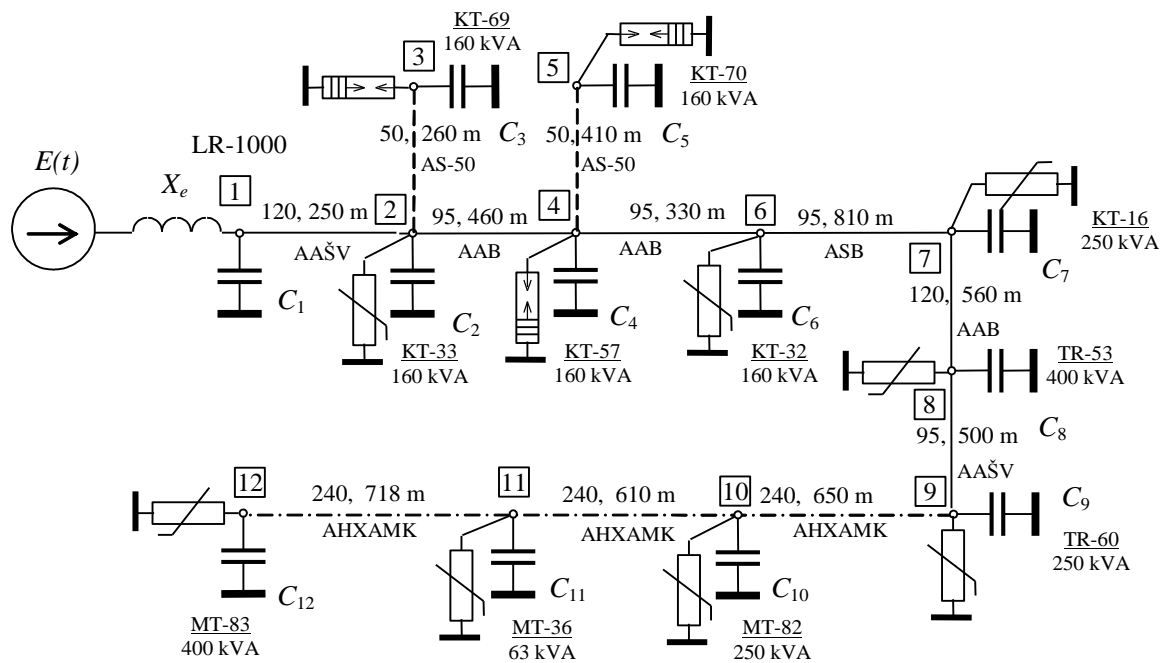
44 pav. Rokiškio TP L-900 linijos (įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas

6.3.4. Liekamojo krūvio vyksmo tyrimas Rokiškio SP-4 LR-1000 linijoje

AKĮ pauzei Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijoje nustatyti, buvo sudarytas skaitmeninis modelis įvertinantis oro linijos dalies ir kabelių talpas bei viršitampių ribotuvų charakteristikas. Sudarant skaitmeninį modelį buvo įvertintos analogiškos sąlygos kaip ir sudarant Molėtų TP L-600 linijos schemą. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos sujungimų schema parodyta 45 pav. Skaičiuojamoji schema skaitmeniniam linijos modeliui sudaryti parodyta 46 pav.



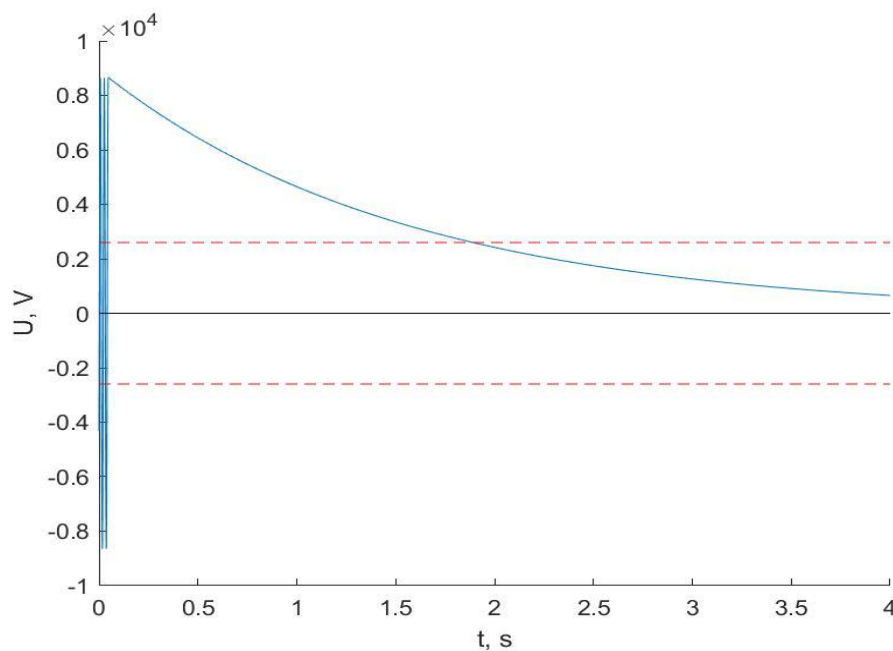
45 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos schema



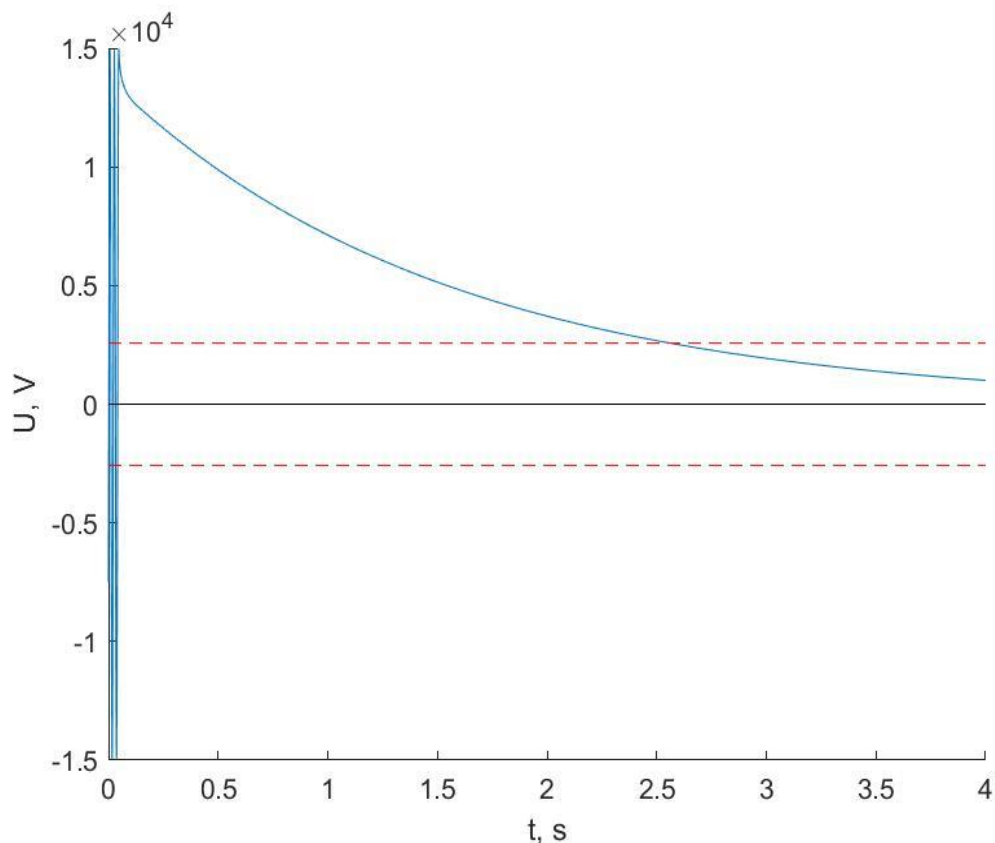
46 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos ekvivalentinė schema

Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijai modeliuojami du galimi ribiniai režimai analogiškai Molėtų TP L-600 linijai. Krūvio nutekėjimo vyksmo, atjungus liniją, fiksuojamas laikas, kai liekamasis krūvis sudaro ne daugiau, kaip 30 procentų fazinės įtampos.

Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas parodytas 47 pav., o atjungiant liniją, kai išemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje, parodytas 48 pav.



47 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos normalaus režimo atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas



48 pav. Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijos (įžemėjimas galvaniškai sujungtame tinkle kitoje linijoje) atjungimo metu krūvio nutekėjimo vyksmas

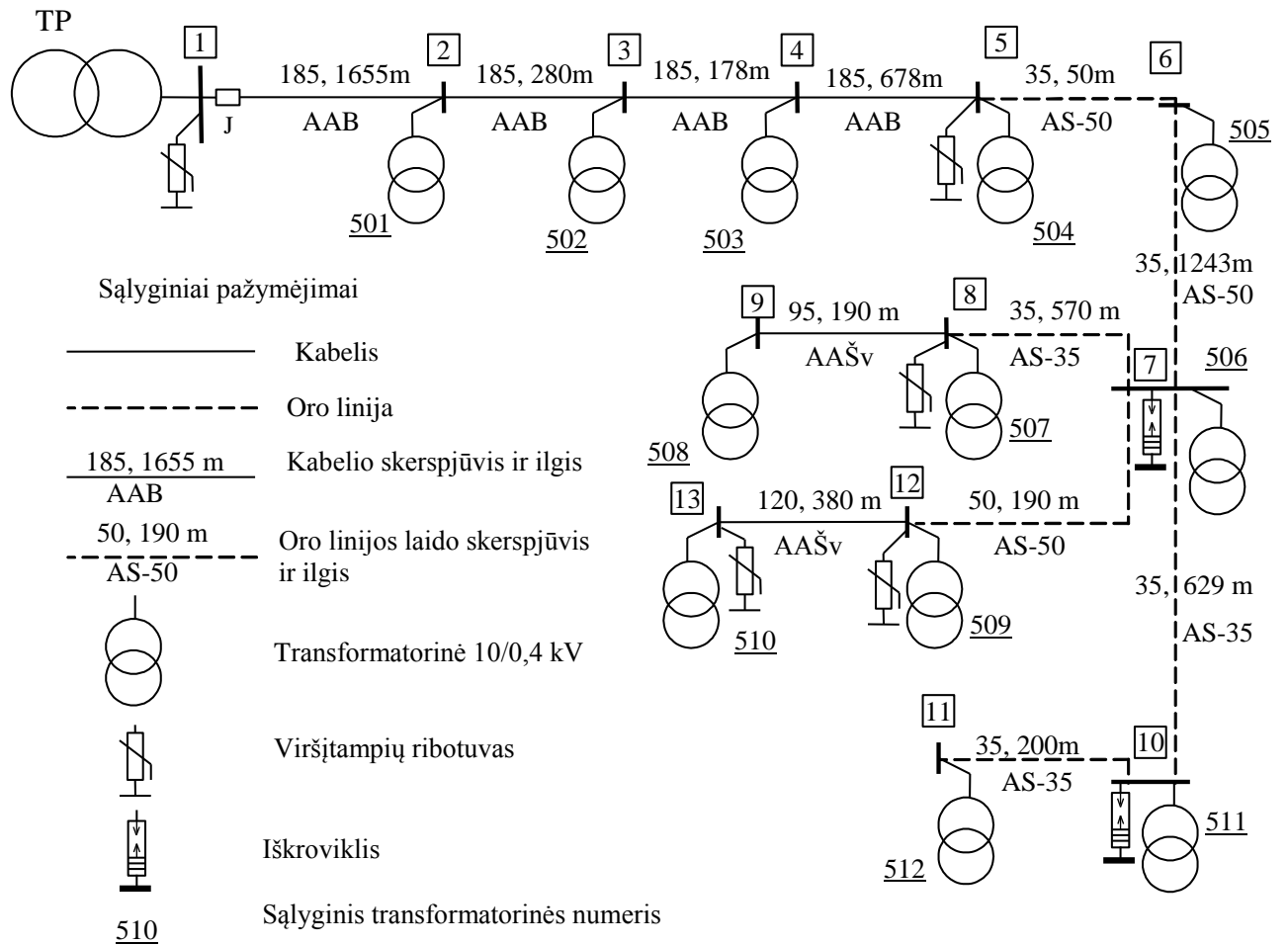
Normalaus režimo metu AKĮ pauzė turi būti ne trumpesnė kaip 1,84 sekundės. Įvertinus galimo įžemėjimo tikimybę AKĮ pauzė Rokiškio TP SP-4 LR-1000 linijai (45 pav.) turi būti ne trumpesnė kaip 2,64 sekundės, kai kabelių ilgis 2,91 km.

6.4. AKĮ pauzės kombinuotame oro ir kabelių tinkle parinkimas

Liekamojo krūvio dydį ir nutekėjimo laiką lemia linijos talpa ir viršįtampių ribotuvų skaičius. Lemiantis veiksnys yra kabelių intarpai oro linijoje. Parenkant AKĮ pauzė turi būti įvertintas kabelių linijų ilgis bei viršįtampių ribotuvų linijoje skaičius. Kaip rodo tyrimo rezultatai, kai liekamasis krūvis sumažėja iki 30 procentų vardinės įtampos, jungimo pereinamojo vyksmo metu viršįtarpiai neviršija leistinojo izoliacijos atsparumo. Linijos modelyje modeliuojant krūvio nutekėjimo vyksmą po linijos atjungimo buvo atliktas modeliavimas keičiant kabelių ilgį linijoje ir viršįtampių ribotuvų skaičių.

Modeliuojant apibendrintame oro linijos su kabelių tarpais modelyje krūvio nutekėjimo vyksmą buvo keičiamas kabelių tarpų skaičius ir ilgis bei viršįtampių ribotuvų skaičius. AKĮ pauzė buvo apskaičiuota įvertinus sąlygas, kai pradinio liekamojo krūvio amplitudė galima didžiausia t. y. linija atjungiamą esant įžemėjimui gretimose galvaniškai sujungto tinklo linijose arba atjungimo momentų atjungiamoje linijoje įžemėjimo vyksmas nutrūksta. Modeliuojant buvo priimta prielaida, kad oro atkarpos linijoje sudaro mažiau, kaip 30 procentų visos linijos ilgio.

Transformatorių pastotės skirstykloje prijungtų kombinuotų oro ir kabelių linijų AKĮ pauzė gali būti parinkta pagal linijos charakteristikas kabelių tarpų ilgį ir prijungtų viršįtampių ribotuvų skaičių.



49 pav. Kombinuotos oro ir kabelių linijos supaprastintos schemos iliustracija

Nustatant trumpiausią AKĮ pauzę linijai turi būti naudojami tik linijoje esantys viršitampių ribotuvai, nes viršitampių ribotuvas esantis 10 kV įtampos skirstykloje (49 pav., 1 mazgas), kai jungtuvas J atsijungia, krūvio nutekėjimo vyksme nedalyvauja kaip ir iškrovikliai esantys linijoje (49 pav., 7 ir 10 mazguose).

Įvertinus iliustracinės schemos duomenis (kabelių ilgį ir viršitampių ribotuvų skaičių (5 lentelė), imant 4 viršitampių ribotuvus ir 4 km ($3,361 < 4$ km) ilgio kabelių eilutę, nustatomas mažiausias AKĮ pauzės laikas 3,66 sekundės.

Tarpinius rezultatus galima nustatyti taikant tiesinę aproksimaciją tarp lentelėje esančių gretimų stulpelių ar eilučių.

4 lentelė. AKĮ pauzės nustatymo iliustracija

Ribotuvų skaičius KL ilgis, [km]	2	4	6	8	10	12	14	16	18
0,5	1,41	0,50	0,32	0,24	0,20	0,17	0,16	0,14	0,13
1	2,76	0,95	0,59	0,44	0,35	0,30	0,26	0,23	0,21
2	5,47	1,86	1,13	0,83	0,65	0,53	0,47	0,41	0,37
4	10,89	3,66	2,22	1,60	1,25	1,04	0,88	0,77	0,69
6	16,31	5,47	3,30	2,37	1,86	1,53	1,30	1,14	1,01
8	21,73	7,28	4,39	3,15	2,46	2,02	1,72	1,50	1,335
10	27,14	9,08	5,47	3,92	3,06	2,51	2,14	1,86	1,64
12	32,55	10,89	6,55	4,69	3,66	3,01	2,55	2,22	1,96
14	37,97	12,69	7,64	5,47	4,26	3,50	2,97	2,58	2,28
16	43,38	14,49	8,72	6,24	4,87	4,00	3,38	2,94	2,60
18	48,80	16,30	9,80	7,01	5,47	4,48	3,80	3,30	2,92
20	54,21	18,10	10,89	7,78	6,07	4,97	4,22	3,66	3,33

Preliminariam AKĮ pauzės parinkimui tarpiniams rezultatams tikslinga imti viršitampių ribotuvų skaičių į mažesnę pusę (pvz. 3 ribotuvai, 2 ribotuvų stulpelis), kabelių ilgį į ilgesnę pusę (pvz. 3,6 km, eilutė 4 km).

Išvados

1. Nustatyti viršįtampių lygį elektros tinkle įtakojantys faktoriai, išanalizuota jų įtaka elektros tinklo patikimumui ir aptartos prielaidos panaudoti automatinį kartotinį įjungimą greitesniam elektros tiekimo atstatymui;
2. Sudarytas skaitmeninis modelis pereinamųjų vyksmų modeliavimui kombinuotame oro ir kabelių linijų 10 kV elektros tinkle bei patikslinti jo parametrai panaudojant natūrinio ekperimento rezultatus.
3. Nustatyta, kad automatinio kartotinio įjungimo pauzė gali būti parinkta pagal linijos kabelių intarpų ilgį ir prijungtų viršįtampių ribotuvų skaičių. Tinkamas automatinio kartotinio įjungimo pauzės parinkimas padidina elektros tinklo patikimumą, sumažindamas viršįtampių lygį elektros tinkle.
4. Parenkant automatinio kartotinio įjungimo pauzę 10 kV įtampos kombinuotose oro ir kabelių linijose turi būti atsižvelgta į tinklo išplėtimo galimybę prijungiant gretimų tinklų linijas bei oro linijų keitimo į kabelines linijas galimybes.

Literatūros sąrašas

1. Baublys J., Jankauskas P., Markevičius L., Morkvėnas A. (2008). *Izoliacija ir Viršįtampiai*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas.
2. Morkvėnas, A. (2008). *Viršįtampių poveikis elektros įrenginių izoliacijos senėjimo procesams*. Kaunas: Technologija.
3. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П. (1973). *Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения*. Москва: Энергия.
4. Semleyn, A. (1981). Contribution to the theory of on lines with frequency dependent parameters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100, 848-856.
5. Semlyen, A., & Huang, W. G. (1986). Corona Modelling for the Calculation of Transients on Transmission Lines. *IEEE Transaction on Power Delivery, PWRD-1(3)*, 228-239.
6. Половой, И. Ф., Михайлов, Ю. А., & Халилов, Ф. Х. (1990). *Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения (2-е изд. перераб. и доп. leid.)*. Ленинград: Энергоатомиздат.
7. Anthony, J. P., & Kenneth, D. S. (1992). *High voltage power equipment engineering*. Indiana Trail Lilburn: The Fairmont Press.
8. Ben, D. K., & Rioual, M. (1995). Calcul des surtensions temporaires impliquant la saturation des transformateurs: modélisation, théorie des bifurcations. *Revue générale de l'électricité(3)*, 51-57.
9. Sabot, D., & Michaud, J. (1995). Concept de coordination de l'isolement de la nouvelle norme CEI 71: définitions et origines. *Revue générale de l'électricité(3)*, 7-15.
10. Gudžius, S., Markevičius, L., & Morkvėnas, A. (1997). Overvoltage analyzer. *VIII International Conference Overvoltages in power – electronic – and computer – engineering* (pp. 49-52). Bialystok: OPECE.
11. Podporkin, G. V., & Sivaev, A. D. (1997). Lightning Impulse Corona Characteristics of Conductors and Bundles. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(4), 1842-1847.
12. Gudžius, S., Markevičius, L., & Morkvėnas, A. (1998). Recursive method to examine electromagnetic transient processes in cable network. *Metody matematyczne W elektroenergetyce MMwEE '98* (p. 235-244). Zakopane: F.H.U. POLDEX.
13. Кучинский Г. С. и др. (1998). *Техника высоких напряжений*. Санкт-Петербург: ПЭИПК.
14. Markevičius, L. A., Morkvėnas, A., & Sučila, V. (2000). Aukštosios įtampos įrenginių būklės kontrolės sistema. *Energetika = Power engineering = Энергетика*, 84-88.
15. Gu, Y. H., & Bollen, M. H. (2000 m. October). Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances. *IEEE detection and localization. Transactions on Power Delivery*, 15(4), p. 1279-1284.
16. Markevičius, L. A., & Morkvėnas, A. (2000). Viršįtampių analizatoriaus skaitmeninis vainikinio išlydžio modelis. *Elektrotechnika: mokslo darbai(24(33))*, p. 81-85.
17. Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2001). *High voltage engineering: fundamentals*. Norfolk: Biddles Ltd.
18. Hugh, M. R. (2001). *High voltage engineering and testing*. Chippenham, Wiltshire: Antody Rowe Ltd.

19. Gudžius, S., Markevičius, L., Morkvėnas, A., & Sučila, V. (2001). Diagnostic monitoring of high voltage equipment. *Energetika un elektrotehnika*, 82-87.
20. Gudžius, S., Markevičius, L., Morkvėnas, A., & Keliauskas, L. (2002). The spot of the transient for the high voltage insulation. *Europe's premier conference on electrical insulation* (p. 39-42). Berlin: The 9th INSUCON International Electrical Insulation Conference.
21. Watson, N., & Arrillaga, J. (2003). *Power System Electromagnetic Transients Simulation*. London: Institution of Engineering and Technology.
22. Dudurych, I. M., & Gallagher, T. J. (2003). EMTP analysis of the lightning performance of a HV transmission line. *IEEE Proc. Generation Transmission Distribution*, 150(4), 501-506.
23. Gudžius, S., Markevičius, L., Morkvėnas, A., Navickas, A., & Stanionienė, R. (2003). The determination of cable line transient characteristics., (p. 309-315). Tampere.
24. Gudžius, S., Markevičius, L. A., Morkvėnas, A., & Markevičius, L. (2005). Application of transient analysis for network state identification. *Overvoltages in Power, Electronic and Computer Engineering. Proceedings of XV International Conference on Electromagnetic Disturbances: EMD' 2005* (p. 329-332). Bialystok - Kaunas: Technnologija.
25. Markevičius, A. L., Gudžius, S., Morkvėnas, A., & Markevičius, L. A. (2005-06-07). *Method of Earth Fault Identification and Location in Three-Phase Electrical Network*.
26. Kezunovic, M., Edris, A., Sevcik, D., Ciufu, J., & Sabouda, A. (2006). Automated Monitoring of Substation Equipment Performance and Maintenance Needs Using Synchronized Sampling. *EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference*. San Diego.
27. Kezunovic, M., Sevcik, D., Lunsfordand, R., & Popovic, T. (2007). Integration of Substation Data. *IEEE Xplore*, 505-510.
28. Song, H., & Kezunovic, M. (2007). A New Analysis Method for Early Detection and Prevention of Cascading Events. *Electric Power Systems Research*, 77(8), 1132-1142.
29. Baublys, J., Jankauskas, P., Markevičius, L. A., & Morkvėnas, A. (2008). *Izoliacija ir viršitampiai*. Kaunas: Technologija.
30. Borghetti, A., Bosetti, M., Di Silvestro, M., Nucci, C. A., & Paolone, M. (2008). Continuous-Wavelet Transform for Fault Location in Distribution Power Networks: Definition of Mother Wavelets Inferred From Fault Originated Transients. *Power Systems, IEEE Transactions*, 380-388.
31. Ram, P., Kishore, K. R., Anjaneyulu, K. S., & Murali, T. K. (2009). A New Technique & Fast Algorithm in Classifying Transmission Line Faults Using Wavelet Transforms. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 176-179.
32. Juan, A. (2010). *Power system transients: parameter determination*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
33. Gudžius, S., Markevičius, L. A., Morkvėnas, A., & Markevičius, L. (2010). Analysis of fast electromagnetic processes in overhead distribution lines. *Proceedings of the XX International Conference on Electromagnetic Disturbances EMD 2010* (p. 183-186). Kaunas: Technologija.
34. Gudžius, S., Markevičius, L. A., & Morkvėnas, A. (2011). Characteristics of fault detection system for smart grid distribution network. *Elektronika ir elektrotehnika = Electronics and Electrical Engineering*(6(112)), p. 123-126.

35. Kale, V. S., Bhide, S. R., & Bedekar, P. P. (2011). Faulted Phase Selection Based on Wavelet Analysis of Travelling Waves. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 3(3), 421-425.
36. Sakauskaitė, D., Gudžius, S., & Morkvėnas, A. (2012). The analysis of the overvoltages protection development and their characteristics influence on the overvoltages level. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(7b), p. 186-188.
37. Ming-Ta, Y., Jyh-Cherng, G., Po-Chun, L., Yen-Lin, H., Chun-Wei, H., & Jin-Lung, G. (2013). Interoperability and Performance Analysis of IEC61850 Based Substation Protection System. *International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering*, 7(8), 497-504.
38. Christauskas, Č., Gudžius, S., Morkvėnas, A., & Tička, V. (2015). Fault identification systems by characteristics of smart grid. *Study of problems in modern science: new technologies in engineering, advanced management, efficiency of social institutions*, 389-404.
39. Svinkūnas G., Navickas A. (2011). *Elektros energetikos pagrindai*. Kaunas: Technologija.