

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

LINAS MARKEVIČIUS

GEDIMO VIENOJE ELEKTROS
SKIRSTOMOJO TINKLO FAZÈJE
ATPAŽINIMO TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (06T)

2016, Kaunas

UDK 621.316(043.3)

Disertacija rengta 2008–2016 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakultete.

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas:

Prof. dr. Saulius GUDŽIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Kalbos redaktorė

Inga Nanartonytė

PADĖKA

Ši disertacija parašyta vieno autoriaus vardu, tačiau ji yra bendro darbo su kitais mokslui atsidavusiais, rūpestingais ir stropiais žmonėmis rezultatas.

Už ne vienus metus teiktas vertingas mokslines konsultacijas, nuolatinį skatinimą tobulėti noriu iš visos širdies padėkoti prof. habil. dr. Linui Androniui Markevičiui – savo dėdei ir pirmajam moksliniam vadovui. Be jo pagalbos ir padrąsinimo ši disertacija nebūtų buvusi parašyta.

Moksliniam konsultantui prof. dr. Sauliui Gudžiui esu dėkingas už bendradarbiavimą ir kantrybę, disertacijos recenzentams už jų konstruktyvias pastabas, patarimus ir vertingus pasiūlymus.

Dėkoju visiems, kurie tiesiogiai ir netiesiogiai padėjo parengti ir išspausdinti disertacijos ir jos santraukos tekstus.

Linus Markevičius

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	5
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	8
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	10
1. GEDIMŲ VIENOJE ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO FAZĖJE ATPAŽINIMO TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA	14
1.1. Technologijos, paremtos registruotų parametrų analize	15
1.1.1. Technologijos, paremtos tinklo pramoninio dažnio parametrų analize	15
1.1.2. Aukštojo dažnio dedamosios, pereinamųjų vyksmų analizė.....	24
1.2. Vyksmų modeliavimas teorine analize pagrįstais metodais	40
1.3. Pirmojo skyriaus analizės rezultatų apibendrinimas	42
1.4. Autoriaus indėlis	42
2. DARBO METODIKA. GREITŲJŲ ELEKTROMAGNETINIŲ VYKSMŲ MODELIŲ GEDIMO VIENOJE FAZĖJE VIETAI NUSTATYTI TYRIMAS	44
2.1. Elektros oro linijos greitųjų elektromagnetinių vyksmų modelio parametrai	44
2.2. Oro linijos greitųjų vyksmų modelio struktūra	52
2.2.1. Banginių linijos varžų kaita	52
2.2.2. Elektromagnetinių bangų sklidimo charakteristikų kaita.....	56
2.2.3. Elektros linijos modelio lygtys.....	63
2.3. Pagrindiniai skyriaus rezultatai.....	66
3. TYRIMŲ REZULTATAI. GEDIMO VIENOJE FAZĖJE VIETOS SUDĖTINGOS KONFIGŪRACIJOS ELEKTROS TINKLE GREITO NUSTATYMO MODELIAI IR JŲ PRAKTINIS TAIKYMAS	68
3.1. Sudėtingo skirstomojo tinklo linijų greitųjų vyksmų modelis	68
3.2. Linijos transpozicijos modelis	71
3.3. Talpinis mazgo modelis	71
3.4. Vienos fazės susijungimo su įžemintu objektu mazgo modelis	72
3.5. Linijos, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, nustatymas ir linijos elektromagnetinių parametrų fazėse nevienodumo įtaka.....	74
3.6. Atstumo iki gedimo vietos nustatymo galimybių tyrimas.....	77
3.7. Vienos fazės gedimo vietos skirstomajame tinkle nustatymo struktūra.	82
3.8. Pagrindiniai skyriaus rezultatai.....	83
IŠVADOS.....	84
LITERATŪRA	85
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	91
TARPTAUTINĖSE DUOMENŲ BAZĖSE ESANČIUOSE MOKSLO LEIDINIUOSE PASKELBTI STRAIPSNIAI	91
PRIEDAS	93

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Gedimų vienoje skirstomojo tinklo fazėje atpažinimo technologijų klasifikacija [9].....	14
1.2 pav. Duomenų mainai, vykdomi taikant pramoninio dažnio analize paremtą technologiją [13].....	16
1.3 pav. Tinklo schema: matuojama linijoje, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje [23]	18
1.4 pav. Gedimo kabelyje skaičiuojamoji tiesioginės sekos schema [23].....	19
1.5 pav. Linijos narvelio skaičiuojamoji schema [23]	20
1.6 pav. Principinė spindulinio tinklo schema su gedimo vieta F , trumpojo susijungimo įtampos ir srovės mazguose F ir N [23]	22
1.7 pav. Sklindančių ir atsispindėjusių elektromagnetinių bangų tinklelio schema [42]	24
1.8 pav. Gedimų registratoriaus blokinė struktūra [45]	25
1.9 pav. Bangelių ir Furjė transformacijų pagrindinių funkcijų dažninė laiko charakteristika [48].....	27
1.10 pav. Skirstomojo tinklo, kurio bendras linijų ilgis 251 km, schema [57]	29
1.11 pav. DBT gedimo atpažinimo technologija [57].....	30
1.12 pav. Modeliavimui PSCAD / EMTDC programine įranga panaudota spindulinio tinklo principinė schema [42]	31
1.13 pav. Fazės, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje 2,5 km ir 3,4 km atstumu nuo mazgo A , srovės kreivės [42].....	33
1.14 pav. Fazės, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje 3 km (A), 3,5 km (B), 4 km (C) ir 4,5 km (D) atstumu nuo mazgo A , srovės kreivės [42].....	35
1.15 pav. Užregistruoti eksperimentiniai (dešinėje) ir apskaičiuoti įtampos signalai ir jų dažniniai spektrai [59]	37
1.16 pav. Užregistruotas eksperimentinis nulinės sekos srovės signalas ir jo dažninis spektras [59]	37
1.17 pav. Spindulinio trifazio skirstomojo tinklo skaičiuojamoji schema ir supaprastinta ekvivalentinė schema [59].....	38
1.18 pav. Apskaičiuota pirmojo įtampos išvestinės maksimumo priklausomybė nuo gedimo vienoje fazėje vietos [59].....	39
1.19 pav. Modelyje apskaičiuotų (A) ir eksperimentinių (B) pereinamųjų vyksmų įtampų aproksimacija [59]	40
1.20 pav. Daugiasluoksnio perceptrono struktūra [73]	41
1.21 pav. Supaprastinta gedimo vienoje fazėje atpažinimo blokinė struktūra	41
2.1 pav. Sklidimo pastoviųjų matricos diagonalizavimo procentinių paklaidų priklausomybė nuo grunto varžos.....	50
2.2 pav. Linijos laidų išdėstymas: a) lygiagrečiai su žeme; b) lygiašonio trikampio forma; c) įvairiakračio trikampio forma.....	50
2.3 pav. Sekų banguotės varžos realiosios dalies priklausomybė nuo dažnio; 1-oji 3-iosios sekos kreivė – linijoje laidai išdėstyti lygiašonių trikampiu, 2-oji 3-iosios sekos kreivė – linijoje laidai išdėstyti lygiagrečiai su žemės paviršiumi	54

2.4 pav. Banginių varžų kitimo laiko intervale charakteristika, kai laidai linijoje išdėstyti lygiašonių trikampių	55
2.5 pav. Banginių varžų kitimo laiko intervale charakteristika, kai laidai linijoje išdėstyti lygiagrečiai su žemės paviršiumi	55
2.6 pav. Laidų pilnutinės varžos dedamųjų priklausomybė nuo dažnio kreivės	57
2.7 pav. Laidų pirmųjų sekų pilnutinės varžos priklausomybė nuo dažnio kreivės	58
2.8 pav. Vienišo 5 km laido dažnių amplitudės ($AmpG$) ir menamosios (ImG) funkcijų priklausomybės nuo dažnio grafikai	59
2.9 pav. Elektromagnetinių bangų dažninės amplitudės charakteristikos linijoje su lygiagrečiai su žemės paviršiumi išdėstytais laidais	59
2.10 pav. Elektromagnetinių bangų dažninės amplitudės charakteristikos linijoje su trikampių išdėstytais laidais	60
2.11 pav. Laido 1-osios sekos pilnutinės varžos priklausomybė nuo grunto savitosios varžos ir laido aukščio virš žemės	61
2.12 pav. Ekvivalentinio aukščio radimas	62
2.13 pav. Linijoje plintančios elektromagnetinės bangos dažninės amplitudės charakteristikos esant skirtingam laido aukščiui	62
2.14 pav. Pereinamųjų charakteristikų kreivės linijoje su lygiagrečiai su žemės paviršiumi išdėstytais laidais	63
2.15 pav. Pereinamųjų charakteristikų kreivės linijoje su trikampių išdėstytais laidais	64
2.16 pav. Į linijos pradžią atplitusių įtampos bangų kitimo kreivės	65
2.17 pav. Į linijos pradžią atplitusių įtampos bangų kitimo kreivės	66
3.1 pav. Įtampos frontų ($v = r, s, o$) sekose kitimo kreivės	72
3.2 pav. Pradinės įtampos linijos fazėse kreivės tuoj po 1-ojo kraštinio laido susijungimo su įžemintu objektu per varžą R ; 2-oji ir 3-ioji kreivės – kitų dviejų fazių pradinės įtampos	73
3.3 pav. Pradinio vyksmo registracijos rezultatai po linijos vienos fazės susijungimo su įžemintu objektu. 1–2 – įtampos maitinančios skirstyklos šynose, 3–5 – srovės pažeistoje linijoje, 6 – nulinės sekos įtampa sveikoje linijoje. Pateikti registracijų santykiniai dydžiai	75
3.4 pav. Srovės fazėje A (i_A) ir nuliniame kanale (i_0) pradinio atplitusių elektromagnetinių bangų vyksmo metu po laido fazėje A susijungimo su įžemintu objektu. Susijungimas už 600 metrų nuo skirstyklos	76
3.5 pav. Nulinės sekos elektromagnetinės bangos fronto trukmės parametro radimas	78
3.6 pav. Nulinės sekos elektromagnetinės bangos fronto trukmės parametro priklausomybė nuo žemės grunto savitosios varžos ir bangos kelio 15 kV linijos trasoje ilgio	79
3.7 pav. Nulinės sekos krintančiosios bangos pradžios nustatymas	79
3.8 pav. Bangos fronto trukmės priklausomybė nuo linijos laidų aukščio	80
3.9 pav. Statistinio modeliavimo principinė skaičiuojamoji skirstomojo tinklo linijos schema	81
3.10 pav. Nulinės sekos elektromagnetinės bangos fronto trukmės parametro histograma	81

3.11 pav. Atstumo iki gedimo vietos nuokrypio nuo skaičiuojamojo tikėtino atstumo histograma 82

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Apskaičiuotos atstumų nuo PI iki kitų kreivių pikų reikšmės [42]	34
1.2 lentelė. Kryžminės koreliacijos koeficientas esant gedimui vienoje fazėje 3,4 km atstumu nuo registracijos vietos [42]	35
2.1 lentelė. Matricų N_L normos priklausomybė nuo vyksmo dažnio	48
2.2 lentelė. Sklidimo pastoviųjų matricos diagonalizavimo procentinės paklaidos .	51
2.3 lentelė. Banginių varžų matricos diagonalizavimo procentinės paklaidos	51
2.4 lentelė. Banginių varžų matricos diagonalizavimo procentinės paklaidos dėl menamosios dalies ignoravimo	52
2.5 lentelė. Banginių varžų diagonaliosios matricos skaičiavimo rezultatų procentinės paklaidos	53
2.6 lentelė. Banginės varžos kanale su žeme (3-iosios sekos) priklausomybė nuo grunto savitosios varžos ir aukščio virš žemės	60
3.1 lentelė. Srovių ir įtampų pervedimo į kanonizuotas koordinates transformacinės matricos.....	70
3.2 lentelė. Transpozicijos rūšį nustatanti matrica.....	71

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

ATP / EMTP (*Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program*) – skaitmeninio pereinamųjų vyksmų modeliavimo programų sistema;

DBT (*Discrete Wavelet Transform, DWT*) – diskrečioji bangelinė transformacija;

DFT (*Discrete Fourier Transform*) – diskrečioji Furjė transformacija;

DMS (*Distribution Management System*) – skirstomojo tinklo valdymo sistema;

FLISR (*Fault Location Isolation and Service Restoration*) – gedimo vietos nustatymas ir energijos tiekimo paslaugos atkūrimas;

MATLAB – programinės įrangos matematiniais algoritmais sudaryti, duomenims analizuoti, vizualizacijai ir skaitmeniniams skaičiavimams atlikti pavadinimas;

PSCAD / EMTDC – programinės įrangos elektromagnetiniams pereinamiesiems vyksmams analizuoti pavadinimas;

SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) – elektros tinklo dispečerinio valdymo sistema.

ĮVADAS

Darbo aktualumas

Daugiausia dėmesio elektros energijos perdavimo patikimumui bei kokybei užtikrinti buvo skiriama elektros perdavimo tinklams, juose įdiegiant procesams valdyti ir kontroliuoti skirtas pažangiąsias technologines ir programines įrangas.

Atsiradus naujų prioritetų aplinkos apsaugos srityje, elektros energijos gamybą imta plėtoti naudojant atsinaujinančius energijos išteklius, tokius kaip vėjas, saulė, biomasė ir kt. Taigi elektros energijos pramonėje prioritetai neišvengiamai kinta: nuo didelės galios jėgainių ir elektros energijos perdavimo tinklų pereinama prie skirstomajam tinklui elektrą gaminančių generatorių, naudojančių atsinaujinančius energijos išteklius.

Prie skirstomųjų tinklų prijungti generatoriai gamina vis daugiau energijos, todėl tinklų segmentai gali tapti mažomis energetinėmis salomis, sujungtomis į bendrus skirstomuosius tinklus, taip pat gali dirbti kaip nepriklausomi mini skirstomieji tinklai, neprijungti prie bendrų skirstomųjų tinklų. Skirstomųjų tinklų dinamiškumas, įvairios kainodaros alternatyvos, siekis sumažinti elektros energijos sąnaudas, patikimumo ir veiklos sąnaudų optimizavimas, paklausos ir pasiūlos subalansavimas – tai nauji skirstomųjų tinklų valdymo iššūkiai ir būtinybės padiktuota paskata diegti modernias technologijas, skirtas saugiams skirstomiesiems tinklams pertvarkyti ir išlaikyti.

Kuriama ir nuolat tobulinama skirstomųjų tinklų valdymo sistema (DMS) modeliuoja ir realiuoju laiku valdo ne statinį ar subalansuotą, koks yra perdavimo tinklas, elektros tinklą, o spindulinius, nedarnius skirstomuosius tinklus su sparčiai besikeičiančia topologija, pasiūla bei paklausa ir nesinchronizuotai registruojamais duomenimis.

DMS turi gebėti įvertinti ir techninius skirstomųjų tinklų aspektus, tokius kaip laidininkų tipų bei transformatorių įvairovė, skyriklių (vietinio ar distancinio valdymo) galimas poveikis tinklų konfigūracijai, kitų nuolat ar laikinai prijungtų įtaisų, naudojamų skirstymo sistemos operatyviniame darbe, poveikis, taip, kad būtų nustatytas geriausias būdas aprūpinti elektros energija kiekvieną atskirą prie skirstomųjų tinklų prijungtą vartotoją.

Viena iš pagrindinių DMS funkcijų yra greitas pažeistos skirstomojo tinklo vietos aptikimas, gedimo nustatymas ir energijos tiekimo paslaugos atkūrimas per kiek galima trumpesnę laiką (FLISR). Ši funkcija apima gedimų skirstomajame tinkle suradimą (remiantis telemetrijos duomenimis ir jų analize) ir siūlo remiantis dinamine tinklo būseną suklasifikuotų tinklo perkomutavimo variantų (nustatant prioritetus, apkrovas, bendrus vartotojus ir t. t.) bei atveria galimybių skirstomajam tinklui veikti kaip savarankiškai atsikuriančiai (angl. *self-healing*) sistemai su automatine skirstomojo elektros tinklo rekonfigūracija.

Net ir pasitelkus įvairius šiuolaikinius algoritmus naudojančius metodus, heuristines ir ekspertines sistemas, vienas iš sudėtingiausių FLISR uždavinių yra greitas gedimų vienoje skirstomojo elektros tinklo fazėje atpažinimas. Specifiniai skirstomojo tinklo ir besikeičiantys apkrovos parametrai, gedimo vietos parametrai

neapibrėžtumas, dispečerinio valdymo selektyvumas ir netikrumas sukuria sutrikimų, apribojimų ir lemia klaidingą atpažinimą.

Dėl didelio kiekio reikalingų išeities parametrų, būtino tų parametrų matavimo ir perdavimo tikslumo, registracijos sinchroniškumo, ilgai trunkančio duomenų apdorojimo nėra vienas išsamiai literatūroje aprašytas gedimų vienoje fazėje atpažinimo metodas platesnio praktinio pritaikymo nesulaukė. Skaičiuojamojo elektros tinklo supaprastinimas atsiribojant nuo išorinės elektros tinklo struktūros, elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų didelio diskrečiojo dažnio registracija, panaikinanti atpažinimo uždavinio netiesiškumą, įvairių tinklo parametrų optimizacija leistų išspręsti gedimo vienoje fazėje atpažinimo bei to gedimo vietos nustatymo uždavinį.

Darbo tikslas

Taikant greitųjų elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų modeliavimo technologiją, supaprastinti skaičiuojamąją elektros skirstomojo tinklo schemą ir sukurti modelius, kurie leistų adaptuoti ir optimizuoti elektros tinklo schemas elementų parametrus, turinčius įtakos gedimo vietos vienoje fazėje greito nustatymo patikimumui, bei leistų nustatyti gedimo vietą vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti pagrindinių metodikų ir technologijų, skirtų gedimams vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje atpažinti, tyrimą.
2. Atlikti greitųjų elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų, kuriuos sukėlė gedimas vienoje elektros oro linijos fazėje, pradinio momento modelio parametrų tyrimą.
3. Sukurti gedimo sudėtingos elektros oro linijos vienoje fazėje sukeltų greitųjų elektromagnetinių vyksmų supaprastintą modelį.
4. Sukurti gedimo vietos vienoje elektros skirstomojo tinklo linijos fazėje mazgo modelį.
5. Sukurti gedimo vietos vienoje elektros skirstomojo tinklo linijos fazėje greitųjų elektromagnetinių vyksmų modelių struktūras, kurias būtų galima taikyti sprendžiant gedimo vietos vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje nustatymo uždavinį.

Darbo objektas

Gedimai vienoje vidutinės įtampos elektros skirstomųjų tinklų su izoliuotąja ar kompensuotąja neutrале fazėje, gedimų sukeltų pereinamųjų elektromagnetinių vyksmų ir plintančių elektromagnetinių bangų parametrų tyrimas ir įvertinimas.

Mokslinis naujumas

Išplėtoti vienos fazės gedimo (susijungimo su įžemintu objektu) sukeltų elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų pradinio momento analizės metodai leido sukurti pirminių elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų analizės metodiką, kurią

taikant galima greitai ir tiksliai nustatyti gedimo sudėtingo skirstomojo elektros tinklo linijoje vietą.

Praktinė vertė

Taikant pirmųjų pereinamųjų vyksmų analizės metodiką galima daug tiksliau įvertinti gedimo sukeltus pereinamuosius vyksmus skirstomajame elektros tinkle, greitai ir tiksliai nustatyti elektros skirstomojo tinklo liniją, kurioje įvyko gedimas, bei nustatyti gedimo vietą vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje.

Aprašyti gedimo vietos vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje nustatymo modeliai yra dalis technologijos, kuri gali būti pritaikyta praktiniam gedimo vietos elektros paskirstymo sistemose nustatymui. Lietuvos skirstomuosiuose elektros tinkluose ši technologija sudaro sumontuotų eksperimentinių gedimo vietos nustatymo prietaisų programinės įrangos algoritmo pagrindą. Galimybė greitai atpažinti gedimą vienoje fazėje padidina elektros skirstomojo tinklo sistemos darbo patikimumą ir sumažina elektros tinklo eksploatacijos sąnaudas. Disertacijoje aprašytu elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų atpažinimo metodo pagrindu yra patentuotas išradimas [88, 89].

Ginamieji disertacijos teiginiai

1. Greitųjų elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų, kuriuos sukėlė gedimas vienoje elektros oro linijos fazėje, pradinio momento modelio parametruose atsispindi greičiau ir lėčiau gęstantys procesai. Šių procesų charakteristikų modeliavimas leidžia skaičiuojant optimizuoti banginius linijos parametrus, įvertinti netiesinių elektros tinklo parametrų įtaką.
2. Remiantis greitųjų elektromagnetinių vyksmų pradinio momento modeliavimo technologija galima:
 - sukurti supaprastintą sudėtingos konfigūracijos elektros oro linijos modelį,
 - sudaryti vietas, kurioje įvyko gedimas vienoje elektros skirstomojo tinklo linijos fazėje, mazgo modelį.
3. Gedimo vienoje skirstomojo tinklo linijos fazėje sukeltų greitųjų elektromagnetinių vyksmų pradinio momento charakteristikų analizės pagrindu galima sukurti modelių struktūras, leidžiančias įvertinti gedimo pažeistos linijos ir gedimo vietos parametrus bei rasti sprendinius atstumui iki gedimo vietos nustatyti.

Darbo apibavimas

Disertacijoje išdėstyta medžiaga yra paskelbta 9 mokslinėse publikacijose: 7 straipsniai tarptautinėse mokslinėse konferencijose (1 straipsnis įtrauktas į „ISI Web of Science“ duomenų bazę), 6 straipsniai įtraukti į kitų tarptautinių duomenų bazių leidinius. 5 pranešimai perskaityti tarptautinėse mokslinėse konferencijose. 3 straipsniai yra paskelbti recenzuojamuose mokslo konferencijų pranešimų leidiniuose. Užpatentuotas 1 tarptautinis išradimas.

Disertacijos struktūra

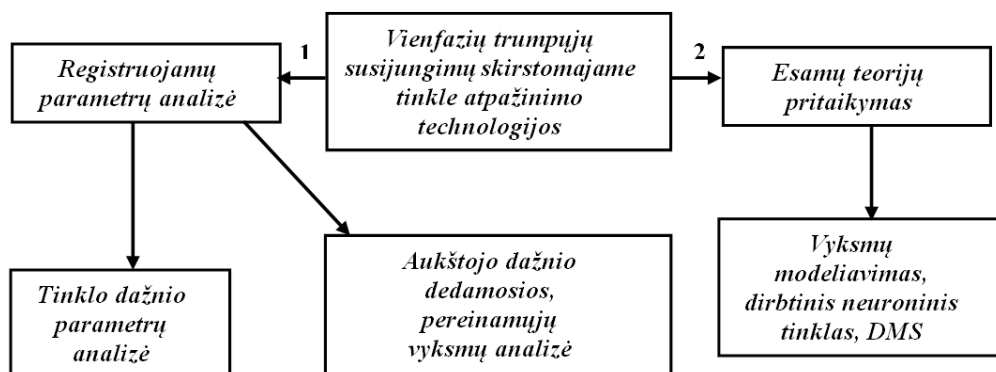
Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, išvados, literatūros sąrašas ir priedas. Darbo apimtis – 98 puslapiai. Darbe yra 59 paveikslai, 10 lentelių. Naudotos literatūros sąrašą sudaro 87 šaltinių pavadinimai.

1. GEDIMŲ VIENOJE ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO FAZĖJE ATPAŽINIMO TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA

Trumpieji vienos fazės susijungimai su žeme ar įžemintu objektu yra dažniausi vienos fazės gedimai perdavimo ir skirstomuosiuose elektros tinkluose. Gedimo vienoje elektros skirstomojo tinklo linijos fazėje poveikis priklauso nuo elektros tinklo įžeminimo tipo. Siekiant padidinti elektros energijos perdavimo skirstomuosiuose tinkluose patikimumą, elektros tinklas įžeminamas panaudojant kompensacines rites, o tai gerokai sumažina gedimo vienoje fazėje srovę, todėl greitas maitinimo linijos, kurioje įvyko gedimas, atjungimas nėra būtinas [1]. Tačiau sumažėjusi gedimo metu atsiradusi srovė bei jos nepriklausomumas nuo gedimo vietos labai apsunkina gedimo nustatymą ir lokalizavimą. Gedimų vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje nustatymas tampa svarbiu uždaviniu, ypač pastaruosiu metu, kai skirstomųjų elektros tinklų bendrovės dėl atsivėrusios rinkos bei konkurencijos, elektros skirstymo sąnaudų įtakos verslui pradėjo kreipti dėmesį į tai, kaip technologiškai efektyviau ir ekonomiškiau užtikrinti elektros paskirstymo patikimumą ir kokybę [2–5].

Perdavimo tinkle yra pasiektas aukštas gedimų vienoje fazėje atpažinimo uždavinių sprendimo technologinis lygis, tačiau publikacijų, autoriinių darbų, pasiūlytų technologijų, skirtų gedimų vienoje fazėje praktiniam atpažinimui skirstomajame elektros tinkle, nėra daug [6, 7]. Tradiciškai elektros skirstomuosiuose tinkluose gedimai vienoje fazėje buvo ir tebėra aptinkami klaidų-bandymų metodu, stengiantis rasti tą gedimą atjungiant ir prijungiant maitinimo linijas, o gedimas aptinkamas po kelių tokių atjungimų ir prijungimų. Toks atpažinimas priklauso nuo operatyvinės brigados darbo efektyvumo, tačiau dažnai sukelia naujų avarinių gedimų kitose linijose.

Nuo 1990 metų daugiau dėmesio imta skirti moksliniam gedimų vienoje fazėje skirstomajame elektros tinkle atpažinimo tyrinėjimui [8]. Tyrimai buvo plėtojami dviem kryptimis (1.1 pav.).



1.1 pav. Gedimų vienoje skirstomojo tinklo fazėje atpažinimo technologijų klasifikacija [9]

Toliau apžvelgiamos abiejų kryptių vienos fazės gedimo atpažinimo technologijos, jų pranašumai ir trūkumai.

1.1. Technologijos, paremtos registruotų parametru analize

Sparčiai vystantis mikroprocesorinėms technologijoms, panaudojant aukštojo dažnio komponentus labiausiai pažengė registruojamų parametru analize paremtos atpažinimo technologijos [10].

1.1.1. Technologijos, paremtos tinklo pramoninio dažnio parametru analize

Gedimų vienoje fazėje perdavimo tinkle atpažinimas paremtas išmatuotų ir apskaičiuotų įtampos ir srovės verčių palyginimu [11, 12]. Panašus metodas imtas taikyti ir skirstomajam tinklui [13]. Imamos linijos, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje, narvelio mazginio taško srovės ir įtampos vektorinės reikšmės prieš gedimą, įvykus gedimui ir sudaromos lygtys panaudojant simetrinės sistemos komponentus. Kad pasiūlyta technologija tiktų trifazei sistemai su vienfazėmis ar dvifazėmis linijų atšakomis, visos lygtys su simetriniais komponentais buvo pakeistos fazinėmis lygtimis. 1.2 pav. pavaizduota, kaip taikant šią atpažinimo technologiją vyksta duomenų mainai.

Gedimui vienoje skirstomojo elektros tinklo fazėje atpažinti naudojamas algoritmas yra paremtas šiomis prielaidomis:

- kiekvienas pastotės linijos narvelis turi elektroninį įrašomąjį srovių ir įtampų prieš gedimą ir įvykus gedimui matavimo įtaisą, kurio atminties pakanka gedimui vienoje fazėje atpažinti. Pramoninio dažnio srovės ir įtampos kampams surasti iš išmatuotų ir užregistruotų signalų naudojama duomenų lango vieno ciklo Furjė transformacija;

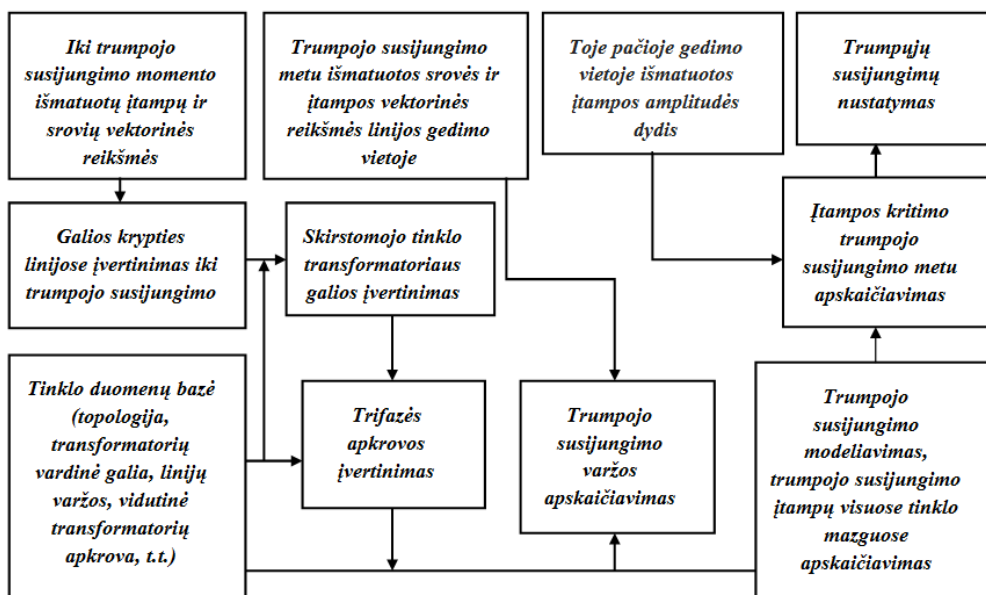
- gedimų vienoje fazėje atpažinimo tikslumas priklauso nuo to, kuriame linijos narvelio taške bus matuojama įtampa. Optimizuojamas įtampų matavimo vietų parinkimas [14];

- įvertinami pastotėse išmatuotų srovių ir įtampų kampų dydžiai iki gedimo. Pastotės linijos narvelio mazge apskaičiuota galia apima ir suminius linijos nuostolius. Atpažinimo tikslumas tiesiogiai priklauso nuo tų nuostolių dydžio;

- informacijai perduoti naudojama atitinkamos apimties ryšio sistema, išmatuotas reikšmes siunčianti į skaičiavimus atliekantį kompiuterį [13]. Įtampos efektinės reikšmės apskaičiuojamos pagal (1) lygtį [13]:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_i^2}; \quad (1)$$

čia V_i – įtampos momentinės reikšmės; n – išmatuotų reikšmių kiekis.



1.2 pav. Duomenų mainai, vykdomi taikant pramoninio dažnio analize paremtą technologiją [13]

- didelę įtaką atpažinimo tikslumui turi skirstomojo tinklo transformatorių apkrovos gedimo metu įvertinimas. Taikant pramoninio dažnio parametru analizės technologiją linijos narvelio skirstomojo tinklo transformatoriaus apkrova įvertinama atsižvelgiant į transformatoriaus nominaliąją galią, apskaičiuotą prieš įvykstant gedimui, vidutinę apkrovos galią, matavimus, kurie periodiškai atliekami energetikos bendrovėse. Taigi skirstomojo tinklo bet kurio i -ojo transformatoriaus kompleksinė galia apskaičiuojama pagal (2) lygtį [13]:

$$\underline{S}_i = \left(\beta_i S_{N,i}^{Nom} \cdot \frac{S_{mat,TP}^{SS}}{\sum_{k=1}^{nl} \beta_k S_{N,k}^{Nom}} \right) \cdot (\cos \varphi_{TP} + j \cdot \sin \varphi_{TP}); \quad (2)$$

čia $S_{N,i}^{Nom}$ ir $S_{N,k}^{Nom}$ – vardinės i -ojo ir k -ojo transformatoriaus galios; $S_{mat,TP}^{SS}$ – išmatuota pilnutinė apkrova transformatorių pastotėje; $\cos \varphi_{TP}$ – galios faktorius pastotėje; nl – maitinimo linijoje esančių transformatorių kiekis; β_i ir β_k – vidutinės i -ojo ir k -ojo transformatoriaus apkrovos faktoriai;

- srautų pasiskirstymas apskaičiuojamas panaudojant ATP programinę įrangą [15];

- gedimo vienoje fazėje vietos varža apskaičiuojama taikant įvairias metodikas [16–21];

- gedimas vienoje fazėje modeliuojamas ir įtampa matavimo mazguose apskaičiuojama panaudojant ATP programinę įrangą. Išmatuotų ir apskaičiuotų įtampos verčių neatitikimas išreiškiamas:

$$\delta_i = \left| V_{mat,i}^i - V_{apsk,i,j}^{i,j} \right|; \quad (3)$$

čia $V_{mat,i}^i$ – mazge i išmatuota įtampos reikšmė; $V_{aprk,i,j}^{i,j}$ – mazge i apskaičiuota įtampos reikšmė, kai gedimas įvykęs mazge j ;

- pažeisto mazgo nustatymas paremtas δ_i dydžio visuose matuojamuose tinklo mazguose analize. Mazgo, kuriame įvyko gedimas, δ_i dydžiai turi būti vienodi. Tada mazgas, kuriame įvyko gedimas, nustatomas pagal šią lygtį [13]:

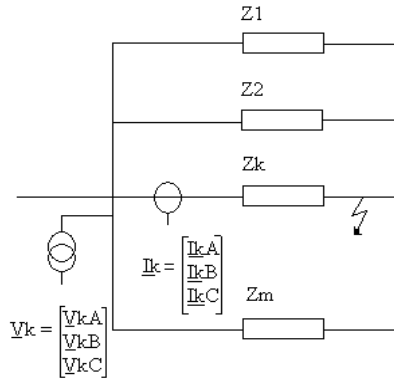
$$fb = \min_j \{ \max\{\delta_i\} - \min\{\delta_i\} \},$$
$$i = 1, \dots, nm,$$
$$j = 1, \dots, nb;$$
(4)

čia nm – mazgų, kuriuose matuojama, skaičius; nb – maitinimo linijos bendras mazgų skaičius.

Taigi linijos narvelio įtampų analizės technologija gali būti naudojama kaip skaičiuojamoji priemonė gedimams vienoje skirstomojo elektros tinklo fazėje modeliuoti ir tyrinėti. Nors matavimams galima panaudoti tinkle jau sumontuotus energijos kokybę kontroliuojančius įtaisus, ši technologija visiškai tiksliai neatpažins gedimo vienoje skirstomojo elektros tinklo fazėje:

- matavimais nustatomas tik gedimo mazgas, tačiau vieta tarp mazgų, kur dažniausiai įvyksta gedimų, nenustatoma;
- metodas taikomas skirstomajame tinkle, kuriame yra tik oro linijos, o pastočių maitinimo linijų konfigūracija tik su oro linijomis pasitaiko retai;
- technologija brangi, nes ten, kur nėra energijos kokybę kontroliuojančių įtaisų, vieno linijos narvelio atšakose turi būti sumontuoti mažiausiai du papildomi matavimo prietaisai su ryšio aparatūra, o ir tikslumas priklauso nuo matavimo įtaisų skaičiaus linijoje;
- reikia papildomos – informacijos surinkimo ir apdorojimo – programinės įrangos bei kitų, pvz., ATP / EMTP, programinių įrangų [22];
- būtina išsami informacija apie linijos narvelio atšakų konfigūraciją;
- pramoninio dažnio parametrų analizė galima tik neizoliuotajame ar nekompensuotajame skirstomajame elektros tinkle.

Sahas (Saha) algoritmu paremtos technologijos. Sahos algoritmo metodas [23–26] dažniausiai taikomas spinduliniam skirstomajam tinklui ir paremtas linijos narvelio įtampos bei srovės matavimais prieš gedimą ir jam įvykus. Gali būti matuojama ir skirstomojo transformatoriaus srovė, tačiau pastotėje matavimai turi būti registruojami centralizuotu gedimų registratoriumi. Gedimas vienoje fazėje atpažįstamas topologiniu principu. Pats atpažinimo procesas suskirstytas į du etapus. Iš pradžių apskaičiuojama gedimo vienoje fazėje grandinės varža, remiantis įtampos ir srovės matavimais prieš gedimą ir jam įvykus. Toliau apskaičiuojamos kiekvienos linijos sekcijos varžos atskirai, įvertinant, kad toje sekcijoje įvyko gedimas vienoje fazėje. Gedimas atpažįstamas lyginant išmatuotas ir apskaičiuotas vertes.



1.3 pav. Tinklo schema: matuojama linijoje, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje [23]

Analizės tikslas yra rasti tiesioginės sekos varžos įvykus gedimui dydį Z_k (1.3 pav.), kai kitų lygiagrečių linijų ekvivalentinė varža Z_L išlieka nepakitusi. Pažymėjus, kad k -osios linijos ir kitų lygiagrečių linijų ekvivalentinės tiesioginės sekos varžos yra atitinkamai Z_{Lk} ir Z_L , nagrinėjamo tinklo ekvivalentinė varža iki gedimo nustatoma taip:

$$Z_{iki} = \frac{V_{iki}}{I_{iki}} = \frac{Z_L \cdot Z_{Lk}}{Z_L + Z_{Lk}}; \quad (5)$$

čia V_{iki} ir I_{iki} – įtampos ir srovės iki gedimo; Z_{Lk} – linijos, kurioje įvyko gedimas, varžos iki gedimo momento ekvivalentas; Z_L – kitų linijų varžų ekvivalentas.

Skiriami du gedimų atvejai:

- a) **gedimas yra tarpfazinis susijungimas.** Šiuo atveju elektros tinklo, kuriame įvyko gedimas, tiesioginės sekos varža nustatoma taip:

$$Z = \frac{V_{pg}}{I_{pg}} = \frac{Z_L \cdot Z_k}{Z_L + Z_k}; \quad (6)$$

čia V_{pg} ir I_{pg} – pastotėje išmatuota įtampa ir srovė, kai yra gedimas elektros tinkle.

Įvertinus (5) ir (6) lygtis, gaunama:

$$Z_k = \frac{Z \cdot Z_{iki}}{Z_{iki} - Z(1 - k_{Zk})} = \frac{V_{iki}}{I_{iki} - (1 - k_{Zk}) \frac{V_{iki}}{Z_{iki}}}; \quad (7)$$

$$k_{Zk} = \frac{Z_{iki}}{Z_{Lk}} = \frac{S_{Lk}}{S_{\Sigma}}; \quad (8)$$

čia S_{Lk} – linijos galia iki gedimo; S_{Σ} – suminė visų linijų galia iki gedimo.

Įvertinus (5) ir (8) lygtis, gaunama:

$$k_{Zk} = \frac{Z_L}{Z_L + Z_{Lk}}. \quad (9)$$

Kiekvienos linijos koeficientas įvertinamas stacionariųjų vyksmų iki gedimo atveju.

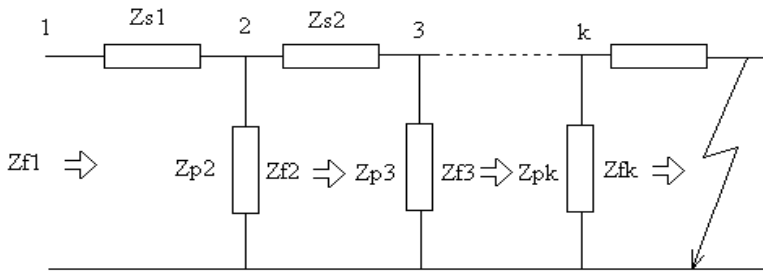
- b) **gedimas yra vienoje fazėje.** Linijos, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, tiesioginės sekos varža apskaičiuojama klasikiniu būdu. Įvertinus pastotėje išmatuotas sroves ir įtampas, tiesioginės sekos varžos galutinė lygtis yra:

$$Z_k = \frac{Z_g \cdot Z_{iki}}{Z_{iki} - Z_g(1 - k_{zk}) \cdot \left(1 - \frac{V_0}{V_f}\right)}; \quad (10)$$

čia

$$Z_g = \frac{V_f}{I_f + k_{kN} \cdot I_{kN}}, \quad (11)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C).$$



1.4 pav. Gedimo kabelyje skaičiuojamoji tiesioginės sekos schema [23]

Atstumas iki gedimo vietos nustatomas tik esant tarpfaziniam gedimui kabelinėje linijoje. Mazgo apkrova vaizduojama šunto varža, kabelinės linijos varža vaizduojama nuosekliai sujungtų varžų grandine (1.4 pav.). Grandinės trumpojo susijungimo varža atstumui nuo mazgo i iki gedimo vietos apskaičiuojama taip [23]:

$$Z_{fi} = \frac{Z_{pi} \cdot (Z_{fi-1} - Z_{si-1})}{Z_{pi} - Z_{fi-1} - Z_{si-1}} = R_{fi} + X_{fi}; \quad (12)$$

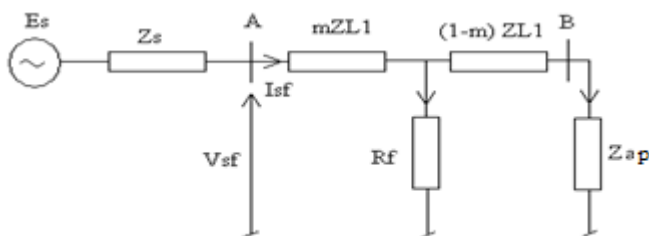
čia Z_{si-1} – kabelinės linijos segmento varža; Z_{pi} – apkrovos varža ir (arba) prie mazgo prijungtos šakos varža.

Varžų dydžiai įvertinami esant nusistovėjusiems vyksmams skirstomajame elektros tinkle. Varžos dydis palaipsniui artėja prie nulinės reikšmės $|Z_{fi-1}| > |Z_{fi}|$, o trumpojo susijungimo dalies varža:

$$Z_{fk} = l_{fk-1} \cdot Z_{sk-1} + R_f; \quad (13)$$

čia l_{fk} – atstumas nuo mazgo k iki gedimo vietos (tariamasis bendras segmento, kuriame įvyko gedimas, ilgis lygus l), Z_{sk-1} – kabelinės linijos segmento tarp mazgų $k-1$ ir k varža, R_f – trumpojo susijungimo varža.

Novoselio metodu paremtos technologijos. Novoselio metodu [23, 27] apskaičiuojamos šaltinio ir apkrovos varžos, o gedimas atpažįstamas taip pat remiantis įtampomis ir srovės matavimais prieš gedimą ir jam įvykus.



1.5 pav. Linijos narvelio skaičiuojamoji schema [23]

Linijos narvelio skaičiuojamosios schemas (1.5 pav.) apkrovos ir šaltinio varžos yra: $Z_{ap} = \frac{V_{iki}}{I_{iki}} - Z_{L1}$, $Z_s = -\frac{\Delta V_s}{\Delta I_s}$. Čia V_{iki} ir I_{iki} – pastotėje išmatuotos įtampos ir srovės reikšmės prieš gedimą, o ΔV_s ir ΔI_s – įtampos ir srovės pokyčiai: $\Delta V_s = V_{sf} - V_{iki}$, $\Delta I_s = I_{sf} - I_{iki}$. Nesant balanso, kad būtų išvengta klaidingo šaltinio varžos apskaičiavimo, kai skirtumas tarp išmatuotų įtampos ir srovės reikšmių prieš gedimą ir jam įvykus yra nedidelis, kaip skaičiavimo pagrindas naudojama atvirkštinės sekos skaičiuojamoji schema. Grandinės, kurioje įvyko gedimas, varža [27]:

$$Z_{mat} = \frac{V_{sf}}{I_{sf}} = mZ_{L1} + R_f \frac{I_f}{I_{sf}}. \quad (14)$$

Iš (14) lygties galima išvesti kvadratinę priklausomybę atstumui iki gedimo vietos nustatyti [27]:

$$m^2 - mk_1 + k_2 - k_3 R_f = 0; \quad (15)$$

čia

$$k_1 = \frac{V_{sf}}{I_{sf} Z_{L1}} + \frac{Z_{load}}{Z_{L1}} + 1,$$

$$k_2 = \frac{V_{sf}}{I_{sf} Z_{L1}} \left[\frac{Z_{load}}{Z_{L1}} + 1 \right],$$

$$k_3 = \frac{\Delta I_s}{I_{sf} Z_{L1}} \left[\frac{Z_s + Z_{load}}{Z_{L1}} + 1 \right].$$

(15) lygtyje yra du nežinomieji: m ir R_f . Šioje lygybėje, išskyrus tikrąją ir menamąją dalis, m gali būti apskaičiuota pašalinus R_f taip [27]:

$$m = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a};$$

čia

$$a = 1;$$

$$b = -\operatorname{Re}(k_1) - \frac{\operatorname{Im}(k_1)x \operatorname{Re}(k_3)}{\operatorname{Im}(k_3)};$$

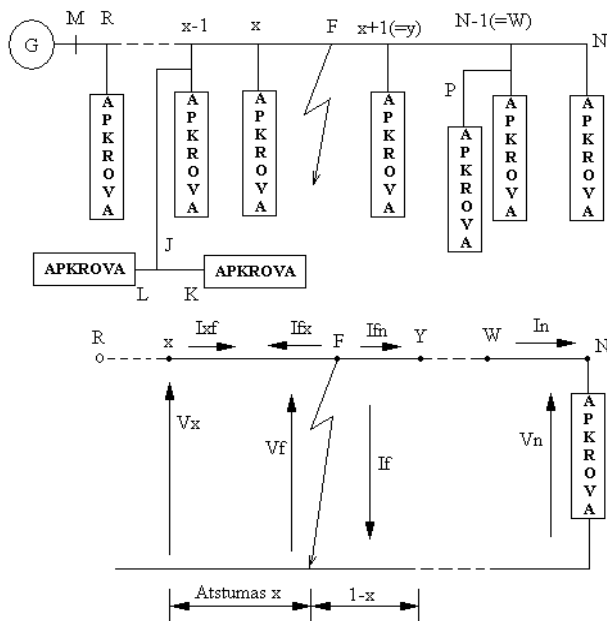
$$c = \operatorname{Re}(k_2) - \frac{\operatorname{Im}(k_2)x \operatorname{Re}(k_3)}{\operatorname{Im}(k_3)}.$$

Skirtingai nuo kitų technologijų, gedimui atpažinti taikant Novoselio metodą nereikia atsižvelgti į apkrovos srovės ir gedimo vietos varžos dydžius.

Daso metodu paremtos technologijos. Dar viena plačiai taikoma atpažinimo technologija, kuri paremta įtampos ir srovės matavimais linijoje prieš gedimą ir jam įvykus, yra Daso metodas [18, 19, 23, 28]. Siūloma jį taikyti norint atpažinti gedimą vienoje spindulinio skirstomojo elektros tinklo fazėje.

Analizei pasirinktas spindulinis tinklas su linijomis ir atšakomis tarp mazgų M ir N (1.6 pav.). Apkrovos ir techniniai linijų parametrai skirtingi. Atpažinimo procesą sudaro šeši etapai:

1. Nustatoma linijos, kurioje įvyko gedimas, atkarpa. Preliminarus atpažinimo įvertinimo rezultatas, galima sakyti, yra atkarpa tarp mazgų x ir $x+1(=y)$. Šis preliminarus rezultatas randamas įvertinant linijos techninius parametrus, gedimo pobūdį, apskaičiuotus srovės ir įtampos sekų kampus.
2. Sudaroma skaičiuojamoji spindulinio tinklo schema. Linijų atšakos tarp mazgo M ir gedimo vietos yra nevertinamos. Laikoma, kad atšakos apkrova yra tokia pat, kaip mazgo, nuo kurio šakojasi linija, apkrova.
3. Apkrovos modeliujamos įvertinant jų sroves. Visiems mazgams iki mazgo x , kaip ir suminei likusios kitos atšakos apkrovai, taikomas statinės apkrovos modelis.



1.6 pav. Principinė spindulinio tinklo schema su gedimo vieta F , trumpojo susijungimo įtampos ir srovės mazguose F ir N [23]

Mazgo R statinis modelis atrodo taip [23]:

$$Y_R = (G_R |V_R|_p^{n-2} + jB_R |V_R|_q^{n-2}); \quad (16)$$

čia V_R – įtampa mazge R ; Y_R – apkrovos varža; G_R ir B_R – aktyvūs ir reaktyvūs laidžiai; n_p ir n_q – apkrovos aktyvioji ir reaktyvioji dedamosios.

Konstantos G_R ir B_R randamos remiantis apkrovų iki trumpojo susijungimo įtampų ir srovių dydžiais bei atitinkamai įvertinus apkrovos aktyviają ir reaktyviają dedamąsias n_p ir n_q . Šių konstantų ir įtampų vertės leidžia nustatyti apkrovos atitikmenį ir srovių sekas trumpojo susijungimo metu.

4. Srovių ir įtampų sekos trumpojo susijungimo metu mazge F yra nustatomos atsižvelgiant į sąlygą, kad visų apkrovų už mazgo x suminė apkrova yra mazgo N apkrova. Mazgo F įtampos ir srovės susietos [23]:

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{fx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ sC_{xy} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix}; \quad (17)$$

čia s – santykinis atstumo tarp mazgų F ir x vienetas.

Mazgų N ir F įtampų ir srovių sekos trumpojo susijungimo metu išreiškiamos:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(1-s)B_{xy} \\ -(1-s)C_{xy} & 1 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

čia A_e, B_e, C_e – sekcijų tarp mazgų $x+1(=y)$ ir N ekvivalentinės konstantos.

Srovė mazge F apskaičiuojama taip:

$$I_{fn} = -I_{fx} - I_f. \quad (19)$$

Iš (17) ir (19) lygčių, įvedus (18) srovių ir įtampų reikšmes iki trumpojo susijungimo ir neatsižvelgiant į s reikšmę, jei $s > 2$, gaunama [23]:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_f \end{bmatrix} = \frac{1}{K_v + sK_w} \begin{bmatrix} K_m + sK_n & sK_p \\ K_q + sK_r & K_v + sK_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix}; \quad (20)$$

čia $K_m, K_n, K_p, K_q, K_r, K_u, K_v, K_w$ – kompleksiniai parametrai, apskaičiuoti panaudojant atitinkamai $Y_n, B_{xy}, C_{xy}, A_e, B_e, C_e$ ir D_e .

Įtampų sekos mazguose F ir N , srovių sekos mazge F apskaičiuojamos pagal formules (17) ir (20) panaudojant įvairius parametrus.

5. Atstumas nuo mazgo x iki trumpojo susijungimo vietos yra dalis linijos atstumo tarp mazgų x ir $x+1(=y)$ ir nustatomas iš įtampos ir srovės santykio trumpojo susijungimo vietoje ir trumpojo susijungimo varžos. Esant fazės A trumpajam susijungimui su žeme [23]:

$$\frac{V_{af}}{I_{af}} = \frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}} = Z_f; \quad (21)$$

čia V_{0f}, V_{1f}, V_{2f} ir I_{0f}, I_{1f}, I_{2f} – nulinės, tiesioginės ir atvirkštinės sekų įtampų ir srovių fazinės vertės gedimo vietoje F ; Z_f – trumpojo susijungimo varža.

Supaprastinant menamąją dalį pašalinant iš (21) lygybės abiejų pusių, pakeičiant trumpojo susijungimo vietos sekų sroves ir įtampas iš (17) ir (20) lygybių, atmetus s reikšmę, jei $s > 2$, gaunama:

$$I_m \left(\frac{K_A + sK_B}{K_C + sK_D} \right) = 0; \quad (22)$$

čia K_A, K_B, K_C ir K_D – kompleksiniai parametrai.

Išskaidžius kompleksinius parametrus į tikrąją ir menamąją dalis $K_A = K_{AR} + jK_{AI}$, $K_B = K_{BR} + jK_{BI}$, $K_C = K_{CR} + jK_{CI}$ ir $K_D = K_{DR} + jK_{DI}$, (22) lygtis pertvarkoma taip [23]:

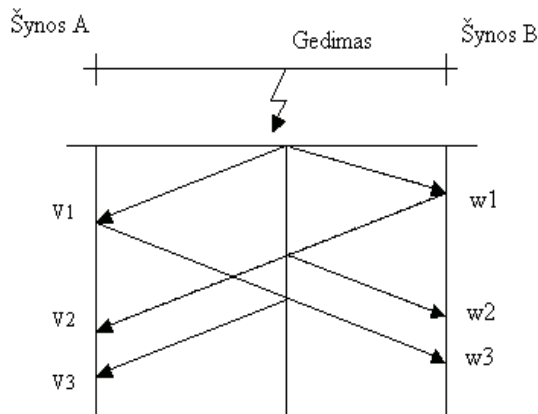
$$s = \frac{K_{AR}K_{CI} - K_{AI}K_{CR}}{(K_{CR}K_{BI} - K_{CI}K_{BR}) + (K_{DR}K_{AI} - K_{DI}K_{AR})}. \quad (23)$$

Dar du kartus skaičiuojamas atstumas, kai trumpasis susijungimas galėjo įvykti linijoje tarp mazgų $x-1$ ir x ar $x+1$ ir $x+2$. Išrenkama tikėtiniausia trumpojo susijungimo vieta ir pateikiamas rezultatas atstumą skaičiuojant nuo mazgo M .

6. Jeigu yra linijų atšakų, pateikiami keli gedimo vietos nustatymo skaičiavimai. Programinės įrangos pagrindu sukurti gedimo fiksavimo indikatoriai informuos apie trumpojo susijungimo srovės pratekėjimą, nepriklausomai nuo jo vietos. Kartu su galimais gedimo vietos skaičiavimais jie padės tiksliai nustatyti trumpojo susijungimo vietą.

1.1.2. Aukštojo dažnio dedamosios, pereinamųjų vyksmų analizė

Energetinių sistemų nepramoninio dažnio komponentų analizė taikoma daugiau nei šešiasdešimt metų [29], ypač relinės apsaugos ir automatikos srityje, tačiau tik pastaraisiais metais pasiekta apčiuopiamesnių rezultatų. Perdavimo tinkle sklindančių elektromagnetinių bangų teorija buvo pasiremta kuriant gedimų atpažinimo metodus linijų apsaugų terminalams, tačiau dėl patikimumo ir techninės priežiūros problemų [30] šių metodų buvo atsisakyta. Pastaruoju metu sklindančių elektromagnetinių bangų metodas imtas taikyti gedimo vietos nustatymo uždaviniams spręsti [31–40]. Pagrindinė šių sprendimų idėja yra linijoje sklindančios ir atsispindėjusios elektromagnetinių bangų koreliacija [6]. Dėl gedimo linijoje atsiradusi pereinamojo vyksmo banga, atsispindėjusi nuo gedimo vietos, pasieks relinės apsaugos terminalą per dvigubą bangos keliavimo nuo gedimo vietos iki apsaugos terminalo laiką. Tokiu būdu gali būti nustatytas atstumas iki gedimo vietos. Skirstomajame elektros tinkle šio metodo taikymas tampa keblesnis dėl tinklo spindulinės struktūros bei didelio kiekio gaunamų elektromagnetinės bangos atspindžių. Metodo taikymą apsunkina ir besikeičianti elektros tinklo struktūra, kai gedimas įvyksta netoli matavimų registravimo vietos arba kai gedimas įvyksta įtampos amplitudei artėjant prie nulinės reikšmės. 1992 metais pasirodė viena pirmųjų studijų [29, 41], kuriose aprašomas pereinamųjų vyksmų analize paremtas trumpojo susijungimo skirstomajame elektros tinkle atpažinimo metodas. Jį taikant neteko svarbos šios aplinkybės: trumpojo susijungimo pobūdis, trumpojo susijungimo parametrų dydžiai, pereinamojo vyksmo pradžia. Pagrindinis metodo trūkumas – būtinybė instaliuoti registravimo įtaisus daugelyje skirstomojo tinklo mazgų. Pagrindinis sklindančių elektromagnetinių bangų technologijos taikymo trumpajam susijungimui atpažinti principas pavaizduotas 1.7 pav.



1.7 pav. Sklindančių ir atsispindėjusių elektromagnetinių bangų tinklelio schema [42]

Įvykus trumpajam susijungimui linijoje pereinamojo vyksmo sukeltos srovės ir įtampos elektromagnetinės bangos pasklis į visas puses nuo gedimo vietos. Trumpojo susijungimo oro linijoje ar kabelyje sukeltų elektromagnetinių bangų charakteristikų teoriniai aspektai yra išsamiai aprašyti [29, 43, 44]. Atsispindėjusios

nuo šynų, bangos grįš į gedimo vietą ir, dar kartą atsispindėjusios nuo gedimo vietos ir kiek susilpnėjusios, vėl pasieks šynas. Šis vyksmas truks tol, kol bangos visiškai užges. Pereinamojo vyksmo sukeltos srovė ir įtampa gali būti išreikštos sklindančią f_1 ir grįžtančią f_2 elektromagnetinėmis bangomis [43]:

$$v(x, t) = f_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) + f_2 \left(t + \frac{x}{c} \right), \quad (24)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_0} f_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) - \frac{1}{Z_0} f_2 \left(t + \frac{x}{c} \right); \quad (25)$$

čia c – elektromagnetinės bangos sklidimo greitis; Z_0 – linijos varža; x – atstumas, kurį banga nusklido nuo gedimo vietos.

Tada sklindančios f_1 ir grįžtančios f_2 elektromagnetinės bangos:

$$f_1 = v(x, t) + Z_0 i(x, t); \quad (26)$$

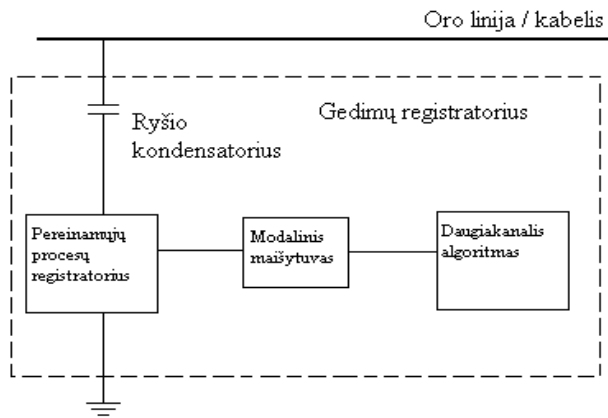
$$f_2 = v(x, t) - Z_0 i(x, t). \quad (27)$$

Remiantis 1.7 pav. ir laikant, kad atliekant matavimus prie šynų A užregistruojami laikai $V1$ ir $V3$, atstumas nuo šynų A iki gedimo vietos apskaičiuojamas:

$$d = \frac{ct}{2}; \quad (28)$$

čia c – elektromagnetinės bangos sklidimo greitis, t – laiko tarp atspindžių $V1$ ir $V3$ intervalas.

Atliekant pereinamųjų vyksmų analizę naudojamas aukštojo dažnio dedamųjų registracijos įrenginys, kurio blokinė schema pavaizduota 1.8 pav.



1.8 pav. Gedimų registratoriaus blokinė struktūra [45]

Visų fazių įtamos prijungiamos per aukštosios įtamos ryšio kondensatorius. Signalai įrašomi, filtruojami ir apdorojami skaitmenine forma.

Daugelis trumpajam susijungimui skirstomajame tinkle atpažinti taikomų pereinamųjų vyksmų analizės metodų yra adaptuoti perdavimo tinkle taikomi metodai. Pritaikant buvo atsižvelgta į kelis svarbius aspektus:

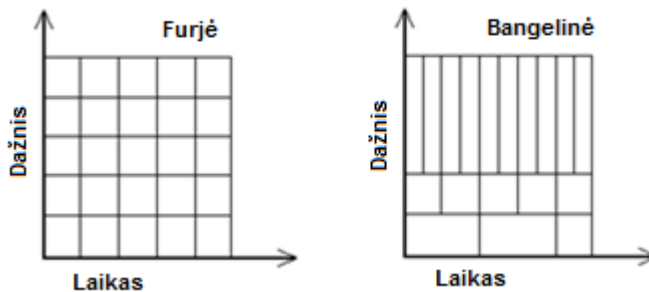
- Matavimai. Matavimų tikslumas turi aiškią priklausomybę nuo signalų registracijos dažnio. Skirstomajame tinkle oro ar kabelinės linijos yra trumpos, elektromagnetinių bangų sklidimo laikas yra 10 μ s eilės, todėl matavimų registracijos periodo laikas turi būti apie 1 μ s. Jei norima nustatyti ne trumpojo susijungimo vietą, o tik faktą, kad įvyko gedimas, matavimų registracijos laikas gali būti ir ilgesnis.
- Oro linijos arba kabelinės linijos. Gausiau gyvenamose vietovėse (miestuose ar rajonų centruose) skirstomuosiuose elektros tinkluose vyrauja kabelinės linijos. Pereinamųjų vyksmų požiūriu kabelinės ir oro linijos yra skirtingų charakteristikų. Pagrindinis skirtumas yra šunto talpa. Dėl arčiau esančių laidininkų, skirtingų izoliacinių medžiagų kabelinių linijų šunto talpa yra daug didesnė nei to paties ilgio ir įtampos lygio oro linijų. Šiek tiek skiriasi ir nuoseklus induktyvumas: kabelinėse linijose jis mažesnis. Elektromagnetinių bangų sklidimo greitis priklauso nuo abiejų anksčiau minėtų parametrų ir kabelinėse linijose yra mažesnis.
- Matavimo transformatoriai. Srovės transformatorių, naudojamų skirstomajame tinkle, konstrukcija mažai skiriasi nuo srovės transformatorių, naudojamų perdavimo tinkle. Be abejo, matavimo transformatoriai skiriasi dydžiu, izoliacijos lygiu, montavimo vieta (vidaus, lauko tipo), tačiau principas yra tas pats. Įtampos transformatoriai, naudojami skirstomajame tinkle, dažniausiai yra magnetinio tipo, o perdavimo tinkle naudojami talpinio tipo transformatoriai, turintys talpinį įtampos daliklį, nuosekliai sujungtą su magnetinio tipo įtampos transformatoriumi. Pereinamųjų vyksmų požiūriu pagrindinis šių įtampos transformatorių skirtumas yra dažninis diapazonas. Palyginti su srovės transformatoriais, pastarieji turi aukštesnio dažnio diapazoną, todėl tinkamesnis būdas yra registruoti ne įtampos, o srovinių signalų pereinamuosius vyksmus.
- Topologija. Topologinės skirstomojo tinklo charakteristikos yra ne tokios palankios pereinamųjų vyksmų analizei paremtai technologijai įdiegti kaip perdavimo tinklo charakteristikos. Pagrindiniai keblumai yra:
 - trumpose linijose trumpas bangų sklidimas reikalauja greitųjų vyksmų registracijų;
 - dėl T tipo mazginių sujungimų atsiranda daug bangų atspindžių;
 - dėl didesnių linijų varžų bangos slopinamos greičiau;
 - dėl trumpų linijų sklindančios bangos yra aukštųjų dažnių.

Naudojant pereinamųjų vyksmų analizei paremtas gedimų atpažinimo skirstomajame tinkle technologijas taikomi įvairūs atpažinimo metodai. Siūlomi ir tokie sprendimo būdai, kaip dirbtinio trumpalaikio aukštojo dažnio pereinamojo vyksmo sukėlimas ir jo analizė [46]. Pereinamieji vyksmai, atsiradę dėl trumpojo susijungimo, beveik visais atvejais modeliuojami panaudojant plačiai paplitusias programas – „Alternative Transient Program“ / „Electromagnetic Transient

Program“ (ATP / EMTP). Sumodeliuoti vyksmų duomenys perkeliama į kitą programinę įrangą MATLAB, kuria naudojantis tyrinėjamas elektromagnetinių bangų sklidimas, atspindžiai, harmonikų elgsena.

Greitaiėgės Furjė transformacijos metodo pritaikymas. Viena savybių, kurias turi ir bangelinės [32, 36, 47], ir Furjė transformacijos, yra ta, kad pagrindinės abiejų funkcijos apima dažnių sritį. Trumpojo susijungimo sukkelto pereinamojo vyksmo dažninis diapazonas priklauso nuo linijos charakteristikų (paskirstytųjų parametru) ir linijos ilgio. Sklindančios elektromagnetinės bangos dažninė analizė gali suteikti informacijos apie gedimo pobūdį. Pritaikant greitaiėgę Furjė transformaciją buvo sukurti vadinamieji spektriniai analizatoriai. Skirtumą tarp bangelinės ir Furjė transformacijų iliustruoja 1.9 pav. Taikant Furjė transformaciją panaudota fiksuoto dydžio tolygioji priklausomybė visame transformacijos procese, todėl laiko ir dažnio rezoliucija yra visada ta pati. Bangelinės transformacijos atveju erdvė yra kintama laiko ir dažnio sritis, todėl yra ir galimybė atlikti signalų analizę su skirtinga rezoliucija esant skirtingiems dažniams.

Pereinamojo vyksmo signalai, atsiradę dėl trumpojo susijungimo, yra nestacionariųjų vyksmų signalai, išsidėstę plačiame dažnių diapazone. Furjė transformacija turi įvairių išlygų ir apribojimų, susijusių su laiko ir dažnio rezoliucija. Kadangi trumpojo susijungimo atpažinimo technologijoje informacija apie laiką yra labai svarbi, todėl nėra rekomenduojama taikyti Furjė transformacijos metodologijos, kaip atpažinimų analizės įrankio [48].



1.9 pav. Bangelinių ir Furjė transformacijų pagrindinių funkcijų dažninė laiko charakteristika [48]

Bangelinės transformacijos metodo pritaikymas. Apie bangelines transformacijas ir jų panaudojimą gedimams energetinėje sistemoje atpažinti yra sukaupta daug ir įvairios informacijos [49–52].

Vienas iš bangelinės transformacijos panaudojimo būdų yra daugiarezoliucės analizės pritaikymas signalams filtruoti, kai analizuojamas signalas perleidžiamas per filtrą ar filtrų seką ir taip gaunama nuo laiko priklausomų signalų serija. Kiekviena išfiltruota signalų serija atspindi pirminio signalo originalą. Tokiu būdu galima atlikti dažninio pobūdžio signalo turinio priklausomybės nuo laiko analizę.

$$X_A = \frac{t_{v2} - t_{v1}}{2} v; \quad (29)$$

$$X_B = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{2} v; \quad (30)$$

čia v – bangos sklidimo greitis; t_{v1} – laiko tarpas, per kurį banga sklinda nuo gedimo vietos iki mazgo $v1$; t_{w1} – laiko tarpas, per kurį banga sklinda nuo gedimo vietos iki mazgo $w1$; t_{v2} – laiko tarpas, per kurį banga sklinda nuo mazgo $w1$ iki mazgo $v2$; t_{w2} – laiko tarpas, per kurį banga sklinda nuo mazgo $w1$ iki mazgo $w2$ (1.7 pav.).

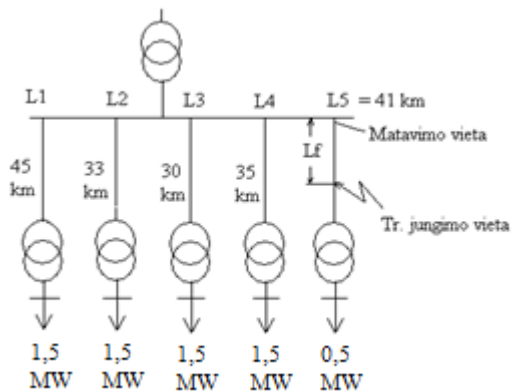
(29) ir (30) lygtys naudojamos trumpojo susijungimo atstumui nuo šynų A ir B nustatyti (1.7 pav.). Atpažinimo ypatybėms nustatyti daugiausia naudojamos tik kelios pagrindinės bangelinės transformacijos, tokios kaip *Symlets* (sym), *Daubechies* (db), *Coiflets* (coif) ir kt. Pagrindinės bangelinės transformacijos pasirinkimas yra svarbus veiksnys nustatant dažnio ir laiko erdvės sritį [32]. Sym, db, coif bangelinų transformacijų palyginimai atskleidžia pagrindinius jų skirtumus. Db bangelinės transformacijos yra dažniausiai naudojamos studijose, nes labiausiai tinka energetinių procesų analizei. Pavyzdžiui, db3 su pirmo lygmens koeficientu (d1) yra pasirinktas elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų signalų, atsiradusių dėl elektros tinklo darbo sutrikimų, savitumui nustatyti. Reikia atsižvelgti ir į tai, kad pirmas lygmuo, palyginti su antru ar trečiu, apima daugiausia informacijos. Esant aukštesniam lygmeniui prarandama daugiau informacijos, nes dažnio dedamoji dalijasi perpus pereinant iš vieno lygmens į kitą. Tačiau esant dideliame triukšmo lygiui pirmajame lygmenyje, yra pasirenkamas trečias ar ketvirtas lygmuo.

Atstumui nustatyti skaičiavimai dažniausiai atliekami naudojant (29) lygtį, o modeliavimui naudojamos ATP / EMTP, MATLAB programinės įrangos.

Vienas sunkesnių gedimo skirstomajame elektros tinkle atpažinimo atvejų yra vienos fazės susijungimas su žeme per didelės varžos laidininką. Dažniausiai praktikoje pasitaiko tokių atvejų, kaip medžio šakos prisilietimas prie oro linijos fazės laido. Skirstomasis elektros tinklas gali būti visai nežemintas, žemintas per kompensacinį įrenginį ar varžą, arba žeminimas gali būti sujungiamas su tinklo neutrale. Labiausiai paplitęs yra skirstomasis tinklas, žemintas per kompensacinį įrenginį [53]. Trumpojo susijungimo srovės taip žemintame tinkle dėl lygiagrečiai prijungto kompensacinio įrenginio induktyviosios varžos ir linijos talpos rezonanso yra nedidelės. Esant kompensuotajam tinklui įprasti srovės laipto fiksavimo būdai gedimui vienoje fazėje atpažinti nebuvo tinkami. Bandymai gedimo vienoje fazėje metu šuntuoti kompensacinį įrenginį nedavė reikiamo rezultato: ritės induktyvumo visiškai pašalinti nepavyko, be to, tampa būtinas sudėtingas komutacinis mechanizmas. Įvairių [54–56] pereinamųjų vyksmų signalų antros, trečios eilės harmonikų, neharmoninės, aukštojo dažnio spektro dalies analizės būdų esant didelei trumpojo susijungimo varžai panaudojimas yra ribotas.

Gedimo vienoje fazėje per didelės varžos laidininką modeliavimas [57] panaudojant diskrečiąsias bangelines transformacijas (DBT) ir įvertinant, kad pats gedimas vienoje fazėje yra pasikartojančio pobūdžio, parodė, jog atpažinimas yra įmanomas. Gedimas kartojasi elektros lankui užsidedant kas pusperiodį. Sprendžiant

gedimo atpažinimo uždavinį panaudojamos DBT ir fazinės įtampoms koeficientas d_3 , tai atitinka 12,5–6,25 kHz dažnio diapazoną. Modeliavimui taikyta principinė schema pavaizduota 1.10 pav.



1.10 pav. Skirstomojo tinklo, kurio bendras linijų ilgis 251 km, schema [57]

Tinklui su kompensuojama neutrale ir 5 oro linijomis sumodeliuoti naudojama ATP/EMTP programinė įranga. Gedimas vienoje fazėje modeliuojamas dviem nuosekliais elementais: didele varža (140 k Ω) ir elektros lanko dinaminio modeliu [57]:

$$G = \frac{|i|}{U_{\text{lanko}}}; \quad (31)$$

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} (G - g); \quad (32)$$

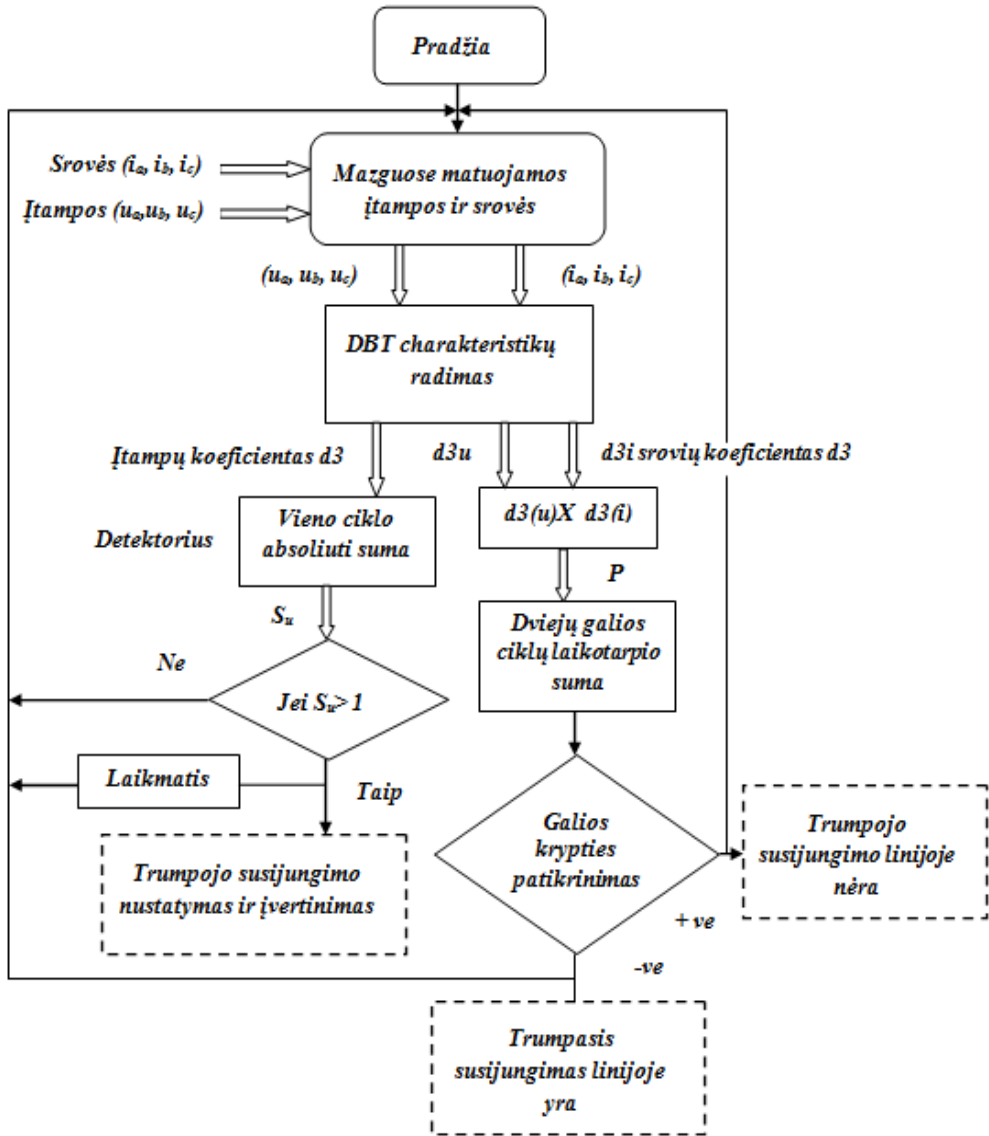
$$\tau = Ae^{Bg}; \quad (33)$$

čia G ir g – nuostovusis ir kintamasis lanko laidumas; $|i|$ – lanko srovės absoliutusis dydis, U_{lanko} – pastoviojo dydžio lanko įtampa; τ – lanko laiko konstanta; A ir B – lanko konstantos.

Kiekviename mazge išmatuojamos fazinės įtampos ir srovės. Gedimo vienoje fazėje charakteristikos gaunamos pasitelkus diskrečiąją bangelinę transformaciją. Įvertinama fazinės įtampos koeficiento d_3 absoliučioji suma vieno periodinio ciklo laikotarpiu. Smulkiau DBT paremta atpažinimo technologija parodyta 1.11 pav. Pasinaudojant MATLAB esamais bangelinės transformacijos duomenimis, *Daubechies* bangelinė 14 (db14) transformacija buvo pasirinkta kaip tinkamiausia atpažinimo uždaviniui spręsti esant 100 kHz diskrečiam dažniui. Šis dažnis gali būti ir 25 ar 50 kHz, tačiau koeficientai turi būti pasirinkti atitinkamai db1 ar db2. Gedimo vienoje fazėje charakteristikos gaunamos taikant diskrečiąją bangelinę transformaciją [57]:

$$\text{DBT}_{\psi f}(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \psi \left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right); \quad (34)$$

čia $\psi(\dots)$ – pagrindinė bangelinė transformacija, diskretiškai išplėsta ir performuota remiantis a_0^m ; nb_0 , a_0 ir b_0 – fiksuotieji dydžiai ($a_0 > 1$, $b_0 > 0$); m ir n – sveikieji skaičiai.



1.11 pav. DBT gedimo atpažinimo technologija [57]

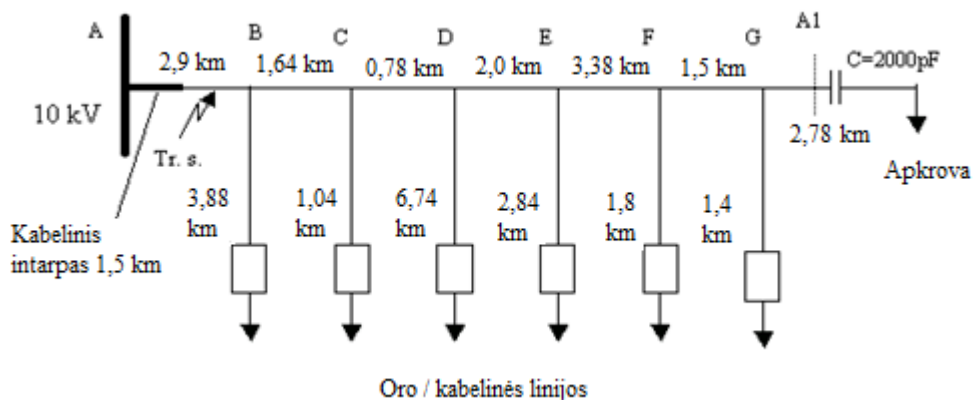
Dvejetainės transformacijos, kuri gali būti laikoma tam tikru DBT spektriniu analizatoriumi, atveju $a_0 = 2$, $b_0 = 1$. Pirmenybę teikiant įtampoms, pramoninio dažnio vieno periodo absoliučioji suma apskaičiuojama [57]:

$$S_u(k) = \sum_{n=k-N+1}^k |d3_u(n)|; \quad (35)$$

čia $S_u(k)$ – diskrečiųjų reikšmių detektorius, kuris esant fazinės įtampos lygiui $d3_u$ suformuoja slenkantį 20 ms langą; N – reikšmių skaičius lange.

Diskrečiųjų bangelių transformacijų taikymas leidžia spręsti gedimo režimų skaičiavimo uždavinius naudojant kompiuterinę įrangą. Kiekviena užregistruota signalo dalis transformuojama praleidžiant visą užregistruotą signalą per tam tikro diapazono filtrą ar kelių filtrų grupę ir taip atpažįstant atsklidusią pereinamojo vyksmo sukeltą elektromagnetinę bangą. Esant tam tikram dažnių diapazonui galima panaikinti transformatorių ar talpų prisijungimo įtaką elektromagnetinei bangai. Įvertinus ir palyginus [58] koreliacijos metodą ir bangeline transformacija paremtą metodą, galima teigti, kad esant tam tikroms prielaidoms koreliacijos metodas yra ne kas kita, kaip bangelinė transformacija.

Koreliacijos metodo pritaikymas. Koreliacijos metodas taikomas reikiamam viršįtampiiui atpažinti, panaudota autokoreliacijos technologija [42], kuri paremta įvykių palyginimo principu.

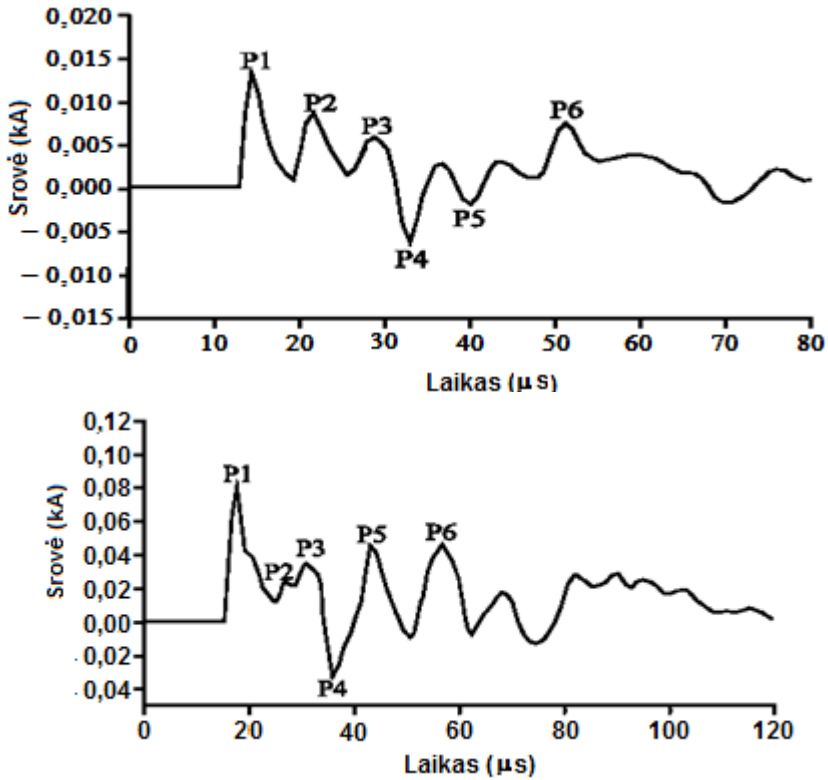


1.12 pav. Modeliavimui PSCAD / EMTDC programine įranga panaudota spindulinio tinklo principinė schema [42]

Modeliuojamas izoliuotosios neutralės elektros tinklas (1.12 pav.) yra trifazis, laidininko varža (esant nuolatinei srovei) – 0,5426 Ω /km, vidutinis laidų aukštis nuo žemės – 6 m, atstumas tarp fazinių laidų – 0,8 m, žemės varža – 100 Ω /m. Registracija atliekama mazge A. Gedimas vienoje fazėje įvyko 2 km atstumu nuo mazgo A. Trumpojo susijungimo varža – 0,01 Ω . Kabelinės linijos intarpo pilnutinė varža – 39,7 Ω . Elektromagnetinės bangos sklaidimo kabelinėje linijoje greitis – $1,66 \cdot 10^5$ km/s (55,2 %, palyginti su oro linija). PSCAD / EMTDC pereinamųjų

vyksmų simulatoriumi įvertinami gedimai vienoje fazėje pagrindinės linijos atkarpose A–G, apskaičiuojant kiekvienam atvejui pereinamųjų vyksmų srovines charakteristikas mazge A.

Užregistruojami gedimo vienoje fazėje sukelti pereinamojo vyksmo aukštojo dažnio srovės signalai visose fazėse. Registracijos diskretusis dažnis $0,8 \mu\text{s}$. Pritaikant koreliacijos metodą užregistruotame signale išmatuojami laiko skirtumai tarp kreivės pikų, įvertinant tai, kad bangų atspindžio vietos konkrečiame elektros tinkle (1.12 pav.) yra žinomos. Remiantis išmatuotais laiko skirtumais, apskaičiuojami atitinkami atstumai, kurie atitinka krintančios ir atsispindėjusios bangos nueitus kelius. Lyginant apskaičiuotus ir žinomus atstumus, randami trūkio taškai. Atliekant tolesnę analizę nustatoma tinklo atkarpa, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje. Nustačius avarinę tinklo atkarpą, pereinamųjų vyksmų simulatoriumi įvertinami sumodeliuoti keli nauji vienos fazės gedimai avarinėje atkarpoje ir lyginant rezultatus kryžminės koreliacijos metodu nustatoma gedimo vieta avarinėje atkarpoje. Sroviniai signalai, kai gedimas vienoje fazėje yra atitinkamai 2,5 km ir 3,4 km atstumu nuo mazgo A, pavaizduoti 1.13 pav. Kreivių pikas, pažymėtas kaip *P1*, yra viršįtampio, atsiradusio dėl vienos fazės gedimo, atitikmuo. *P2–P6* yra atspindžių atitikmenys. Pasinaudojant (28) lygtimi apskaičiuojami atstumai tarp vienos fazės gedimo ir jo atspindžių vietų. Skaičiavimo rezultatai pateikti 1.1 lent. Kai kurie pikai yra priešingo poliškumo nei *P1*.



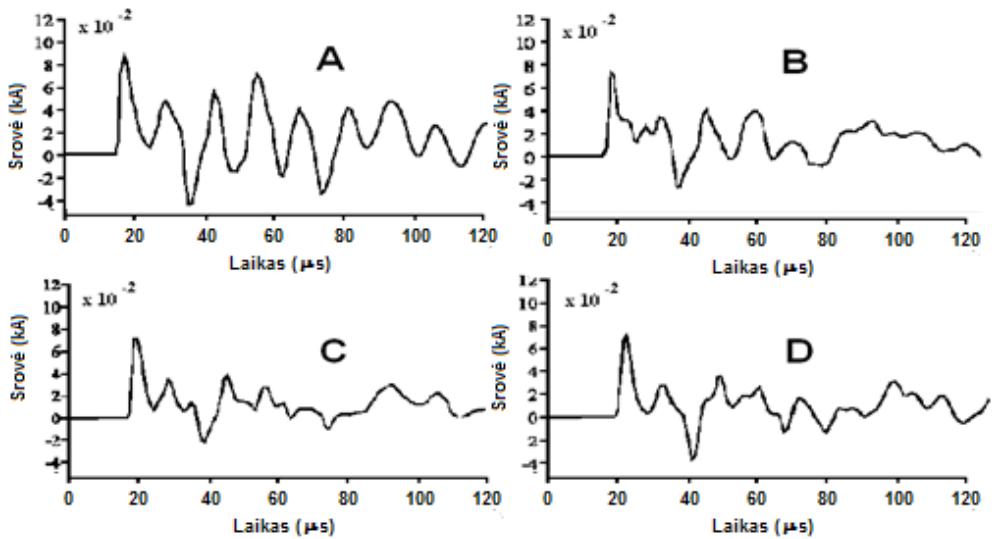
1.13 pav. Fazės, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje 2,5 km ir 3,4 km atstumu nuo mazgo A, srovės kreivės [42]

Kadangi kabelinės linijos pilnutinė varža yra daug mažesnė nei oro linijos, pereinamojo vyksmo teigiamo poliškumo banga, atsispindėjusi nuo perėjimo „kabelis–oro linija“ mazgo, tampa neigiamo poliškumo. Todėl galima spręsti, kad gedimo vienoje fazėje vieta yra už kabelinės linijos perėjimo į oro liniją mazgo. Laiko delsa tarp *P1* ir *P4* proporcinga linijos kabelinės dalies ilgiui. Atitinkamai laiko delsa tarp *P1* ir *P2* yra proporcinga atstumui nuo gedimo vienoje fazėje vietos iki perėjimo „kabelis–oro linija“ mazgo.

1.1 lentelė. Apskaičiuotos atstumų nuo *P1* iki kitų kreivių pikų reikšmės [42]

<i>Pikas</i>	Laiko delsa (μ s), kai tr. s. atstumas 2,5 km	Atstumas, km	Laiko delsa (μ s), kai tr. s. atstumas 3,4 km	Atstumas, km
<i>P1</i>	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>P2</i>	7,2	1,08	9,6	1,44
<i>P3</i>	14,4	2,16	13,6	2,04
<i>P4</i>	18,4	2,76	18,4	2,76
<i>P5</i>	25,6	3,84	25,6	3,84
<i>P6</i>	36,8	3,52	39,2	5,88

P2 gali būti ir pereinamojo vyksmo elektromagnetinės bangos linijos atšakos mazge *B* atspindys. *P4* atitinka perėjimo mazge „kabelis–oro linija“ atspindį. *P5* gali būti mazge *B* atsišakojusios linijos galo atspindys. Remiantis turimais skaičiavimais, gali atrodyti, kad gedimo vieta yra už mazgo *C*. Tačiau, įvertinus poliškumą, *P5* negali būti linijos galo atspindys, nes tokiu atveju atspindžio poliškumas turi būti teigiamas. Taigi galima vienos fazės gedimo vieta yra tarp linijos atšakos mazgo *B* ir mazgo „kabelis–oro linija“. Jeigu gedimas įvyko 3,4 km atstumu nuo mazgo *A*, t. y. linijos atkarpoje tarp mazgų *B* ir *C*, *P2* atitinka elektromagnetinės bangos atspindį mazge *B*. Panašiai įvertinamos ir kitų pikų atitikties elektros tinklo principinei schemai. Išanalizavus įvairius modeliuotus skirstomojo tinklo variantus, atlikus atitinkamus skaičiavimus, galima pasakyti, kad pereinamojo vyksmo sukeltų sklindančių ir atsispindėjusių bangų analizės metodika gali būti pritaikyta vienos fazės gedimui atpažinti skirstomajame elektros tinkle nustatant linijos atkarpa, kurioje įvyko gedimas. Kadangi vienos fazės gedimo pilnutinė varža kabelinėse ir oro linijose yra skirtinga, tai linijos sandūra „oro linija–kabelis“ turi didelės įtakos bangos atspindžio koeficientui. Todėl jei gedimo vieta yra už minėtos sandūros, tik nežymi mazge *A* atsispindėjusios bangos dalis pasieks gedimo vietą. Tokiu atveju vietos nustatymas matuojant laiko tarp užregistruotos mazge *A* atsklidusios elektromagnetinės bangos ir jos atspindžio nuo gedimo vietos delsą turės didelę paklaidą. Vietai nustatyti taikomas kryžminės koreliacijos metodas, kai nustatytoje linijos, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje, atkarpoje gedimas modeliuojamas keliose tos atkarpos vietose ir sumodeliuotų įvykių registracijos lyginamos su užregistruotomis originaliomis registracijomis (1.14 pav.).



1.14 pav. Fazės, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje 3 km (A), 3,5 km (B), 4 km (C) ir 4,5 km (D) atstumu nuo mazgo A, srovės kreivės [42]

Pereinamojo vyksmo srovės kreivės, gautos simulatoriumi imituojant gedimą vienoje fazėje skirtingose linijos atkarpos B–C vietose, pateiktos 1.14 pav. Lyginant kreives matyti, kad kreivė B panašiausia į faktiškai užregistruotą srovės kreivę (1.14 pav.). Galutiniam rezultatų palyginimui apskaičiuojami kryžminės koreliacijos koeficientai. Skaičiavimų rezultatai pateikti 1.2 lent. Jie patvirtina, kad, esant trumpajam susijungimui 3,4 km atstumu nuo mazgo A, bangos B forma artimiausia užregistruotajai. Tikslumui padidinti galima atlikti papildomų gedimų vienoje fazėje imitacijų aplink arčiausiai nustatytą vietą. Nors praktiniuose bandymuose pritaikant koreliacijos metodą yra pavykę pasiekti didelį tikslumą (apie 200 m), tačiau būtini papildomi tyrinėjimai norint atpažinti gedimą vienoje fazėje esant realesniems skirstomojo tinklo ir trumpojo susijungimo parametrų.

1.2 lentelė. Kryžminės koreliacijos koeficientas esant gedimui vienoje fazėje 3,4 km atstumu nuo registracijos vietos [42]

Atstumas iki tr. s. vietos (km)	Kryžminės koreliacijos langas			
	Koreliacijos koeficientas			Vidurkis
3,0	50,00	75,00	100,00	0,9339
	0,9526	0,9309	0,9182	
3,5	50,00	75,00	100,00	0,9715
	0,9705	0,9718	0,9722	
4,0	50,00	75,00	100,00	0,8235
	0,8501	0,8180	0,8025	
4,5	50,00	75,00	100,00	0,7564
	0,8092	0,7491	0,7109	

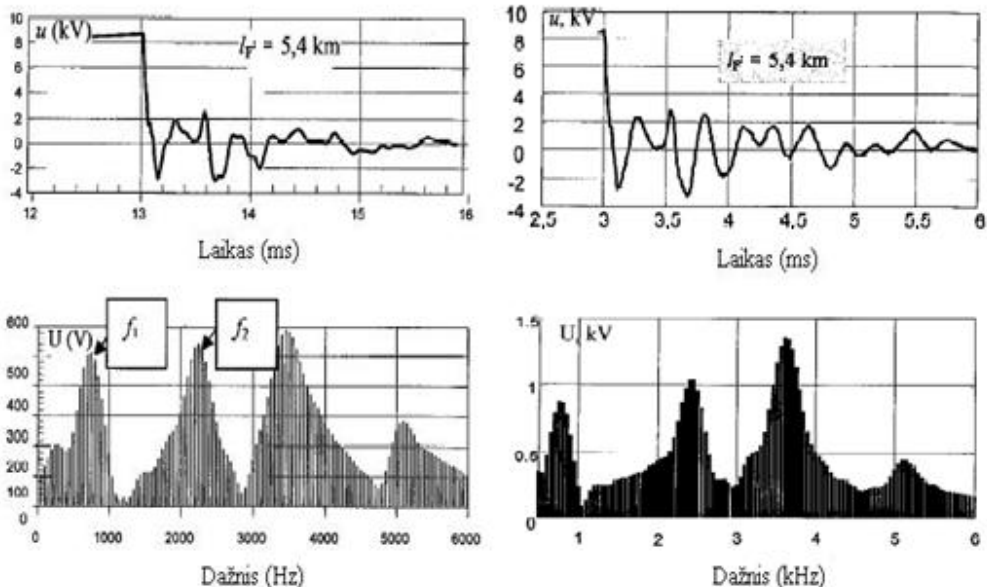
Parametrinio metodo taikymas. Skirstomajame elektros tinkle su izoliuotąja ar kompensuotąja neutrале gedimui vienoje fazėje atpažinti taikomas parametrinis metodas [59, 60] taip pat paremtas elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų analize. Vienas iš pasiūlytų metodų yra dažninio parametro metodas [61, 62], kurio pagrindas yra tinklo dažninių charakteristikų analizė esant gedimui vienoje skirstomojo elektros tinklo fazėje. Remiantis dažninėmis tinklo charakteristikomis, sudaroma atstumo iki gedimo vienoje fazėje vietos priklausomybė nuo laisvųjų svyravimų dažnio f_2 . Tinkamo laisvųjų svyravimų dažnio parinkimas užregistruotoje gedimo vienoje fazėje pereinamojo vyksmo charakteristikoje atliekamas pasinaudojant kryptine diskrečiąja Furjė transformacija [59]:

$$U(f_k) = U(k) = \sum_{n=1}^N u(n) e^{-\frac{j2p(k-1)(n-1)}{N}}; \quad (36)$$

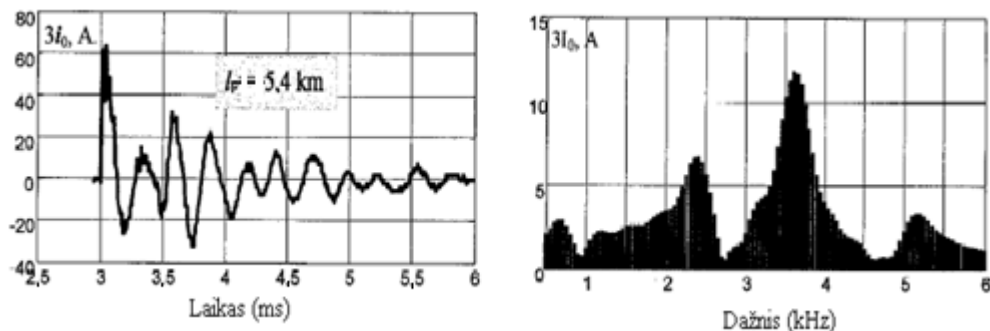
$$k = 1, \dots, N; f_1 = \frac{k}{\Delta t};$$

čia $\Delta t = t_2 - t_1 = hN$ – laiko intervalas, atitinkantis gedimo vienoje fazėje sąlygą; N – registracijų skaičius; h – diskrečiojo matavimo žingsnis.

Linijoje, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, panaudojant matavimo transformatorius, yra registruojamos pereinamojo vyksmo fazinės įtampos u_γ ($\gamma = \{A, B, C\}$), o panaudojant srovės transformatorių – nulinė sekos srovė $3i_0$. Metodui patikrinti panaudota tipinė skirstomojo tinklo schema (1.12 pav.) su oro ir kabelinėmis linijomis. Dirbtinis gedimas vienoje fazėje buvo sukeltas 5,4 km atstumu nuo registracijos vietos. Užregistruoti ir pasitelkus modelį gauti skaičiavimo rezultatai pateikti 1.15 ir 1.16 pav. Norint įvertinti atstumo priklausomybę nuo dažnio $I_f = \xi(f_2)$, keliose skirtingose linijos vietose buvo sukelti dirbtiniai vienos fazės gedimai. Rezultatai, kai yra pastovi apkrova ir nekintama skirstomojo tinklo struktūra, pavaizduoti 1.17 pav.



1.15 pav. Užregistruoti eksperimentiniai (dešinėje) ir apskaičiuoti įtampos signalai ir jų dažniniai spektrai [59]

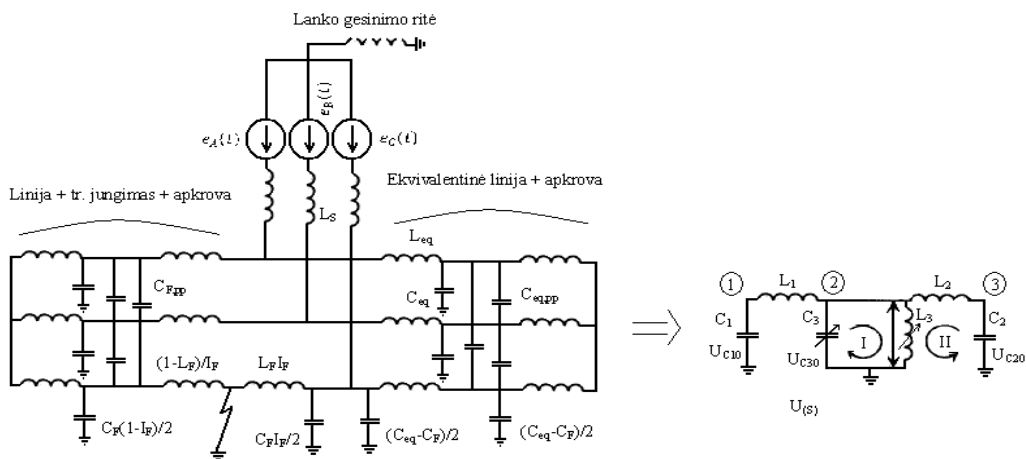


1.16 pav. Užregistruotas eksperimentinis nulinės sekos srovės signalas ir jo dažninis spektras [59]

Esant didesnių tinklo struktūros ar apkrovos pakitimų, būtina įvertinti ir tų pakitimų įtaką dažninėms charakteristikoms. Iš 1.15 ir 1.16 pav. esančių kreivių matyti, kad pagrindiniai įtampos signalo spektro dažniai yra $f_1 = 750$ Hz, $f_2 = 2250$ Hz ir $f_3 = 3340$ Hz. Nulinės sekos srovės ir įtampos signalų dažniniai spektrai yra panašūs. Dažnio f_2 reikšmė ir atstumas iki gedimo vietos yra tarpusavyje susiję dydžiai, taigi jiems įvertinti galima panaudoti pereinamojo vyksmo arba įtampos ar nulinės sekos srovės užregistruotus signalus. Taikant parametrinį metodą praktikoje, yra pasiekta neblogų rezultatų, ypač kabeliniuose miestų skirstomuosiuose tinkluose, tačiau dažnai, esant trumpalaikiam vienos fazės gedimui, dideliame laisvųjų švytavimų gesimo koeficientui, nustatyti tikslią dažnio f_2 reikšmę iš užregistruoto

pereinamojo vyksmo signalo būna sudėtinga. Tokiais atvejais pasitelkiamos bangelinės transformacijos.

Tinkluose su kompensuotąja neutrale gedimo vienoje fazėje atpažinimo metodas nustatant laisvųjų švytavimų dažnį nėra taikytinas. Atsiradus trumpojo susijungimo srovės kompensavimo funkcijai sutrumpėjo ir pasikeitė pats pereinamasis vyksmas. Dėl tos priežasties siūlomas taikyti metodas [59], paremtas linijos, kurioje įvyko gedimas vienoje fazėje, fazinės įtampos išvestinės analize pirminiu izoliacijos pramušimo momentu. Trifazio tinklo skaičiuojamoji ir supaprastinta tinklo schemas pateiktos 1.17 pav.



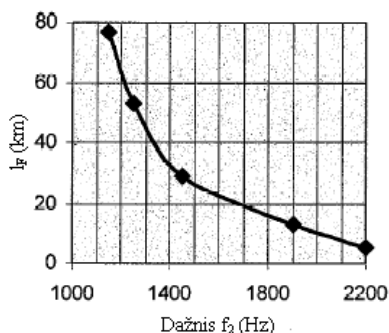
1.17 pav. Spindulinio trifazio skirstomojo tinklo skaičiuojamoji schema ir supaprastinta ekvivalentinė schema [59]

Pereinamojo vyksmo įtampas ir jos išvestinės mazge $nr3$ sprendiniui rasti tinklo schema supaprastinama: $L_1 \approx L_{eq}$, $L_2 = \frac{3}{2}L_s + \frac{1}{2} \frac{L_{eq}L_F}{(L_{eq}+L_F)}$, $L_3 = L_F l_F$, $C_1 = \frac{1}{2}(C_{eq} - C_F)$, $C_2 \approx 2(C_{eq} + C_F + 2(C_{eq,pp} + C_{F,pp}))$, $C_3 = \frac{1}{2}(C_{eq} + C_F(l_F - 1))$. Atlikus įtampas $U_{(s)}$ inversiją Laplaso transformacija [36], gaunama:

$$\frac{du}{dt} = \sum_{k=1}^3 (U_{C_{10}} S_{1k} + U_{C_{30}} S_{2k}) \sin(B_k t); \quad (37)$$

čia $U_{C_{k0}}$ ($k = 1, \dots, 3$) – talpos įtampos pirminiu izoliacijos pramušimo momentu; S_{1k}, S_{2k}, B_k – parametrai, priklausomi nuo l_F, L_3 ir C_3 .

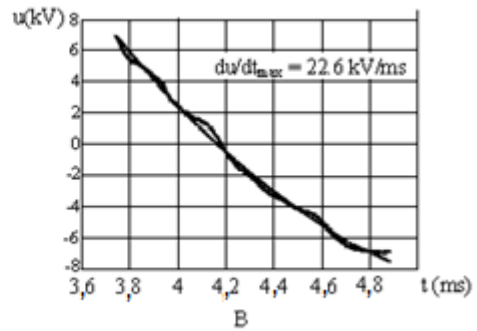
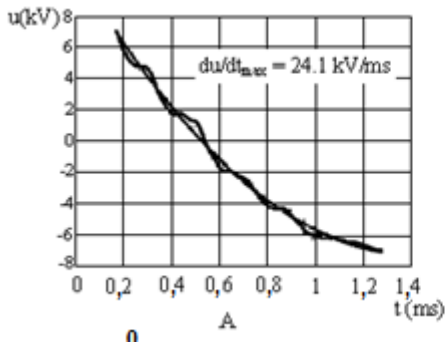
Skaičiuojant pagal (37) lygtį, gaunama tipinė pirmojo įtampos išvestinės maksimumo priklausomybė nuo gedimo vietos l_F (1.18 pav.). Ši priklausomybė taikytina daugiausia kabeliniam tinklui.



1.18 pav. Apskaičiuota pirmojo įtampos išvestinės maksimumo priklausomybė nuo gedimo vienoje fazėje vietos [59]

Tikrame skirstomajame tinkle dėl tinklo nuostolių laisvieji įtampos švytavimai slopsta daug greičiau, ypač aukštųjų dažnių diapazone, todėl maksimalios įtampos išvestinių reikšmės yra mažesnės, tačiau priklausomybės $du/dt = \xi(I_F)$ charakteristikos išlieka panašios į pavaizduotąją 1.18 pav.

Įtampos išvestinės maksimumas skaičiuojamas pasitelkiant esamas elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų modeliavimo programas [36]. (37) išraiškos antrasis dėmuo $U_{C_3,0}S_{2k}$, nusakantis dėl likusių sveikų fazių talpų iškvrovos atsiradusią įtampos dedamąją (ekvivalentinę talpą C_2), turi labai nedidelę įtaką pirmajam įtampos išvestinės maksimumui. Pirmasis izoliacijos pramušimas atsiranda fazėje, kurioje įvyko gedimas, įtampos reikšmei beveik pasiekus maksimaliąją vertę. Ši įtampa yra priešingo poliaringumo ir dvigubai didesnė nei sveikose fazėse ($U_{C_2,0} = -U_{C_3,0}/2$). Sveikose fazėse vykstanti iškvrova dėl priešingo poliaringumo padidina maksimaliosios įtampos išvestinės dydį, tačiau šis padidėjimas nėra didelis, nes švytavimų dažnis grandinėje II (1.17 pav.) dėl didelio transformatoriaus induktyvumo yra kelis kartus mažesnis nei grandinėje I (ypač dėl skelto transformatoriaus antrinės apvijos ir talpos C_2). Be to, talpos C_3 įtampa turės tik nedidelę įtaką įtampos sumažėjimui esant induktyvumui L_3 . Todėl pagrindiniai parametrai, nusakantys maksimalios įtampos išvestinę, yra $U_{C_1,0}$ ir I_F . Gedimo vienoje fazėje atpažinimas nustatant gedimo vietą atliekamas lyginant sumodeliuoto tinklo ir užregistruotų pereinamojo vyksmo įtampos kreivių išvestinių reikšmes (1.19 pav.).



1.19 pav. Modelyje apskaičiuotų (A) ir eksperimentinių (B) pereinamųjų vyksmų įtampų aproksimacija [59]

1.2. Vyksmų modeliavimas teorine analize pagrįstais metodais

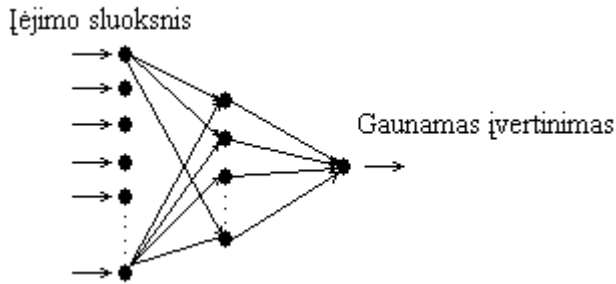
Teorine analize pagrįstus metodus galima suskirstyti į tris grupes:

- dirbtinio intelekto ir statistine analize pagrįsti metodai;
- įtaisų paskirstymu pagrįsti metodai;
- hibridiniai metodai.

Modernėjant kompiuterinėms technologijoms, skirstomajame tinkle gedimams vienoje fazėje atpažinti pradėti taikyti dirbtinio intelekto metodai, tokie kaip dirbtinis neuroninis tinklas (ANN) [64], neapibrėžtos logikos metodas (*Fuzzy Logic*) [65], ekspertinių sistemų (ES) [66, 67], genetinio algoritmo (GA) metodai [68], įvairūs tikimybinės analizės metodai [69] ir kt.

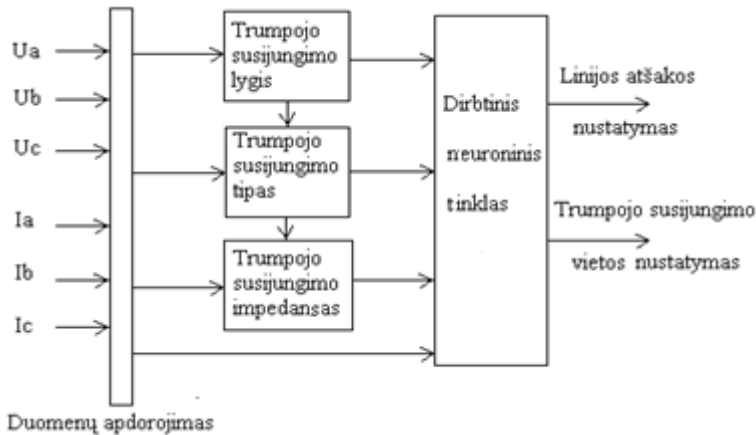
Daugiadiagramio padalijimo metodu minimalių pertvarkymų principu didelis skirstomasis elektros tinklas padalijamas į mažesnius. Tai leidžia greičiau nustatyti avarinę tinklo dalį ir, panaudojus neutralės tinklą bei įvertinus nueinančiųjų linijų įtampas reikšmes, jungtuvų padėtį, nueinančiųjų linijų realias galias normaliu ir avariniu darbo režimu, suformuoti neuroninį tinklą [70, 71]. Toliau atpažinti gedimui vienoje fazėje pritaikomas genetinio algoritmo (RGA) principas, kuris paremtas natūralios atrankos, geriausiojo išlikimo teorija.

Parametrinių metodų tikslumas sprendžiant gedimo vienoje fazėje atpažinimo uždavinius priklauso nuo linijų ilgio ir skirstomojo tinklo kompleksiskumo. Atpažinimo tikslumą galima padidinti skaičiavimus papildomai patikrinant kitu, pavyzdžiui, dirbtinio neuroninio tinklo [60, 72], metodu. Šiam metodui nereikia sprendinių tikslų algoritmų formuluočių, jame duomenys apdorojami remiantis įvairiomis vidinėmis priklausomybėmis. Analizuojant vienos fazės gedimo sukkelto pereinamojo vyksmo pobūdį, įvertinamos dažninės amplitudės charakteristikos, slopinimo įtaka, jų priklausomybė nuo gedimo vienoje fazėje vietos [73]. Vienos fazės gedimo skirstomuosiuose elektros tinkluose atpažinimo uždavinių sprendimuose dažniausiai naudojama dirbtinio neuroninio tinklo rūšis, vadinama daugiasluksniu perceptronu, kurį sudaro pradinių duomenų įėjimo sluoksnis, vienas paslėptasis sluoksnis ir išėjimo sluoksnis (1.20 pav.). Pavyzdžiui, pradiniai duomenys gali būti užregistruoto pereinamojo vyksmo signalo diskrečiosios reikšmės.



1.20 pav. Daugiasluoksnio perceptrono struktūra [73]

Kabeliniam tinklui pasiūlytas atpažinimo metodas [64] paremtas prielaida, kad gedimo metu užregistruotų įtampų ir srovių reikšmių visuma suteikia informacijos apie gedimo vienoje fazėje vietą tinkle, t. y. išmatuotų įtampų ir srovių reikšmių struktūra yra svarbus gedimo požymis, kurį atpažinti gali specialiai suprojektuotas neuroninis tinklas (1.21 pav.). Daugelis pasiūlytų dirbtinio neuroninio tinklo metodų yra įvertinti [74] ir palyginti su diferencialinių lygčių ar bangelių transformacijų sprendiniais analizuojant pereinamuosius vyksmus tinkluose su izoliuotąja ar kompensuotąja neutrале. Šie įvertinimai parodo, kad dirbtinio neuroninio tinklo metodas yra tikslesnis tik esant labai nedidelėms trumpojo susijungimo varžoms. Esant didesnėms trumpojo susijungimo varžoms, metodo tikslumas padidėja vertinant tik neutralės įtampos pereinamųjų vyksmų harmonikų komponentus.



1.21 pav. Supaprastinta gedimo vienoje fazėje atpažinimo blokinė struktūra

Elektros skirstomojo tinklo dispečeriniam valdymui integruojant informacinę ir pastočių automatizavimo sistemas imtos kurti šiuolaikinės realiojo laiko duomenų surinkimo ir vertinimo sistemos, vadinamos automatizuotomis dispečerinio valdymo sistemomis (DMS) [75]. Pasinaudojant tinkle jau esančių įvairių matavimo ir registravimo įtaisų, relinės apsaugos terminalų duomenimis, esant pakankamam apdorojamų duomenų kiekiui, imtas spręsti ir gedimo vienoje fazėje atpažinimo

uždavins. Tai didelių investicijų nereikalaujantis sprendimo būdas, kurio pagrindas – apskaičiuotų ir išmatuotų gedimo vienoje fazėje srovių palyginimas. Elektros tinklo duomenų bazės informacinėje sistemoje laikomi duomenys leidžia atlikti trumpojo susijungimo srovės analizę įvertinant geografinę tinklo medžio struktūrą, grunto, oro sąlygų įvairovę, taip pat atlikti reikiamus tinklo perkmutavimus siekiant lokalizuoti tinklo atkarpą, kurioje įvyko vienos fazės gedimas. Automatizuotos dispečerinio valdymo sistemos, kaip komercinis produktas, yra įdiegtos daugelyje skirstomųjų elektros tinklų.

1.3. Pirmojo skyriaus analizės rezultatų apibendrinimas

Gedimams vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje atpažinti siūlomų naudoti technologijų analizė apėmė prieinamus ir įvairiais moksliniais ir technologiniais sprendimais grindžiamus metodus, kurie įvairuoja pagal analizei turimą ir naudojamą informaciją.

Pateiktas gedimo vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje atpažinimo uždavinio sprendimo metodikas, neatsižvelgiant į elektros tinklo paskirtį, tinklo neutralės sujungimo su žeme tipą, galima suskirstyti į dvi grupes: metodus, kurie paremti centralizuotu duomenų surinkimu ir apdorojimu, ir metodus, kurių pagrindą sudaro lokaliai užregistruotų matavimų analizė.

Būtinumas atsinaujinančią energiją naudojančius nedidelės galios nepastoviai generuojančius šaltinius prijungti prie elektros skirstomojo tinklo iškelė skirstomajam elektros tinklui naujų ekonominių ir techninių reikalavimų. Vienas pagrindinių techninių reikalavimų yra greitas gedimų tinkle identifikavimas ir lokalizavimas.

Daugiau nei 90 % visų elektros skirstomojo tinklo linijose pasitaikančių gedimų sudaro gedimai vienoje elektros tinklo fazėje.

Metodų, paremtų centralizuotu duomenų surinkimu ir apdorojimu bei lokaliai užregistruotų duomenų analize, taikymas neduoda užtektinai tikslų gedimo vietos nustatymo rezultatų arba dėl būtino labai didelio kiekio išėties duomenų apdorojimo gedimo atpažinimas trunka labai ilgai.

Metodais, kuriais modeliuojami ir nagrinėjami elektromagnetiniai pereinamieji vyksmai, užregistruoti žemojo ir vidutinio dažnio diapazonuose, skaičiuojama ilgai, gaunamos didelės skaičiavimo paklaidos, todėl gedimo atpažinimas yra netikslus.

1.4. Autoriaus indėlis

Išnagrinėtos užsienio ir Lietuvos autorių publikacijos, kuriose aprašomos įvairios gedimų vietos nustatymo vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje metodikos. Kaip parodė analizė, siūlomoms metodikoms taikyti reikia arba sinchroniškai matuoti sroves ir įtampas įvairiuose elektros tinklo mazguose, o matavimų rodmenis perduoti skaičiavimo centrui, nors tai yra brangu ir sunkiai įgyvendinama, ar atliekant ilgai trunkančius skaičiavimus kintamuosius elektros tinklo parametrus pakeisti stacionariaisiais, nors tai lemia labai dideles paklaidas.

Buvo iškeltas tikslas supaprastinti skaičiuojamąją elektros skirstomojo tinklo schemą, sukurti atitinkamus modelius, kurie leistų adaptuoti ir optimizuoti elektros tinklo schemas elementų parametrus, turinčius įtakos tiksliam ir greitam gedimo

vietos vienoje skirstomojo elektros tinklo fazėje nustatymui, taikant greitųjų elektromagnetinių pereinamųjų vyksmų modeliavimo technologiją.

Darbo tikslui pasiekti eksperimentiškai buvo tiriami:

- gedimai vienoje linijos fazėje įvairiu atstumu nuo linijos pradžios 10 kV ir 15 kV elektros skirstomuosiuose tinkluose su kompensuotąja neutrale;
- gedimai vienoje linijos fazėje įvairiu atstumu nuo linijos pradžios 15 kV elektros skirstomuosiuose tinkluose su izoliuotąja neutrale.

Nustatyta, kad registracijų informatyvumas priklauso nuo matuojamų parametru registracijos dažnio.

Ištirti gedimo vienoje elektros oro linijos fazėje sukeltų greitųjų elektromagnetinių vyksmų modelio parametrai.

Autoriaus sukurtas gedimo sudėtingos elektros oro linijos vienoje fazėje sukeltų greitųjų elektromagnetinių vyksmų supaprastintas modelis, taip pat sukurtas gedimo vietos vienoje elektros skirstomojo tinklo linijos fazėje mazgo modelis bei sukurtas gedimo vietos vienoje elektros skirstomojo tinklo linijos fazėje greitųjų elektromagnetinių vyksmų modelių struktūros leidžia:

- įvertinti užregistruotus aukštuoju diskrečiuoju dažniu matuojamus parametrus, kuriuose atsispindi greitai gęstančios dedamosios, priklausančios nuo gedimo vietos linijoje;
- įvertinti įvairių disipacinių ir dispersinių vyksmų įtaką, kad elektros linijos ir gedimo vietos toje linijoje modeliuose pakankamai tiksliai atsispindėtų tikrame skirstomajame elektros tinkle vykstantys procesai;
- nustatyti gedimo vietą per trumpą laiko tarpą – tai yra svarbi sąlyga sprendžiant gedimų vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje vietos praktinio nustatymo uždavinį.

Autoriaus indėlis – visi eksperimentais gauti duomenys, pereinamųjų vyksmų įvykus vienos fazės gedimui modelių tyrimų rezultatai, sudaryti greitųjų vyksmų atpažinimo modeliai ir jų pagrindu sukurta gedimo vienoje fazėje vietos radimo metodika.

Tyrimų metodika aprašyta disertacijos antrajame skyriuje, tyrimų rezultatai apibendrinti ir pateikti trečiajame skyriuje. Priede pateiktos gedimų sukeltų greitųjų pereinamųjų vyksmų registracijos.

2. DARBO METODIKA. GREITŪJŲ ELEKTROMAGNETINIŲ VYKSMŲ MODELIŲ GEDIMO VIENOJE FAZĖJE VIETAI NUSTATYTI TYRIMAS

Trumpasis aukštosios įtampos linijos fazės susijungimas su įžemintais objektais, atramų armatūros detalėmis ar greta augančių medžių šakomis (vienos fazės gedimas) įvyksta per elektros išlydį, kai žaibo viršįtampis viršija izoliacijos elektrinio atsparumo likutį, o šakai prisilietus – kai linijos fazės įtampos momentinė reikšmė pasiekia reikšmę, artimą amplitudinei. Tai gerai iliustruoja ir patvirtina tokių avarinių vyksmų registracijos veikiančiuose tinkluose (žr. priedą).

Atsitiktinis vienos fazės gedimas dėl didelių pradinių įtampos reikšmių pokyčio elektros tinkle sukelia aštrų pereinamąjį vyksmą, kurio analizė leidžia nustatyti gedimo vienoje fazėje vietą bei tam tikrus tinklo ypatumus. Tikslinga tyrime įvertinti grunto po linija specifines varžas, prie linijos prijungtų įrenginių elektrines talpas ar net tinklo konfiguraciją.

Atpažinimo metodikų pagrindą sudaro technologijos, kai vienokiu ar kitokiu būdu registruoti arba išmatuoti elektriniai parametrai lyginami su modelio parametrais arba naudojant matematinės modeliavimo lygtis [76]. Kuo modelis tiksliau atspindi tinkle vykstančius vyksmus, tuo atpažinimas yra tikslesnis. Todėl svarbu, kad modelis atkartotų vyksmus kiek galima adekvačiau.

Pradiniai vyksmai susiformuoja iš greičiau ar lėčiau užgesstančių dedamųjų. Kuo daugiau dedamųjų dalyvauja analizėje, tuo tikslesnis vyksmo vaizdas pateikiamas. Greitųjų elektromagnetinių vyksmų modelis yra toks, kuriame atsispindi ir greitai gęstančios vyksmo dedamosios (žr. priedą, 9 pav.).

Greitųjų vyksmų modeliavimo metodika turi pranašumų: yra informatyvesnė nei metodikos, kurios paremtos iš dalies ar visiškai užgesusių vyksmų pereinamųjų dedamųjų modeliavimu, yra ne tokia svarbi netiesinių elektros tinklo parametrų įtaka, turi palankesnę tiesiškumo savybę atpažinimui optimizuoti.

2.1. Elektros oro linijos greitųjų elektromagnetinių vyksmų modelio parametrai

Elektros oro linijos parametrų (konstrukcinių ir elektrinių) matricos pagrindinėje ir šoninėse įstrižainėse turi nevienodas elementų reikšmes. Todėl modeliuojant įprastinius pereinamuosius ir stacionarius vyksmus plačiai naudojamų simetrinių [31] ar Klarko dedamųjų [77] taikymas greitųjų vyksmų analizėje jų suformuotose sekose gali sumažinti atpažinimo tikslumą.

Giluminiai elektrinių laukų srautai žemės grunte po linijomis dar labiau sumažina tikslumą taikant konvencionalius vyksmų transformavimo į sekas metodus [78]. Dėl giluminių laukų induktyviųjų savitųjų parametrų matricos pasidaro nebe panašios į talpinių parametrų matricas, o linijoje plintančias paviršines elektromagnetines bangas papildo skersine linijai kryptimi plintantys laukai [79].

Tikslinga greituosius vyksmus linijose transformuoti į sekas, pritaikytas prie tinklo naudojamų linijų rūšių. Atskirais atvejais skirtingoms elektros linijoms gali reikėti naudoti tik joms būdingas transformacijas ir linijų lygtis.

Pereinamojo vyksmo metu elektrinių laukų srautai žemės grunte keičia gylį ir formą pagal tai, kaip greitai gęsta įvairių dažnių lauko dedamosios. Modelyje tai atsispindi linijos banginių parametų kaita. Priartinant modelį prie greitųjų vyksmų linijoje reikia pasiekti tinkamą šių parametų įvertinimą.

Kuriant modelį gedimams vienoje elektros tinklo fazėje atpažinti darbe atlikti tyrimai 10 ir 20 kV tinkluose. Šių įtampų tinklai iš skirstomųjų tinklų yra patys problemiškesni, nes dažnai yra labiausiai išsišakoję, didžioji dalis jų yra kompensuoti. Tokio tipo tinkle gedimo vienoje fazėje vietą nustatyti matuojant stacionariųjų režimų sroves ir įtampas yra beveik neįmanoma.

Greitųjų vyksmų modeliavimo metodikos laiko dimensijoje pagrindu yra laikomos d'Alamberto lygtys [80]. Idealizuojant vyksmus tik paviršinių bangų linijoje modeliu bei nevertinant disipacinių elektromagnetinio lauko sklaidos reiškinių laiduose ir žemės grunte lygtys (simetrinėse ar Klarko sekose) turi pavidalą:

$$\begin{cases} U + wI = 2U^+ \\ U - wI = 2U^- \end{cases}; \quad (38)$$

čia U^+ ir U^- – atplitusių ir atsispindėjusių įtampos bangų sekose reikšmių vektoriai-matricos stulpeliai; U ir I – įtampų ir srovių, įtekančių į bangų lūžimo vietą, linijoje sekų vektoriai; w – banginių varžų sekose diagonalioji matrica.

(38) lygtis Klarko $v \in (\alpha \beta 0)$ koordinatėse tiesinės transformacijos būdu gaunama pasitelkus modalinę matricą [81]:

$$T_c = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -0,5 & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -0,5 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{pmatrix}. \quad (39)$$

Taip, pavyzdžiui, fazinės įtampos ir srovės reikšmių matricas su sekų matricomis sieja lygybės:

$$\begin{cases} U_f = T_c U \\ I_f = T_c I \end{cases}; \quad (40)$$

čia U_f ir I_f – fazinių įtampos ir srovės reikšmių matricos.

Banginių varžų linijoje kvadratinę matricą su diagonaliaja banginių varžų matrica Klarko koordinatėse sieja priklausomybė:

$$w_f = T_c w T_c^{-1}. \quad (41)$$

(38) banginių lygčių gavimas Klarko transformacijos būdu priimtinas lėtųjų vyksmų analizei tiriant elektromechaninius pereinamuosius vyksmus, kuriuos sukelia nesimetriniai trumpieji susijungimai tinkle, arba viršįtampių deterministinio pobūdžio studijose, nereikalaujančiose didelio rezultatų tikslumo. Tačiau, užregistruotų vyksmų tinkle norint gauti neiškreiptą elektromagnetinių vyksmų vaizdą, reikia siekti kiek galima didesnio tikslumo ir adekvatumo. Tiesioginis (39)

matricos taikymas aukštosios įtampos linijoms sukelia neleistinai didelius nukrypimus procesų vyksmo skaičiavimuose dėl dviejų priežasčių:

- (41) priklausomybėje matrica w yra nediagonalioji oro linijos atveju, todėl taikant šią transformaciją paprastai daroma prielaida, kad matricos w nepagrindinės įstrižainės narių reikšmės yra nulinės;
- dėl žemės grunto, linijos laidų bei kabelio apvalkalo riboto specifinio laidumo (40) priklausomybėse įtampos bei srovės matricoms yra suformuojamos skirtingos modalinės matricos ir, be to, jų elementų dydis priklauso nuo vyksmo dažnių.

Taikant greitųjų vyksmų modeliavimo metodiką, gedimams vienoje elektros tinklo fazėje atpažinti analizuojama kintamųjų parametru trukmė – tik dešimtys mikrosekundžių, todėl tiksliam modeliavimui taikytinas dažnių spektras yra daugiau nei dešimtys kilohercų. Šioje spektro dalyje modalinių matricų priklausomybė nuo dažnio yra mažesnė. Daugeliu atvejų konkrečiame tinkle linijų laidų išdėstymas yra geometriškai panašus, linijos specifinių elektrinių parametru matricos yra taip pat panašios (modalinės matricos vienodos). Šios dvi priežastys leido surasti linijų lygtis greitųjų vyksmų modeliui, kuris tiksliau atitinka tikruosius vyksmus.

Banginius parametrus lemia linijos savitieji laidžiai ir pilnutinės varžos. Savitieji parametrai telegrafinėmis lygtimis sieja įtampas ir srovės linijos laiduose. Savitieji laidžiai ir pilnutinės varžos didėja augant srovių dažniui, todėl telegrafines lygtis tikslinga aprašyti kompleksinėje erdvėje fiksuotam kampiniam dažniui ω :

$$\begin{cases} -\frac{d}{dx}U_f = Z_f I_f \\ -\frac{d}{dx}I_f = Y_f U_f \end{cases}; \quad (42)$$

čia U_f ir I_f – linijos fazinių įtampų ir srovių kompleksinių reikšmių x koordinatėje matricos vektoriai-stulpeliai; Z_f ir Y_f – linijos savitųjų pilnutinių varžų ir laidžių x koordinatėje kvadratinės matricos.

Savituosius linijos laidžius Y_f nusako linijos skersinės talpos. Šie netgi esant dažniui, artimam pramoniniam, beveik nepriklauso nuo dažnio kaitos, todėl aukštųjų dažnių sričiai greitųjų vyksmų modeliui tikslinga taikyti prielaidą, kad linijos laidžius visiškai nusako linijos laidų geometriniai parametrai:

$$Y_f = j2\pi\varepsilon\omega N^{-1}; \quad (43)$$

čia ε – oro dielektrinė konstanta, $\varepsilon = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9}$ F/m;

$$N = (N_{ik});$$

$$\begin{cases} N_{ik} = \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}, \\ N_{ii} = \ln \frac{2h_i}{r_i} \end{cases}; \quad (44)$$

čia r_i – i -ojo laido fazėje spindulys; h_i – i -ojo laido aukštis virš žemės; d_{ik} – atstumas tarp i -ojo ir k -ojo laidų;

$$D_{ik} = \sqrt{d_{ik}^2 + 4h_i h_k}.$$

Savitąsias pilnutines varžas Z_f nusako savitieji induktyvumai dėl magnetinių srautų ore, laiduose ir žemės grunte [82]:

$$\begin{cases} Z_f = j\omega \frac{\mu}{2\pi} N_L \\ N_L = N + M + F \end{cases} \quad (45)$$

čia μ – oro magnetinės skvarbos konstanta, $\mu \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m; M – diagonalioji matrica faktorių, kuriuos suformuoja magnetiniai srautai linijos laiduose; F – kvadratinė matrica faktorių, kuriuos suformuoja magnetiniai srautai grunte; N – linijos laidų geometrinių parametrų matrica.

Šių matricų faktorių-elementų dydžiai (moduliai) dėl paviršinio efekto tolygiai nyksta didėjant vyksmo dažniui, todėl matricos N_L elementai artėja prie matricos N elementų reikšmių.

Atramai, prie kurios linijoje įvyksta gedimas vienoje fazėje, rasti reikia kuo tikslesnių matavimų bei adekvatesnio modeliavimo aukštųjų dažnių diapazone, didesniame nei 100 kHz. Žemesnių dažnių vyksmai yra ne tokie informatyvūs, ir analizė ne tokia tiksli. Palanku yra tai, kad aukštesniųjų dažnių srityje matricos N_L elementai mažiau priklauso nuo dažnio. Toks sąlyginis matricos invariantiškumas dažnio atžvilgiu leidžia unifikuoti, supaprastinti ir gauti tikslesnio modelio struktūrą. 2.1 lent. parodyta, kaip kinta matricų N_L norma keičiantis dažniui, kai kinta žemės grunto varža ir linijų tipai yra skirtingi. Iš lentelės matyti, kad dažniui išaugus 100 kartų nuo 100 Hz normos pakinta apie 40 procentų, o aukštųjų dažnių srityje dažniui išaugus 100 kartų nuo 0,1 MHz pakinta apie 12–20 procentų.

2.1 lent. pateikti duomenys yra rasti tipiniams tarpstiebių atstumams bei linijų laidų išdėstymams atramos (2.2 pav.) euklidinės normos skaičiavimo būdu:

$$norma = \sqrt{\sum_{\forall i,k} |N_L(i,k)|^2}. \quad (46)$$

2.1 lentelė. Matricų N_L normos priklausomybė nuo vyksmo dažnio

Linijos kategorija	Grunto savitoji varža, Ωm	Vyksmo dažnis					
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
		kHz			MHz		
10 kV linija su lygiašonių trikampių išdėstytais laidais	100	25,58	21,64	18,32	15,83	14,42	13,87
	300	27,15	23,19	19,71	16,85	14,95	14,06
	1000	28,89	24,93	21,35	18,21	15,79	14,41
	3000	30,49	26,54	22,90	19,60	16,82	14,93
20 kV linija su portalinio tipo atramomis	100	25,03	21,09	17,80	15,36	14,02	13,51
	300	26,60	22,63	19,17	16,36	14,51	13,68
	1000	28,34	24,37	20,80	17,69	15,32	14,01
	3000	29,94	25,97	22,34	19,06	16,32	14,50

Yra žinoma, kad jei matricos su skirtingais elementais turi tą pačią modalinę matricą, tokios matricos vadinamos panašiomis; jeigu skirtingų matricų modalinės matricos savo struktūra bei elementų dydžiais yra artimos, tai matricos yra artimai panašios. Kiek jos yra artimai panašios, galima apibūdinti matricų skirtumo norma. Elektromagnetinių vyksmų modelis yra geresnis, kai tinklo linijų parametrų matricos yra artimai panašios. Tada galima pasiekti tikslesnių modeliavimo rezultatų bei supaprastinti bendrąjį analizės algoritmą.

Pavyzdžiui, jeigu tinklas yra sudarytas tik iš trigyslių kabelių, linijos talpų matricoms galima rasti modalias matricas, artimas Klarko matricai (39). Kabelių talpų matrica artimai panaši į specifinės struktūros matricą:

$$A = \begin{pmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{pmatrix} \text{ ir } T_c A T_c^{-1} = \begin{pmatrix} a-b & 0 & 0 \\ 0 & a-b & 0 \\ 0 & 0 & a+2b \end{pmatrix}.$$

Bandymo diagonalizuoti 20 kV linijos su horizontaliai išdėstytais laidais matricą N_L , kai dažnis $f = 1$ MHz ir grunto savitoji varža $\rho = 100 \Omega\text{m}$, rezultatas:

$$T_c N_L T_c^{-1} = \begin{pmatrix} 5,9437 - j0,0159 & 0,3980 - j0,0007 & -0,2298 - j0,0004 \\ 0,3980 - j0,0007 & 5,4841 - j0,0151 & 0,3980 - j0,0007 \\ 0,1149 + j0,0002 & 0,1990 - j0,0003 & 13,9952 - j0,6032 \end{pmatrix}.$$

Rezultato artimumą diagonaliajai matricai galima įvertinti procentine paklaida: palyginus rezultatų skirtumą su pagrindinės įstrižainės elementais, procentiniu (42) normų santykiu:

$$\Delta = 100 \frac{|T_c N_L T_c^{-1} - \text{diag}(T_c N_L T_c^{-1})|}{|\text{diag}(T_c N_L T_c^{-1})|}, \% \quad (47)$$

Skaičiuojant pagal šią formulę gaunama 4,69 % paklaida, kuri tolimoms gedimo vienoje fazėje vietoms nustatyti gali būti neleistinai per didelė.

Adekvatumui pagerinti yra tikslinga (38) ir (42) lygtis atvaizduoti modomis, kuriose pilnutinių varžų ir laidžių matricos turėtų minimalias šalutinių įstrižainių elementų reikšmes. Tam (42) lygtis tikslinga perrašyti panaudojant modalines matricas, kurios diagonalizuoja elektromagnetinių bangų sklidimo pastoviųjų matricą:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dx^2} T_u^{-1} U_f = T_u^{-1} (Z_f Y_f) T_u T_i^{-1} U_f \\ \frac{d^2}{dx^2} T_i^{-1} I_f = T_i^{-1} (Y_f Z_f) T_i T_u^{-1} I_f \end{cases}; \quad (48)$$

čia $T_u^{-1} (Z_f Y_f)$, $T_u = T_i^{-1} (Y_f Z_f)$, $T_i = \Gamma^2$; Γ – diagonalioji sklidimo pastoviųjų matrica koordinatėse, kurias suformuoja modalinės matricos T_u ir T_i :

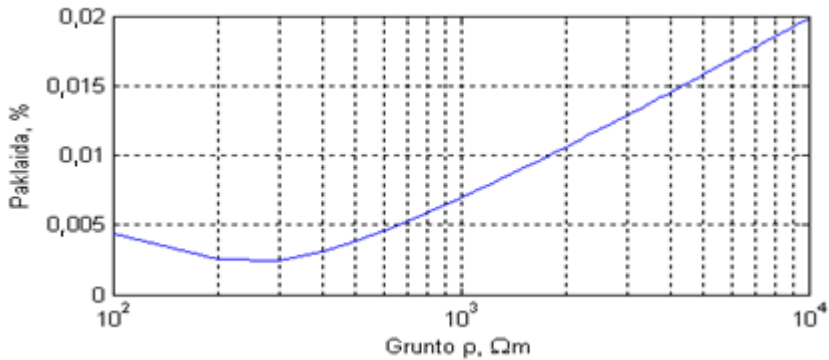
$$\begin{cases} U_f = T_u U \\ U_f = T_i I_f \end{cases} \quad (49)$$

Šios modalinės matricos ypatingos dar ir tuo, kad diagonalizuoja matricas Z_f ir Y_f :

$$\begin{cases} Z = T_u^{-1} Z_f T_i \\ Y = T_i^{-1} Y_f T_u \end{cases}; \quad (50)$$

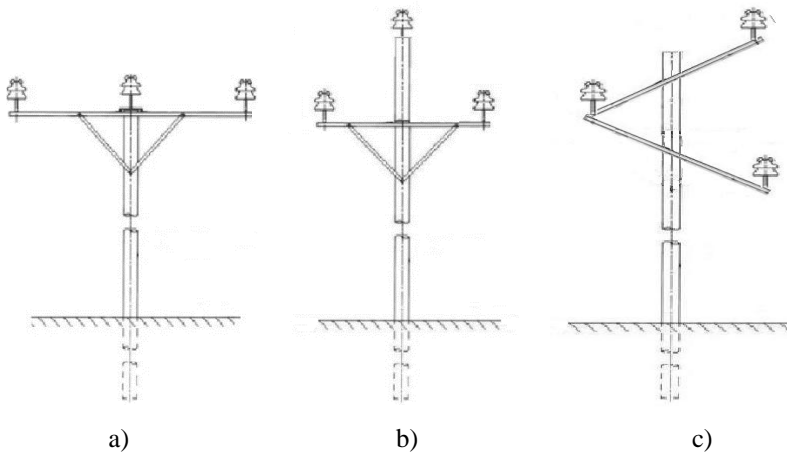
čia Z ir Y – diagonaliosios savitųjų pilnutinių varžų ir laidžių matricos modalinėse sekose.

Modeliuojant vyksmus laiko dimensijoje vyksmai yra daugiadažniai, todėl būtų patogu sklidimo pastoviųjų matricos Γ diagonalizavimą atlikti modaline matrica, rasta esant vienam konkrečiam atraminiam dažniui f_0 ir naudojant tik realiųjų skaičių matricos dalį. Be to, yra tikslinga turėti modelį, kuris priimtinu tikslumu modeliuotų vyksmus plačiame dažnių diapazone. Analizė rodo, kad gedimui oro linijų tinkle atpažinti optimalu naudotis atraminio dažniu $f_0 = 23$ kHz. Diagonalizavimo tikslumui, be kitų veiksmų, įtaką daro ir žemės grunto varža. Tai iliustruoja 2.1 pav. pateikta diagonalizavimo paklaidų kreivė. Kreivė gauta grunto varžą keičiant plačiose ribose, kai dažnis $f = 23$ kHz, diagonalizuojant realiųjų skaičių atraminio dažnio modaline matrica $\widetilde{T}_u = \text{real}(T_u)$ arba $\widetilde{T}_i = \text{real}(T_i)$. Pasirinktas parametru požiūriu nehomogeniškausias laidų išdėstymas (horizontalusis). Iš 2.1 pav. matyti, kad diapazone iki 3000 Ωm varžos (tikrovėje egzistuojančiomis sąlygomis) didžiausia paklaida yra esant didesnėms varžoms (artimoms 3000 Ωm). Todėl sklidimo pastoviųjų diagonalizavimo su priimtomis atraminėmis modalinėmis matricomis \widetilde{T}_u arba \widetilde{T}_i kokybei nustatyti atlikti skaičiavimai esant 3000 Ωm savitajai grunto varžai. 2.2 lent. yra pateiktos procentinės sklidimo pastoviųjų diagonalizavimo su priimtomis matricomis \widetilde{T}_u arba \widetilde{T}_i ir Klarko matrica T_c paklaidos įvairiems laidų linijoje išdėstymo atvejams.



2.1 pav. Sklidimo pastoviųjų matricos diagonalizavimo procentinių paklaidų priklausomybė nuo grunto varžos

Sklidimo pastoviųjų matricos diagonalizavimo paklaidos naudojant modalines matricas \tilde{T}_u arba \tilde{T}_l neviršija 2 procentų žemųjų dažnių diapazone. Paklaidos 0,1–10 MHz diapazone, kuris yra informatyviausias greitiesiems vyksmams atpažinti, nesiekia 0,2 procento. 2.2 lent. pateiktos paklaidos naudojant Klarko modalinę matricą yra didesnės, tačiau taip pat modeliui priimtinos. Tačiau yra būtina nustatyti, ar modelio suprastinimas panaudojant konvencionalią diagonalizavimo matricą yra tinkamas banginėms varžoms rasti.



2.2 pav. Linijos laidų išdėstymas: a) lygiagrečiai su žeme; b) lygiašonio trikampio forma; c) įvairiakraščio trikampio forma

2.2 lentelė. Sklidimo pastoviųjų matricos diagonalizavimo procentinės paklaidos

Modalinės matricos	Linijos laidų išdėstymas	Vyksmo dažnis					
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
		kHz			MHz		
\widetilde{T}_u ir \widetilde{T}_l esant 23 kHz	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	1,2565	0,2204	0,0530	0,0206	0,0176	0,0104
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,3773	0,0686	0,0392	0,0628	0,0913	0,0731
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,6683	0,1591	0,0928	0,1446	0,2068	0,1640
T_c	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	3,1054	1,4910	1,1366	0,8269	0,5111	0,2458
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,5758	0,5262	0,4880	0,4280	0,3277	0,1907
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,6238	0,4898	0,4541	0,4031	0,3131	0,1841

Banginių varžų diagonaliąją matricą galima rasti taip:

$$w = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} (T_u^{-1} \text{real} ((N_L + N)N^{-1})T_u)^{-0,5} T_u^{-1} \text{real} (N_L + N) T_l. \quad (51)$$

Naudojant realiųjų skaičių matricas \widetilde{T}_u ir \widetilde{T}_l vietoje kompleksinių skaičių (matricų T_u ir T_l) atsiranda nenuliniai nepagrindinių įstrižainių elementai, dėl to skaičiuojant modelyje atsiranda paklaidų. 2.3 lent. yra pateiktos diagonalizavimo paklaidos atvejams, atitinkantiems parinktuosius (2.2 lent.).

2.3 lentelė. Banginių varžų matricos diagonalizavimo procentinės paklaidos

Modalinės matricos	Linijos laidų išdėstymas	Vyksmo dažnis					
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
		kHz			MHz		
\widetilde{T}_u ir \widetilde{T}_l esant 23 kHz	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	0,0024	0,0384	0,0018	0,0101	0,0057	0,0026
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,1888	0,0751	0,0085	0,0287	0,0204	0,0067
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,1996	0,0807	0,0073	0,0361	0,0263	0,0122
T_c	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	3,1746	3,3929	3,6542	3,8978	4,0538	4,1193
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,5009	0,5396	0,6011	0,6969	0,7926	0,8427
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,5913	0,6356	0,6984	0,7824	0,8621	0,9038

Lyginant konvencinio ir netipinio metodų taikymo rezultatus matyti didžiulis skirtumas, siekiantis net dešimtis kartų. Žinant, kad banginių varžų matricos lemia įtampų ir srovių pasiskirstymą tarp laidų, modalinių matricų \widetilde{T}_u bei \widetilde{T}_l panaudojimas lemia didelį pasiskirstymo tikslumą (paklaidos yra šimtųjų procento eilės dydžiai) ir yra priimtinas greitųjų vyksmų atpažinimo technologijose.

2.2. Oro linijos greitųjų vyksmų modelio struktūra

Banginės linijos (38) lygtys neatspindi disipacinių bei dispersinių elektromagnetinių bangų, plintančių linija, reiškinių. Kintant harmoninio vyksmo dažniui tiek sklidimo pastoviosios, tiek banginės varžos kinta. Didėjant dažniui sklidimo pastoviųjų ir banginių varžų absoliučiosios reikšmės mažėja. Tokios kaitos įtaką daugiadarmonių vyksmų visumoje, kurią suformuoja pradinis pereinamojo vyksmo etapas, reikia tinkamai parodyti linijos modelio struktūroje.

2.2.1. Banginių linijos varžų kaita

Sudėtingos daugiašakės konfigūracijos skirstomojo tinklo modeliui dėl algoritminio paprastumo yra priimtinausias linijų lygčių struktūros, artimos banginėms (38) lygtims, kai elektromagnetinių bangų plitimas modeliuojamas vėlinimo funkcijomis. Priiartinumą lemia ir tai, kad pagrindinę šių bangų dalį linijoje sudaro slopstančios paviršinės bangos, kurias galima aprašyti (38) lygtimis su bangų slopimo korekcija.

Kad būtų galima nustatyti, kokią įtaką srovių ar įtampų pasiskirstymui laiduose turi menamoji diagonalizuotų banginių varžų matricos dalis, atliekamas tyrimas pakeičiant bangines varžas jų absoliučiosiomis vertėmis. Paklaidos įvertinamos nediagonalinių elementų skirtumu tarp absoliučiąjų dydžių matricos, rastos pagal (51) lygtį, ir matricos, gautos panaudojus modalines matricas \tilde{T}_u bei \tilde{T}_l . Be to, šis skirtumas yra transformuojamas į fazines koordinates, o tai lemia tikresnę įtakos faziniams parametrų vaizdą. Panaudota tokia paklaidų skaičiavimo formulė:

$$\Delta_1 = 100 \frac{|\tilde{T}_i^{-1} [\text{abs}(w - \text{diag}(w)) - (\tilde{w} - \text{diag}(\tilde{w}))] \tilde{T}_u^{-1}|}{|\tilde{T}_i^{-1} \text{abs}(w) \tilde{T}_u|}, \% \quad (52)$$

Skaičiavimo rezultatai atvejams, atitinkantiems parinktuosius (2.2 lent.), yra pateikti 2.4 lent.

2.4 lentelė. Banginių varžų matricos diagonalizavimo procentinės paklaidos dėl menamosios dalies ignoravimo

Modalinės matricos	Linijos laidų išdėstymas	Vyksmo dažnis					
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
		kHz			MHz		
\tilde{T}_u ir \tilde{T}_l esant 23 kHz	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	0,0274	0,0476	0,0035	0,0124	0,0114	0,0062
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,1147	0,0536	0,0108	0,0409	0,0700	0,0515
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,1274	0,0654	0,0212	0,0484	0,0791	0,0593
T_c	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	2,6641	2,7205	2,9248	3,1538	3,3880	3,5739
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,4440	0,4680	0,4971	0,5417	0,6139	0,7059
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,5424	0,5801	0,6203	0,6743	0,7494	0,8381

Gautieji rezultatai rodo, kad, naudojant adekvačiąsias modalias matricas \widetilde{T}_u bei \widetilde{T}_l , paklaidos dėl banginių varžų matricoje elementų menamosios dalies ignoravimo sudaro tik šimtąsias procento dalis visame plačiame dažnių diapazone nuo 100 Hz iki 10 MHz.

Adekvačiųjų modalinių matricų panaudojimo tikslingumą patvirtina skaičiavimo rezultatų suminių paklaidų tyrimas. Skaičiavimo rezultato paklaidą sudaro paklaida dėl netikslaus diagonalizavimo bei paklaida dėl menamųjų matricos elementų ignoravimo. 2.5 lent. pateikiamos suminės paklaidos, įvertintos taip:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}; \quad (53)$$

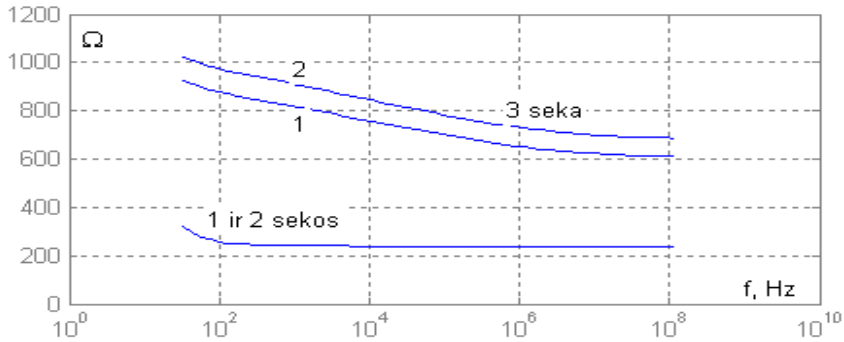
čia Δ_1 – paklaida dėl menamųjų matricos elementų ignoravimo, rasta pagal (51) formulę; Δ_2 – paklaida dėl netikslaus matricos diagonalizavimo.

Nestacionariojo pereinamojo vyksmo srovių kaita laiko dimensijoje reikalauja diagonalizuotoje (38) lygtyje ωI sandaugą pakeisti į banginių varžų pereinamųjų charakteristikos funkcijų ir srovių vyksmo sąsūką. Pereinamąsias charakteristikų funkcijas galima surasti iš banginių varžų dažniųjų charakteristikų, jas transformavus į laiko dimensijos funkcijas.

2.5 lentelė. Banginių varžų diagonaliosios matricos skaičiavimo rezultatų procentinės paklaidos

Modalinės matricos	Linijos laidų išdėstymas	Vyksmo dažnis					
		0,1	1,0	10	0,1	1,0	10
		kHz			MHz		
\widetilde{T}_u ir \widetilde{T}_l esant 23 kHz	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	0,0382	0,0676	0,0049	0,0175	0,0161	0,0088
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,1622	0,0758	0,0153	0,0580	0,0996	0,0736
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,1814	0,0926	0,0300	0,0685	0,1121	0,0840
T_c	Lygiagrečiai su žeme (2.2 pav., a)	3,9441	4,1099	4,4050	4,7411	5,0872	5,3605
	Lygiašonio trikampio formos (2.2 pav., b)	0,6408	0,6754	0,7181	0,7846	0,8927	1,0310
	Įvairiakraščio trikampio formos (2.2 pav., c)	0,7670	0,8159	0,8724	0,9485	1,0540	1,1783

2.3 paveiksle parodyta diagonalizuotų banginių varžų priklausomybė nuo dažnio kreivės, kuri gauta naudojant adekvačiąsias modalias matricas, rastas esant 23 kHz dažniui. Atvejai atspindi tipinio skirstomojo tinklo linijų banginių varžų kitimo pobūdį visose trijose sekose, kai laidai linijoje išdėstyti: lygiašonių trikampių (1 kreivė) ir lygiagrečiai su žemės paviršiumi (2 kreivė).



2.3 pav. Sekų banginės varžos realiosios dalies priklausomybė nuo dažnio; 1-oji 3-iosios sekos kreivė – linijoje laidai išdėstyti lygiašonių trikampių, 2-oji 3-iosios sekos kreivė – linijoje laidai išdėstyti lygiagrečiai su žemės paviršiumi

2.3 paveiksle matyti, kad dviejų pirmųjų sekų banginės varžos dažnių diapazone nuo 10 kHz yra pastovios. Tai ryškus greitųjų vyksmų analizės pranašumas, nes nereikalauja banginių varžų korekcijos laiko dimensijoje. 3-iosios sekos banginių varžų kitimas yra vienodo pobūdžio ir todėl palengvina aproksimaciją pagal vieną standartizuotą kreivę. Suprantama, kad analizės tikslumui padidinti gali būti tikslinga laiko dimensijoje atlikti šios sekos banginių varžų korekciją funkcijų sąsūkos būdu. Tam dažninė funkcija konvertuojama į laiko funkciją. Konversija atliekama artutiniu skaitmeniniu būdu reikiamam laiko intervalui randant Melino integralo reikšmes:

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re} D(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega; \quad (54)$$

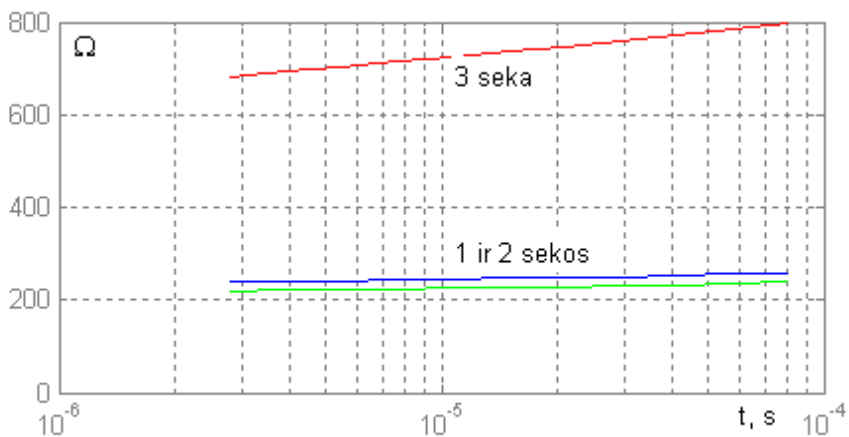
čia $D(\omega)$ – konvertuojama kompleksinė dažninė funkcija; $h(t)$ – pereinamoji charakteristika, naudotina sąsūkai.

Konversijai yra panaudota tiesinė funkcijos aproksimacija trumpomis atkarpomis taikant laiko funkcijos pokyčių šių atkarpų žingsnyje skleidimą polinomu [83]:

$$dh(t) = \frac{2}{\pi} (R(\omega_1) - R(\omega_2)) \left[\frac{\omega_2}{\omega_2 - \omega_1} \operatorname{Si}(\omega_2 t) - \frac{\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \operatorname{Si}(\omega_1 t) + \frac{\cos \omega_2 t - \cos \omega_1 t}{(\omega_2 - \omega_1)t} \right]; \quad (55)$$

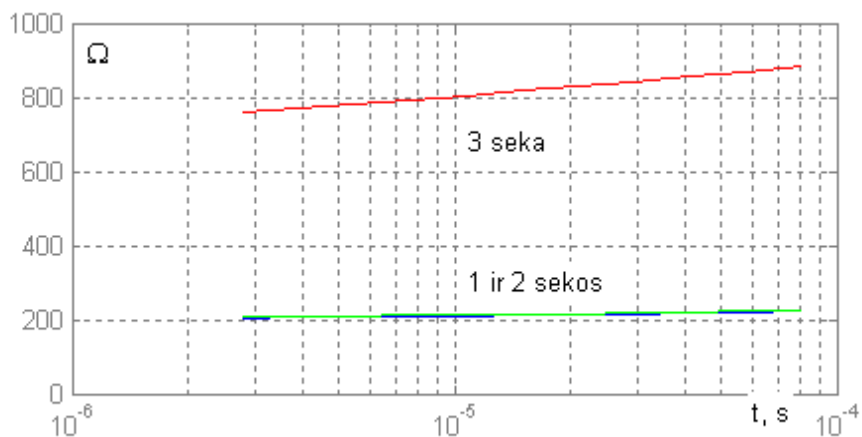
čia $R(\omega) = \operatorname{Re} w(\omega)$ – realioji dažninės funkcijos dalis; $\omega = 2\pi f$, ω_1 ir ω_2 – kampinių dažnių atkarpos pradžios ir galo reikšmės esant dažniams f_1 ir f_2 , Si – integralinio sinuso funkcija.

2.4 ir 2.5 paveikluose yra parodytos konversijos būdu gautos banginių varžų kaitos laiko intervale charakteristikos, kai laidai linijoje išdėstyti: lygiašonių trikampių (2.4 pav.) ir lygiagrečiai su žemės paviršiumi (2.5 pav.).



2.4 pav. Banginių varžų kitimo laiko intervale charakteristika, kai laidai linijoje išdėstyti lygiašonių trikampi

Kaip matyti iš paveikslėlių, reikiamame laiko intervale kreivės logaritminėje skalėje yra artimos tiesės atkarpai, o tai leidžia supaprastinti gautos charakteristikos aprašą dviejų–trijų charakteristikos taškų koordinatėmis ir logaritmine tarpinių reikšmių aproksimacija.



2.5 pav. Banginių varžų kitimo laiko intervale charakteristika, kai laidai linijoje išdėstyti lygiagrečiai su žemės paviršiumi

Modeliavimo tikslumui padidinti yra tikslinga atlikti pereinamųjų charakteristikų matematinės sąsūkos kompoziciją su įtekančiomis ar ištekančiomis srovėmis linijos galuose 3-iajai sekai, nes, pavyzdžiui, laiko intervale nuo 3 μ s iki 0,8 ms banginė varža pakinta 16–17 procentų. O tuo metu kitose dviejose sekose

varžos pokytis siekia 8 procentus, todėl paklaidos įtaka tarp srovės ir įtampos persiskirstymo linijos gale yra nedidelė. Praktinis algoritmų taikymas parodė, kad banginei varžai kintant tokiu dydžiu atpažinimo kokybė beveik nesikeičia. Algoritmams supaprastinti ir trumpinant atpažinimo laiką praktikoje sekoms galima priimti pastovaus dydžio bangines varžas.

2.2.2. Elektromagnetinių bangų sklaidimo charakteristikų kaita

Elektromagnetinės bangos, plisdamos išilgai linijos, dalį energijos praranda, pakinta jų parametrai. Aukštesnio dažnio vyksmo dedamosios linijos galą pasiekia su mažesne amplitude nei žemesnio dažnio. Tokia netolygi slopa priklauso nuo linijos konstruktyviųjų parametrų bei nuo grunto elektrotechninio laidumo savybių. Dispersinių savybių tyrimas gali būti naudingas tam, kad būtų rasta patogesnių būdų adaptuoti modelį.

Su labai nežymiomis prielaidomis, nepriklausomai nuo žemės ir laidų paviršių gerų elektrinio lauko ekraninių savybių įtakos dažniui, laidų potencialo ir lyginamųjų krūvių santykius nusako potencialiniai koeficientai matricoje [84]:

$$A = (\alpha_{ik}); \quad (56)$$

čia $\alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon} N_{ik}$.

Todėl lyginamųjų talpinių laidžių matrica turi (43) išraišką:

$$Y_f = j2\pi\epsilon\omega N^{-1};$$

$$N = (N_{ik}).$$

Magnetinio lauko, kurį sukuria laidais ir žemės gruntu tekančios srovės, santykį su laidų srovėmis nusako induktyvumų matrica:

$$L = (L_{ik}); \quad (57)$$

čia $L_{ik} = \frac{\mu}{2\pi} (N_{ik} + M_{ik} + F_{ik})$, $M_{ik} = 0$, kai $i = k$.

Lyginamųjų pilnutinių varžų matrica turi (45) išraišką $Z_f = j\omega \frac{\mu}{2\pi} (N + M + F)$.

Pilnutinių varžų $M = \text{diag}(M_{ik})$ dedamoji dalis, apibūdinanti laidų vidinį magnetinį srautą, kiekvienam laidui (matricos pagrindinės įstrižainės elementui) aprašoma taip:

$$M_{ii} = \frac{k\rho J_0(kr_i)}{j\omega\mu r_i J_1(kr_i)}; \quad (58)$$

čia J_0 ir J_1 – Beselio pirmosios rūšies nulinės ir pirmosios eilės funkcijos; ρ – laido metalo specifinė varža, Ωm ; μ – oro magnetinė skverbtis; k – banginis elektromagnetinių bangų laido viduje skaičius:

$$k = \omega \sqrt{\mu_i \left(\varepsilon_i - j \frac{1}{\omega \rho} \right)}; \quad (59)$$

čia ε_i ir μ_i – laido metalo dielektrinė konstanta ir magnetinė skverbtis.

Pilnutinių varžų $F = (F_{ik})$ dedamoji dalis, apibūdinanti vidinį magnetinį srautą žemės grunte, aprašoma taip:

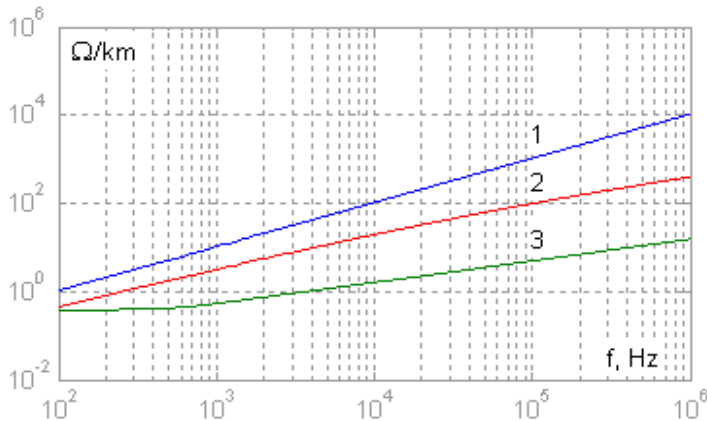
$$F_{ik} = \frac{\pi}{2x_1} (H_1(x_1) - Y_1(x_1)) - \frac{1}{x_1^2} + \frac{\pi}{2x_2} (H_1(x_2) - Y_1(x_2)) - \frac{1}{x_2^2}; \quad (60)$$

čia H_1 ir Y_1 – Struvės ir Noimano pirmosios eilės funkcijos.

$$\begin{cases} x_1 = [(h_i + h_k) + j(b_i + b_k)] \sqrt{-k_g^2 + k_0^2} \\ x_2 = [(h_i + h_k) - j(b_i + b_k)] \sqrt{-k_g^2 + k_0^2} \end{cases};$$

h_i ir h_k – i -ojo ir k -ojo laido aukštis virš žemės; b_i ir b_k – i -ojo ir k -ojo laido horizontaliosios koordinatės; k_g ir k_0 – žemės grunto ir oro banginiai skaičiai.

Laidų vidinės pilnutinės varžos ir žemės grunto pilnutinės varžos dedamosios įtaka bendrajai linijos lyginamajai pilnutinei varžai yra ganėtinai sviri. 2.6 paveiksle yra parodytas tipiškas santykis tarp visų trijų pilnutinę varžą sudarančių dedamųjų (pilnutinės varžos modulių): 1-oji kreivė nuo N , 2-oji nuo F ir 3-ioji nuo M .

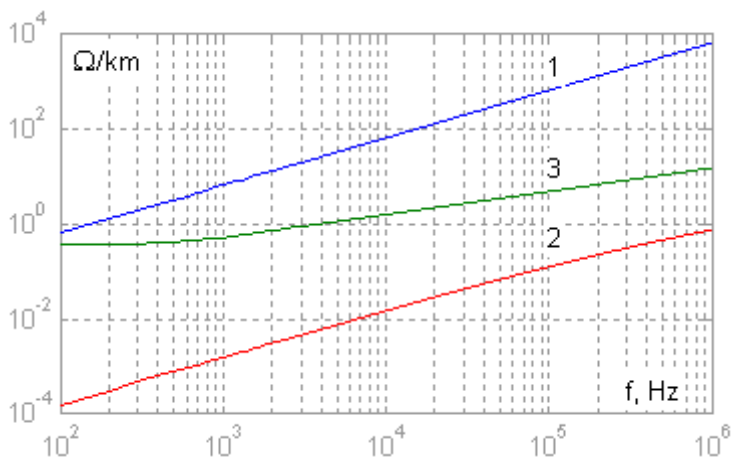


2.6 pav. Laidų pilnutinės varžos dedamųjų priklausomybė nuo dažnio kreivės

Iliustracija (2.6 pav.) iš dalies atitinka 3-iosios sekos (turinčios didžiausią banguos varžos reikšmę) pobūdį. Esant vienodiems faziniams parametrams idealiai visiškai transponuotoje linijoje 3-ioji seka simetrinėse arba Klarko koordinatėse būtų įprastinė nulinė seka.

Pirmųjų sekų pilnutinėse varžose (2.7 pav.) grunte esančių magnetinių srautų įtaka apie 1000 kartų silpnesnė, todėl netikslumai, atsitiktinai atsirandantys šių sekų

modeliuose, pavyzdžiui, dėl netikslaus grunto lyginamosios varžos dydžio, yra neesminiai.



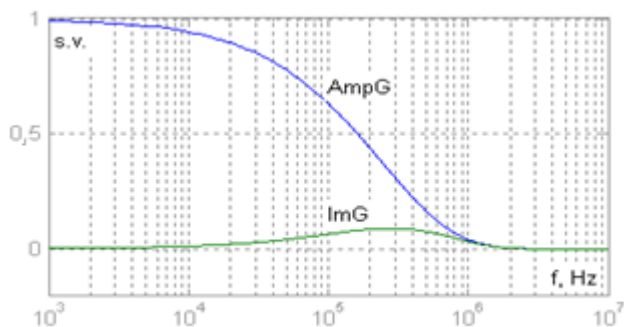
2.7 pav. Laidų pirmųjų sekų pilnutinės varžos priklausomybė nuo dažnio kreivės

Elektromagnetinės bangos elektrinio lauko įtampos sklaidimo procese pasikeitimą sekose charakterizuoja dažninių funkcijų vektorius:

$$G = \exp \{-l (\text{diag}(T_u^{-1} N_L N^{-1} T_u - V) \varepsilon \mu)^{0,5}\}; \quad (61)$$

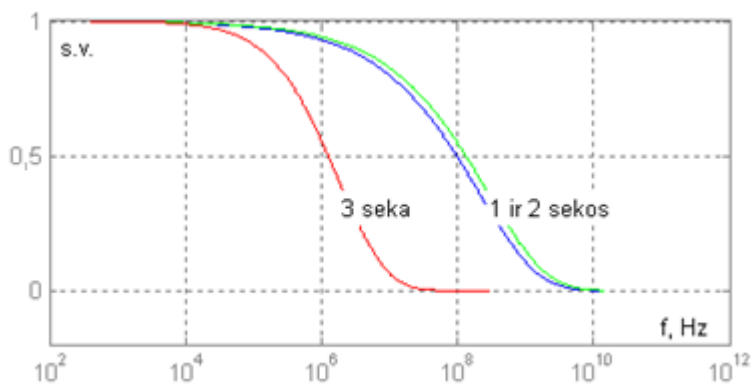
čia l – linijos ilgis, m; V – vienetinė matrica, $V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Iliustracijoje (2.8 pav.) parodytos vienišo 5 kilometrų ilgio laido virš žemės dažninių funkcijų G (amplitudės $AmpG$ ir menamosios ImG) grafikai. Iš dažninės amplitudės charakteristikos matyti, kad aukštesnio nei 100 kHz dažnio elektromagnetinės bangos kanale „žemė–laidas“ slopsta daugiau nei 50 procentų įtampos lygio. Šiame skaičiuojamajame modelyje buvo parinkta grunto savitoji varža $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Esant didesnėms grunto varžoms elektromagnetinių bangų disipacinė slopa kiek intensyvesnė (tačiau nedaug; varžai padidėjus 10 kartų, dažninė amplitudės charakteristika esant 100 kHz sumažėja apie 20 procentų).



2.8 pav. Vienišo 5 km laido dažnių amplitudės (*AmpG*) ir menamosios (*ImG*) funkcijų priklausomybės nuo dažnio grafikai

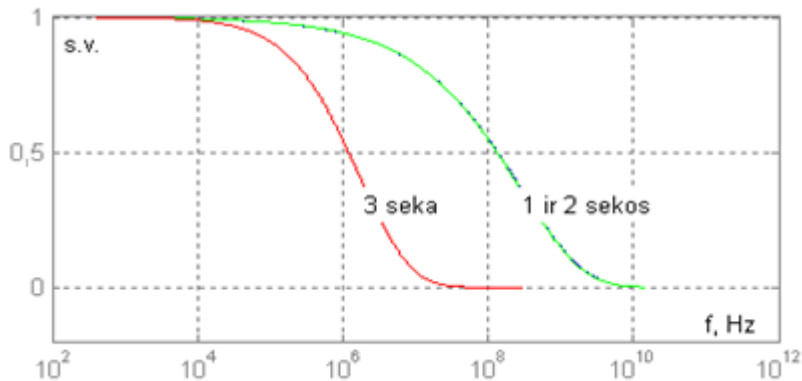
Skirtingas pilnutinių varžų kitimo pobūdis skirtinguose bangų kanaluose (2.6 pav.) ir (2.7 pav.) suformuoja nevienodai gėstančias dažnines charakteristikas. Dėl mažesnės žemės grunto įtakos tarplaidiniuose kanaluose elektromagnetinių bangų energijos disipacija yra mažesnė ir elektromagnetinės bangos juose slopsta ne taip intensyviai. 2.9 paveiksle yra parodytos pasikeitimo dažninės amplitudės charakteristikos 5 kilometrų 20 kV linijoje su lygiagrečiai su žemės paviršiumi išdėstytais laidais ir tipinėmis portalinėmis atramomis.



2.9 pav. Elektromagnetinių bangų dažninės amplitudės charakteristikos linijoje su lygiagrečiai su žemės paviršiumi išdėstytais laidais

20 kV trilaideje oro linijoje 1-osios ir 2-osios sekos bangos nuslopsta iki 50 procentų lygio, kai vyksmų dažnis išauga iki 100 MHz, o 3-iojoje sekoje – jau esant 1 MHz. Dėl skirtingo atstumo tarp kraštutinių laidų bei kraštutinio ir vidurinio laido dažninės charakteristikos, atspindinčios atitinkamus išorinį ir vidinį banginius kanalus linijoje, slopimais išsiskiria. Vidinio kanalo banginė varža yra mažesnė dėl mažesnio savitojo induktyvumo bei didesnės savitosios talpos. Šiame kanale lauko kryptį nusakantis vektorius yra labiau orientuotas į linijos laidų pusę, energijos disipacija sklidimo metu yra ne tokia intensyvi ir todėl elektromagnetiniai virpesiai slopsta lėčiau.

Trikampiu išdėstyty laidų linijoje vidinių tarplaidinių kanalų sąlygos yra beveik vienodos, todėl 1-osios ir 2-osios sekos dažninės amplitudės charakteristikos sutampa (2.10 pav.). Tačiau tokiose linijose 3-iosios sekos (kanalo su žeme) banginė varža yra apie 9 procentus didesnė nei linijose, kuriose laidai išdėstyti horizontaliai, ir todėl elektromagnetinės bangos jose slopsta maždaug 4 procentais greičiau.



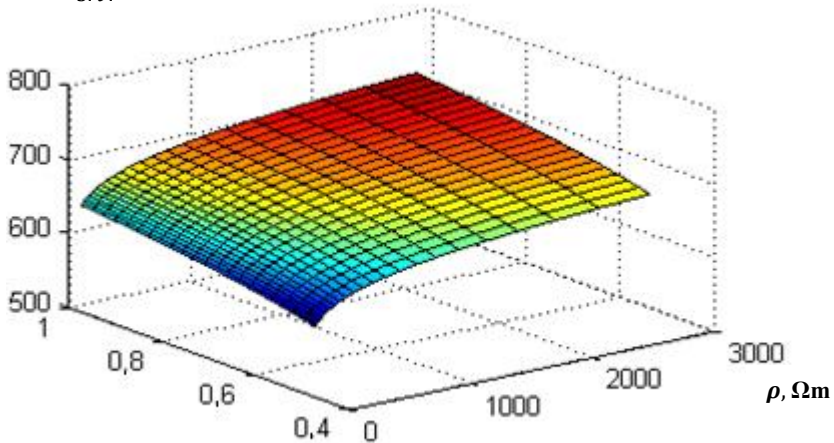
2.10 pav. Elektromagnetinių bangų dažninės amplitudės charakteristikos linijoje su trikampiu išdėstytais laidais

Linijos tarpstiebiuose laidai yra įsvirę parabole, todėl, kintant laidų aukščiui virš žemės, keičiasi 3-iosios sekos (kanalo su žeme) banginiai parametrai ir bangų slopimo intensyvumas. Visų pirma parametru modeliavimas keičiant laidų aukštį h praktiškame diapazone (nuo $0,3 h$ iki h) parodė, kad modalinės matricos yra iš esmės vienodos, nepriklausomai nuo aukščio (tai labai svarbu atpažinimo uždaviniams). Taip pat 1-osios ir 2-osios sekų (tarplaidinių kanalų) banginiai parametrai beveik nekinta, banginė varža 3-iojoje sekoje (kanalo su žeme) nėra pastovi. Šio parametro kitimo dėsningumą reikia tirti tam, kad būtų galima rasti ekvivalentinį ir nekintamą aukštį išilgai linijos, kuriam esant modelyje rasti srovės ir įtampos vyksmai linijoje būtų pakankamai adekvatūs atpažinimo reikmėms.

2.6 lentelė. Banginės varžos kanale su žeme (3-iosios sekos) priklausomybė nuo grunto savitosios varžos ir aukščio virš žemės

Žemės grunto varža, Ωm	Laidų aukštis virš žemės h/h_{max} , s. v.					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
100	585	595	603	610	616	622
300	595	605	613	620	626	631
1000	605	614	622	629	635	640
3000	615	624	632	639	645	650

2.11 paveiksle trimatėje erdvėje yra pavaizduota banginės varžos kanale su žeme priklausomybė nuo grunto savitosios varžos ir aukščio virš žemės. Banginė varža mažiausia reikšmę pasiekia, kai grunto varža mažiausia ir žemiausiai nusvirę linijos laidai. h/h_{max}
s. v.



2.11 pav. Laido 1-osios sekos pilnutinės varžos priklausomybė nuo grunto savitosios varžos (ρ) ir laido aukščio (h/h_m) virš žemės

Optimalus ekvivalentinis laidų aukštis gali būti rastas ieškant atplitusių elektromagnetinių bangų linijoje su įsvirusiais laidais ir randant liniją, kurioje laidai yra pastoviam aukštyje ir atplitusios bangos labiausiai atitinka linijoje su laidų įsvirimais surastas bangas.

Naudojant (38) lygtis buvo modeliuojama vienlaidė linija. Tarpstiebyje, kuriame laidai buvo laikomi įsvirusiais taisyklinga parabole, linija buvo padalyta į vienodo ilgio atkarpas, kurių aukštis atitinka parabolės vidutinių ordinačių atkarpose reikšmes, o atkarpų susilietimo vietose skaičiuojami bangų lūžio ir atspindžio koeficientai.

Lūžio koeficientas:

$$\alpha = \frac{2w_2}{w_1 + w_2}. \quad (62)$$

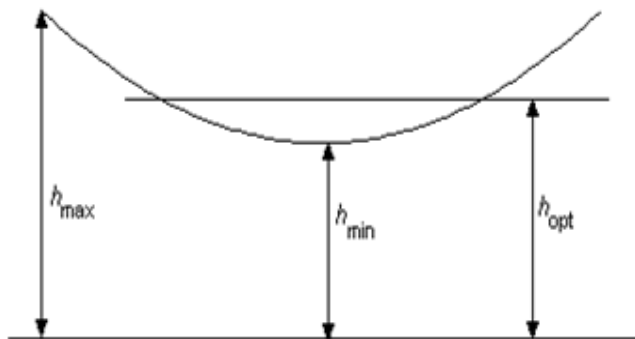
Atspindžio koeficientas:

$$\beta = \frac{w_2 - w_1}{w_1 + w_2};$$

čia $w_1 w_2$ – banginės varžos atkarpa, iš kurios atsklinda banga; w_2 – banginės varžos atkarpa, į kurią plinta banga, lūžusi atkarpų sandūroje.

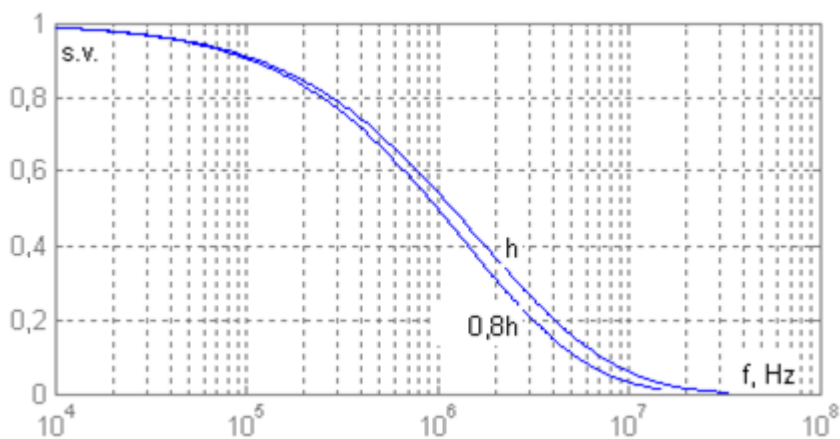
Optimalaus aukščio buvo ieškoma keičiant (didinant) atkarpų tarpstiebyje skaičių. Surastas optimalus laidų aukštis (2.12 pav.) gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$h_{opt} = h_{max} - \frac{2}{3}(h_{max} - h_{min}). \quad (63)$$



2.12 pav. Ekvivalentinio aukščio radimas

Dažninė charakteristika keičiasi kintant laidų aukščiui, tačiau ši kaita nėra didelė. Tai iliustruoja 2.13 pav. parodytos kanalo su žeme dažninės amplitudės charakteristikos atvejams h_{max} ir $h_{opt} = h_{max} - 0,3 \frac{2}{3} h_{max}$, nustačius $0,3 h_{max}$ laido įsvirimą.



2.13 pav. Linijoje plintančios elektromagnetinės bangos dažninės amplitudės charakteristikos esant skirtingam laido aukščiui

Linijoje plintant elektromagnetinei bangai, pakeliui laidų aukštis kinta apie h_{opt} reikšmę ir todėl gauta dažninė amplitudės charakteristika visiškai artima optimaliajai. Tai patvirtino tyrimai modeliuojant realiomis dažninėmis amplitudės charakteristikomis, kai linija padalijama į atkarpas.

2.2.3. Elektros linijos modelio lygtys

Elektros linijos modelio lygtys turi atspindėti daug įvairių faktorių: daugiakanalę elektromagnetinių bangų struktūrą su jų specifinėmis modalinėmis matricomis, bangų plitimą ir jų keitimąsi laiko intervale, kanalo su žeme banginės varžos nepastoviąją reikšmę pereinamojoje charakteristikoje bei ribines sąlygas linijos galuose [78].

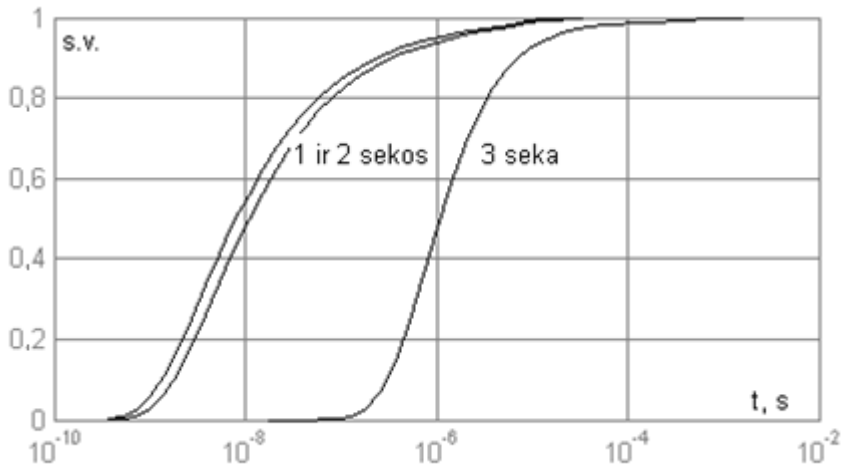
Modelis, atspindintis vyksmus linijoje laiko dimensijoje, elektromagnetinių bangų plitimą modeliuoja vėlinimo funkcijomis kiekvienam banginiam kanalui (sekoms $s\{1,2,3\}$). Diskretizuojant vyksmą laikoma, kad oro linijai laiko diskretizavimo žingsnis Δt atitinka elektromagnetinių bangų nueito kelio tarpinį:

$$\Delta x = \Delta t \sqrt{\mu \epsilon}. \quad (64)$$

Tad yra laikoma, kad elektromagnetinių bangų kanaluose greitis yra vienodas:

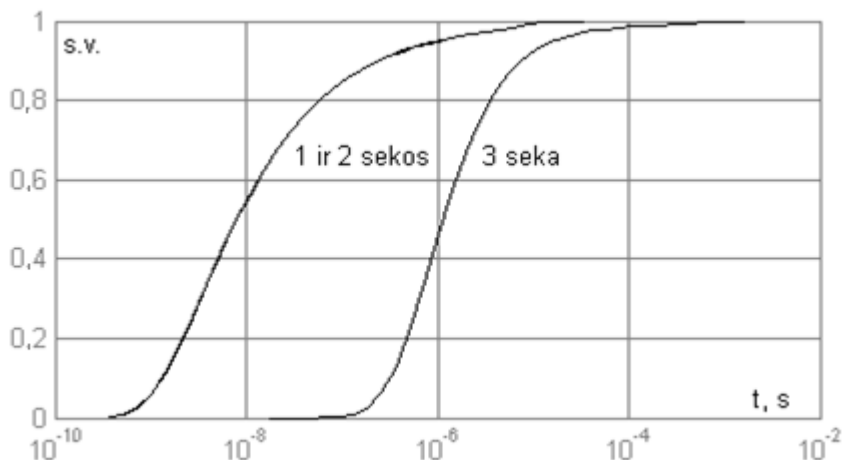
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}.$$

Disipacinius energetinius vyksmus linijos kanaluose atspindi pereinamosios charakteristikos, kurios randamos pagal realiosios dalies dažninių charakteristikų (61) technologiją panaudojant skaitmeninės konversijos į laiko dimensiją (55) formulę. 2.14 ir 2.15 paveiksluose parodytos pereinamųjų charakteristikų kreivės, atitinkančios dažnines amplitudės charakteristikas (2.9, 2.10 pav.), 5 kilometrų ilgio tipinėms 20 kV ir 10 kV linijoms, kai laidai atramose išdėstyti horizontaliai ir trikampi (grunto varža $\rho = 100 \Omega\text{m}$).



2.14 pav. Pereinamųjų charakteristikų kreivės linijoje su lygiagrečiai su žemės paviršiumi išdėstytais laidais

Pažymėtina, kad 3-iosios sekos (kanalo su žeme) pereinamoji charakteristika beveik nepriklauso nuo laidų išdėstymo atramose geometrinio vaizdo (laidų aukštis virš žemės buvo parinktas abiem atvejams vienodas: $h_{opt} = 10 \text{ m}$).



2.15 pav. Pereinamųjų charakteristikų kreivės linijoje su trikampiui išdėstytais laidais

Plintančiąją srovinę bangą kiekvienoje sekoje modelio algoritme atspindi funkcija:

$$J^- = \frac{2u}{w_{\min}} - J_{\text{rez}}; \quad (65)$$

čia w_{\min} – minimali banginės varžos reikšmė (2.14 ir 2.15 pav.), praktiškai randama laiko momentui, atitinkančiam žingsnio trukmę Δt , u – įtampa mazgo, nuo kurio atsispindi į liniją plintanti elektromagnetinė banga, J_{rez} – vėlavimo funkcija, gauta iš formulės surandant atspindį nuo linijos galo pagal (65) formulę, naudojant sąsūką su pereinamąja charakteristika ir banginės varžos kaitos korekciją:

$$J_{\text{rez}} = f_G * J\left(t - \frac{l}{\Delta x} \Delta t\right) - f_w * i; \quad (66)$$

čia i – srovė, įtekanti į mazgą; $J\left(t - \frac{l}{\Delta x} \Delta t\right)$ – vėlavimo funkcija, rasta laiko momentu $t - \frac{l}{\Delta x} \Delta t$ pagal (65) formulę, tik iš kito linijos galo dydžių; l – linijos ilgis.

Funkcijų sąsūkų (66) dvinaris skaitmeniniame modelyje kiekvienam laiko momentui yra pakeičiamas skirtumu:

$$J_{\text{rez}} = F_{1n} - F_{2n};$$

čia F_{1n} ir F_{2n} – skaitmeninių sąsūkos procedūrų rezultatai, atitinkantys laiko t momentą:

$$\begin{cases} F_{1n} = \sum_{j=2}^n (F_j - F_{j-1})J_{n-j}, \\ F_{2n} = \sum_{j=2}^n (F_{W,j} - F_{W,j-1})i_{n-j}; \end{cases} \quad (67)$$

čia $F_{G,j}$ ir $F_{W,j}$ – elektromagnetinės bangos ir banginės varžos kitimo pereinamųjų funkcijų reikšmės j diskretizacijos žingsnyje; J_{n-j} ir i_{n-j} – vėlavimo funkcija ir srovė $n - j$ diskretizacijos žingsnyje.

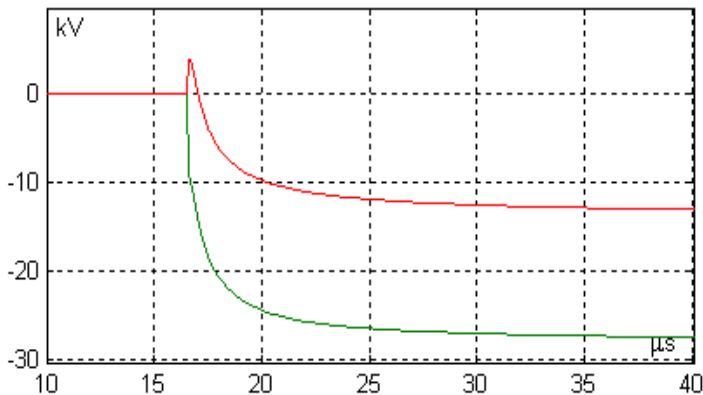
Skaitmeninių sąsūkos procedūrų, atliekamų skaitmeninių filtrų (68) tipo būdu, tikslumas priklauso nuo diskretizacijos žingsnio dydžio bei nuo polinomo narių n sumos eilutėse. Naudojant skaitmeninius filtrus pasiekiamas geras rezultatas, kai eilutėse yra ne mažiau kaip $n \geq \frac{2l}{\Delta x}$. Tada reikiamas tikslumas pasiekiamas tik mažinant diskretizacijos žingsnį. Kai linijos gale yra sujungta N panašaus tipo linijų (linijų, kurių modalinės matricos vienodos), įtampa apskaičiuojama taip:

$$u = \frac{\sum_{k=1}^N J_{rez k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{w_{min k}}}. \quad (68)$$

Srovė, įtekanti į mazgą:

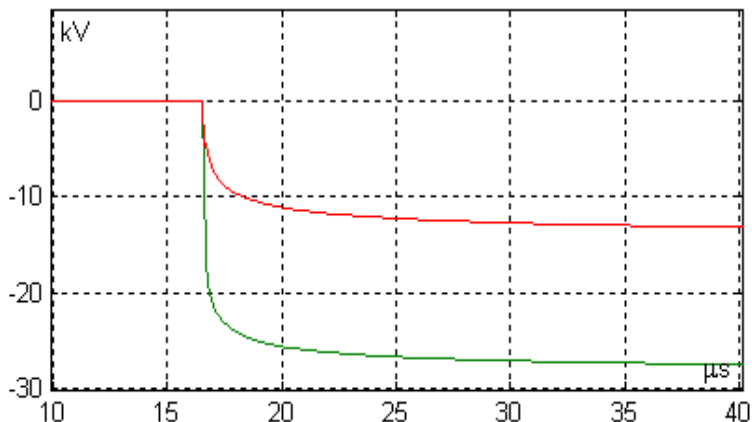
$$i = J_{rez} - \frac{u}{w_{min}}. \quad (69)$$

2.16 ir 2.17 paveiksluose parodytos pereinamosios į linijos pradžią atplitusių įtampos bangų kitimo kreivės.



2.16 pav. Į linijos pradžią atplitusių įtampos bangų kitimo kreivės

Šias bangas sukėlė fazės a susijungimas su įžeminta armatūra už 5 km nuo linijos pradžios. Paveikslėlių apatinės kreivės – įtampos bangos pažeistoje fazėje, viršutinės – sveikoje fazėje.



2.17 pav. Į linijos pradžią atplitusių įtampos bangų kitimo kreivės

2.17 paveiksle kreivės yra sudarytos naudojant Klarko visiškai simetriųjų parametų modalines matricas, prieš tai induktyvumų ir talpų matricas pertvarkius į vienodų parametų fazėse matricas. Tuo tikslu buvo surastos vidutinės parametų reikšmės atskirai pagrindinių įstrižainių parametrų ir kitoms įstrižainėms. Kaip matyti, visiškas parametų suvienodinimas tam, kad būtų galima panaudoti tradicinius lygčių diagonalizavimo būdus, lemia iš esmės pakeistą pradinį vyksmo vaizdą. Sudėtingos struktūros tinkle paprastinimas modeliui vidurkinant parametrus fazėse pakeičia įtampų ir srovių virpesių pobūdį. Todėl raiškiam vyksmų atpažinimui reikia naudoti linijų atramų tipą atitinkančias modalines matricas.

2.3. Pagrindiniai skyriaus rezultatai

1. Greitiesiems vyksmams atpažinti sukurtas specifinis modalinių matricų skirstomojo tinklo oro linijoms radimo būdas. Šioms matricoms rasti nustatytas 23 kHz dažnis.
2. Parametų matricų diagonalizavimo paklaidų analizė įvairių konstrukcijų linijoms 100–3000 Ω m žemės grunto varžų diapazone parodė, kad esant atraminiam 23 kHz dažniui sklaidimo pastoviųjų diagonalizavimo suminės paklaidos dėl likusių nenulinių nediagonalinių elementų nesiekia 0,2 % visame greitųjų vyksmų 10 kHz–10 MHz dažnio diapazone.
3. Suminė linijų banginių varžų matricų diagonalizavimo paklaida dėl likusių nenulinių nediagonalinių elementų bei menamųjų skaičių dalių matricose paneigimo siekia iki 1 % greitųjų vyksmų 10 kHz–10 MHz dažnio diapazone.

4. Tyrimai banginių varžų linijose parodė, kad tarplaidiniuose banginiuose kanaluose banginės varžos beveik nesikeičia kintant grunto varžai ir praktiniuose skaičiavimuose yra tikslinga naudoti jas kaip pastoviuosius dydžius.
5. Banginių varžų kanale su žeme konversija į laiko dimensijos funkciją leido rasti tiesinę varžos priklausomybę nuo laiko argumentų logaritminėje skalėje.
6. Nustatyta atskirų linijos pilnutinių varžų įtaka linijos modelio parametrams. Mažiausią neesminę įtaką, apie 1000 kartų silpnesnę, turi žemės grunto pilnutinių varžų dedamoji tarpfaziniuose kanaluose, palyginti su kitomis dedamosiomis, ir modeliavimo rezultatai tarpfaziniuose kanaluose gerokai mažiau priklauso nuo grunto varžų.
7. Nustatytas linijos modeliui ekvivalentinis laidų aukštis; laikant, kad jis yra vienodas visoje linijoje, modelį galima supaprastinti.
8. Suformuotos banginių vyksmų linijose lygtys, kuriomis įvertinami elektromagnetinių bangų kitimo laiko intervale vyksmai bei linijos sekų banginių varžų priklausomybė nuo vyksmų dažnio, sudaro pagrindą metodikos, skirtos gedimo vietai vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje greitųjų vyksmų modeliais nustatyti.

3. TYRIMŲ REZULTATAI. GEDIMO VIENOJE FAZĖJE VIETOS SUDĖTINGOS KONFIGŪRACIJOS ELEKTROS TINKLE GREITO NUSTATYMO MODELIAI IR JŲ PRAKTINIS TAIKYMAS

Skirstomojo tinklo linijos dažniausiai turi spindulinio tinklo šakotų medžių konfigūraciją. Dažnai prie tinklo maitinimo pastotės skirstyklos šynų linijos prijungiamos įvadinais kabeliais. Bendriausiu atveju tinklas yra sudarytas iš linijų, kurių modalinės matricos yra skirtingos. Ši sąlyga reikalauja specifinio linijų lygčių jungimo būdo.

Procesams linijoje turi įtakos tinklo maitinimo sistema ir kitos linijos, prijungtos prie tų pačių skirstyklos šynų. Kad būtų galima sumažinti jų įtaką gedimo vienoje fazėje vietos nustatymui linijoje, reikia panaudoti specifinį analizės algoritmą.

Greitųjų vyksmų modeliavimo technologija leidžia supaprastinti schemą, naudotis vyksmus aprašančių lygčių tiesiškumo savybėmis (proporcingumo ir superpozicijos principais), adaptuoti ir optimizuoti schemas elementų parametrus [85].

3.1. Sudėtingo skirstomojo tinklo linijų greitųjų vyksmų modelis

Linijų atkarpų susijungimo vietoje negalima naudoti (68) įtampų radimo formulės, kai prijungtos linijos turi skirtingas modalines matricas, pavyzdžiui, oro linija mazge sujungta su kabeliu. Tuo atveju mazgų įtampas tikslinga atvaizduoti kokio nors konvencionalaus tipo koordinatėse. Skirstomojo tinklo linijoms konfigūracija artimiausia modalinė matrica, diagonalizuojanti matricas vienodų parametru fazėse (pavyzdžiui, kabelių), yra:

$$T_f = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (70)$$

Pavyzdžiui, kai laidai linijoje išdėstyti lygiagrečiai arba lygiašonių trikampių, modalinė matrica savitųjų laidžių ir pilnutinių varžų matricoms gali būti gauta tokia:

$$T_f = \begin{pmatrix} t_1 & -1 & t_2 \\ 1 & 0 & 1 \\ t_1 & 1 & t_2 \end{pmatrix}. \quad (71)$$

Šios matricos koeficientų t_1 ir t_2 reikšmės lemia vienintelis koeficientas. Pavyzdžiui, pilnutinių varžų matricai:

$$Z_f = \begin{pmatrix} Z_S & Z_M & Z_N \\ Z_M & Z_D & Z_M \\ Z_N & Z_M & Z_S \end{pmatrix}; \quad (72)$$

koeficientų reikšmes nustato faktorius:

$$k = \frac{Z_S + Z_N - Z_D}{Z_W}; \quad (73)$$

tada koeficientai t_1 ir t_2 randami taip:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{k - \sqrt{k^2 + 8}}{4} \\ t_2 = \frac{k + \sqrt{k^2 + 8}}{4} \end{cases}. \quad (74)$$

Vis dėlto pagrindinis (70) kanoninio pavidalo matricos privalumas – ryški subalansuota fizikinių elektrinio lauko kanalų linijoje prigimtis. (70) matricos atvirkštinė matrica yra tokio pavidalo:

$$T_f^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}. \quad (75)$$

Šios matricos pirmoji eilutė formuoja 1-ąjį kanalą (r) tarp vidurinės linijos fazės ir kitų dviejų kraštinių fazių, antroji eilutė – 2-ąjį kanalą (s) tarp pirmosios ir trečiosios fazės, trečioji eilutė – 3-įjį visų fazių su žeme kanalą, tradicinį nulinės sekos (o) kanalą.

Kanoninį pavidalą (71), surastą bendriausiu būdu modalinei matricai \ddot{T} , galima gauti taip:

$$\begin{cases} T_f = \frac{\ddot{T}}{\ddot{T}_{13}}, \\ \text{visiems : } T_{i1} = \frac{\ddot{T}_{i1}}{\ddot{T}_{21}}, T_{i2} = -\frac{\ddot{T}_{i2}}{\ddot{T}_{12}}, T_{i3} = \frac{\ddot{T}_{i3}}{\ddot{T}_{23}}; \end{cases} \quad (76)$$

čia $T_{ik} \in \ddot{T}$; $T_{ik} = T_f$.

Linijų įtampas ir sroves į kanonizuotas koordinatas ($v = r, s, o$) transformuoja matricos:

$$\begin{cases} T_U = T_f \widetilde{T}_u^{-1} \\ T_I = T_f \widetilde{T}_i^{-1} \end{cases}; \quad (77)$$

o banginių varžų matricos pastovioji dalis iš (65) išraiškos transformuojama matricų triada:

$$W = T_U \text{diag}(w_{min}) T_I^{-1}. \quad (78)$$

3.1 lent. yra pateiktos (77) matricos įvairiems laidų išdėstymams linijose. Gautosios matricos artimos vienetinėms matricoms, tačiau su nedideliu (iki 6 %) įtampų bei srovių perskirstymu atskirose sekose.

3.1 lentelė. Srovių ir įtampų pervedimo į kanonizuotas koordinates transformacinės matricos

Matricos tipas	Laidų išdėstymo atramos būdas		
	Lygiagrečiai (2.2 pav., a)	Lygiašonių trikampių (2.2 pav., b)	Įvairiakraščių trikampių (2.2 pav., c)
T_I	$\begin{pmatrix} 0,94 & -0,06 & -0,06 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,06 & -0,06 & 0,94 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,97 & -0,04 & -0,03 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,03 & -0,04 & 0,97 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,99 & -0,02 & -0,03 \\ 0,01 & 1 & -0,02 \\ 0,02 & 0,04 & 1,02 \end{pmatrix}$
T_U	$\begin{pmatrix} 1,03 & -0,06 & 0,03 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,03 & -0,06 & 1,03 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,01 & -0,04 & 0,01 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,01 & -0,04 & 1,01 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,00 & -0,02 & -0,01 \\ 0,03 & 1 & -0,03 \\ 0,02 & 0,02 & 0,97 \end{pmatrix}$

Sudėtingame tinkle, sudarytame iš skirtingai linijose išdėstytų laidų, (68) išraiška įgyja tokio pavidalo matricinę formą:

$$U_E = \left(\sum_{k=1}^N T_{I k} J_{rez k} \right) W_Z ; \quad (79)$$

čia W_Z – mazgo suminė banginių varžų matrica; U_E – mazgo be apkrovos (be talpinių elementų arba be trumpojo susijungimo su įžemintu objektu srovės šaltinių):

$$W_Z = \left(\sum_{k=1}^N W_k^{-1} \right)^{-1} .$$

Tada (65) išraiška įgyja tokio pavidalo matricinę formą:

$$J_k^- = 2 \operatorname{diag} \left(\frac{1}{W_{\min k}} \right) T_U^{-1} U - J_{rez k} . \quad (80)$$

Suformuotos (64), (66), (67), (70)–(80) lygtys ir komponentės sudaro sudėtingos ir šakotos linijos greitųjų vyksmų modelį. Kad būtų galima modeliuoti srovių ir įtampų vyksmus, linijos modelis turi būti papildytas į mazgus įjungtų struktūrų modeliais bei srovės šaltiniu, kuris sukelia trumpojo susijungimo su įžemintu objektu pereinamuosius vyksmus. Kai linijos šakoje iš vienokio laidų išdėstymo pereinama į kitokį išdėstymą (pavyzdžiui, atliekama laidų transpozicija), tikslinga pakeitimo vietoje algoritmo vientisumui išlaikyti įvesti papildomą mazgą, kuriame įtampas turėtų kanonizuotas ($v = r, s, o$) koordinatas.

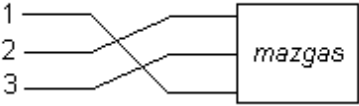
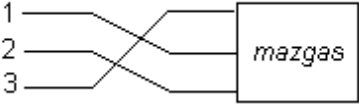
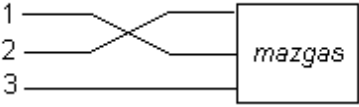
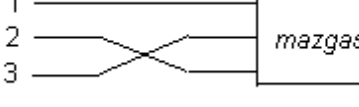
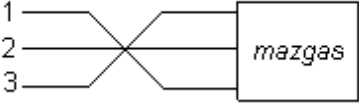
3.2. Linijos transpozicijos modelis

Algoritmo vientisumui išlaikyti linijos transpozicijos vietoje skaičiuojamojoje schemoje tikslinga numatyti papildomą mazgą. Tada viename linijos gale, transpozicijos vietoje, (77) išraiškų struktūros pakinta taip:

$$\begin{cases} T_U = T_f T_{TR} \widetilde{T}_u^{-1}; \\ T_I = T_f T_{TR} \widetilde{T}_l^{-1}; \end{cases} \quad (81)$$

čia T_{TR} – transpozicijos rūšį nustatanti matrica (žr. 3.2 lent.).

3.2 lentelė. Transpozicijos rūšį nustatanti matrica

Transpozicijos rūšis	Transpozicijos rūšį nustatanti matrica
	$T_{TR} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
	$T_{TR} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
	$T_{TR} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
	$T_{TR} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$
	$T_{TR} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

3.3. Talpinis mazgo modelis

Greitųjų vyksmų tinklo modelyje induktyviojo pobūdžio elementų įtaka labai maža. Pradinių greitųjų vyksmų metu srovės pokyčiai transformatorių apvijose tokie menki, kad negali kiek nors ryškiau pakeisti vyksmo tinkle bendrojo vaizdo. Tačiau

pastotės skirstyklos šynų bei transformatorių ir aparatų įvadinės talpos gali daugiau ar mažiau pakeisti šį vaizdą. Bendriausiu atveju talpos gali suformuoti skaičiuojamosios schemos mazgo talpų matricą ir su ja susietą diferencialinių lygčių sistemą:

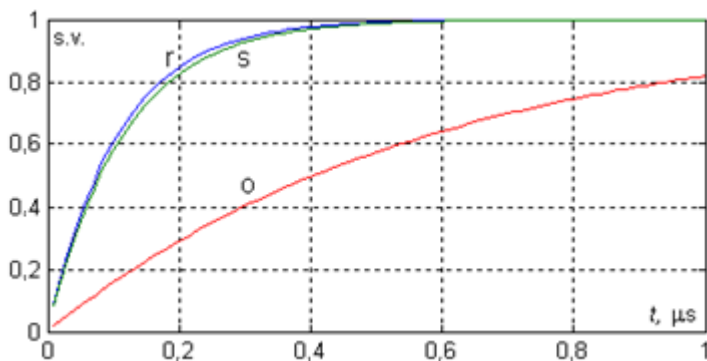
$$T_f^{-1} C_f T_f \frac{d}{dt} U + W_{\Sigma}^{-1} U = U_E. \quad (82)$$

Po kiekvieno skaitmeninio žingsnio sprendinys-vektorius U_1 , laikant, kad žingsnio intervale Δt vektorius U_E pastovus ($U_E = \text{const}$), gali būti išreikštas taip:

$$U_1 = AU_0 + BU_R; \quad (83)$$

čia U_0 – įtampų vektoriaus reikšmė laiko momentu $t - \Delta t$; $A = \exp(-\Delta t \cdot T_f^{-1} \cdot C_f - 1 \cdot T_f \cdot W_{\Sigma}^{-1})$; $B = V - A$, V – vienetinė matrica, $V = 100010001$.

Sprendinių (83) tikslumas priklauso nuo vektoriaus U_E pokyčio diskretizavimo žingsnio laiko intervale. Todėl reikiamo tikslumo tenka siekti mažinant diskretizavimo žingsnį. 3.1 paveiksle parodyta, kaip 10 kV transformatoriaus, esančio linijos gale, vidinė talpa sušvelnina frontus ($v = r, s, o$) sekose. Priimtos fazėse vienodos įvadų 1 nF talpos.



3.1 pav. Įtampų frontų ($v = r, s, o$) sekose kitimo kreivės

3.4. Vienos fazės susijungimo su įžemintu objektu mazgo modelis

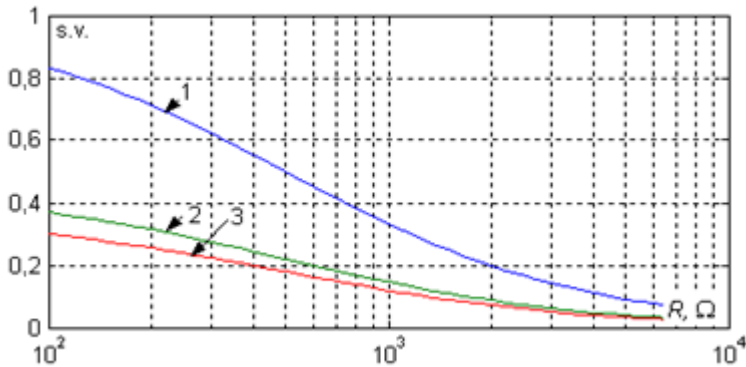
Per greitųjų vyksmų tėkmę priverstinė pramoninio dažnio įtampos dedamoji praktiškai nepakinta ir ją atpažinimo įtaisuose tikslinga nufiltruoti. Tada likusioje vyksmų dalyje lieka tik pereinamoji dedamoji, kuri priklauso nuo trumpojo susijungimo momentu esamų mazgo normalaus režimo momentinių įtampų reikšmių bei objekto, per kurį įvyksta susijungimas, įžeminimo varžos.

Vienos fazės susijungimo su įžemintu objektu (atramos armatūra, medžio šaka ir pan.) vietoje įtampas kanonizuotose ($v = r, s, o$) koordinatėse modeliuoja matricinė lygtis:

$$U = T_f \cdot \left(T_f^{-1} + \frac{W_\Sigma \cdot (T_f^{-1} \cdot K) \cdot K^T}{R} \right)^{-1} \cdot \left(U_E + \frac{W_\Sigma \cdot (T_f^{-1} \cdot K) \cdot (U_N^T \cdot K)}{R} \right); \quad (84)$$

čia U_N – normalaus režimo fazinių momentinių įtampų (įtampų prieš pat gedimo vienoje fazėje momentą) vektorius-stulpelis; R – objekto, per kurį įvyksta susijungimas, įžeminimo varža; K – vektorius, nustatantis, kurioje fazėje įvyko gedimas: $K = (k_i)_{3 \times 1}$; $k_i = 1$, kai su įžemintu objektu susijungusi i -oji fazė, kitaip $k_i = 0$.

3.2 pav. yra parodyta pradinių įtampų fazėse priklausomybė nuo susijungimo su įžemintu objektu varžos R dydžio, kai susijungimas su įžemintu objektu įvyksta 10 kV linijos gale 1-ajame (kraštiniame) linijos laide. Laidai linijoje yra išdėstyti lygiašonių trikampių.



3.2 pav. Pradinės įtampos linijos fazėse kreivės tuoj po 1-ojo kraštinio laido susijungimo su įžemintu objektu per varžą R ; 2-oji ir 3-ioji kreivės – kitų dviejų fazių pradinės įtampos

Kaip matyti iš 3.2 pav., kituose linijos laiduose (2-ajame, viduriniame, ir 3-iajame) įtampos indukuojasi elektrostatiškai. Dėl parametų fazėse nevienodumo juose įtampos nevienodo dydžio.

Sudėtingas skirstomasis tinklas, turintis įvairių energijos šaltinių, reikalauja greito ir išmanaus automatinio reagavimo į įvairius jame atsiradusius gedimus. Užsitęsę nelokaluoti gedimai gali sukelti sunkiai prognozuojamų tolesnių gedimų seką: stacionariusius ir nestacionariusius pasikartojančius viršįtampius bei papildomus tinklo izoliacijos gedimus, energijos srautų kaitą tinkle bei vartotojų ir generuojančių šaltinių atsijungimus ir t. t.

Gedimų vienoje fazėje sukeltų greitųjų vyksmų elektrinių parametų registracijos suteikia daug įvairių gedimo charakteristikų nustatymo galimybių: padeda rasti linijos, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, gedimo vietą bei atstumą iki vienos fazės gedimo vietos; nustatyti varžą gedimo vietoje bei grunto specifinį laidį po linija ir kita. Skirtingi uždaviniai reikalauja skirtingų struktūrų matematinių modelių.

Kad automatinė tinklo apsaugos sistema galėtų operatyviai reaguoti į gedimus, į apsaugos mikrovaldiklių sistemas instaliuoti skaitmeniniai struktūrų modeliai atpažinti gedimus turi per labai trumpą laiko tarpą. Tai galima pasiekti derinant didelį valdiklių našumą su skaitmeninių modelių efektyvumu.

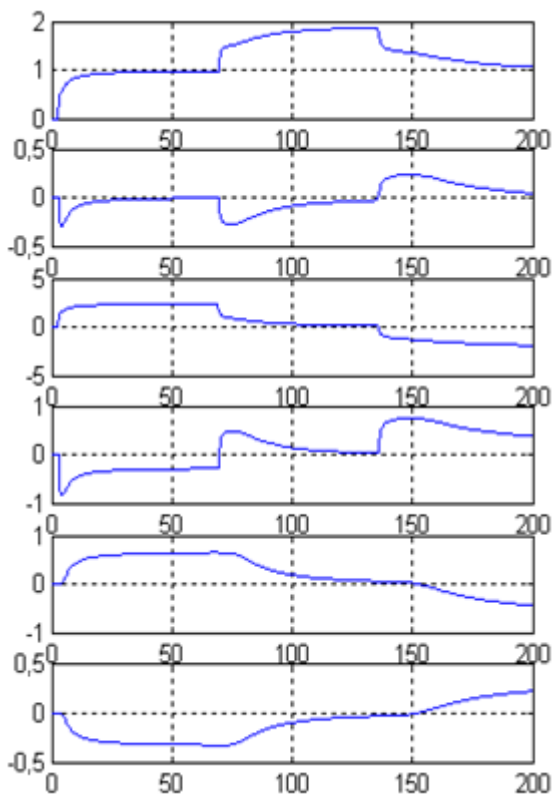
3.5. Linijos, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, nustatymas ir linijos elektromagnetinių parametrų fazėse nevienodumo įtaka

Operatyvus ar automatinis tinklo valdymas pirmiausia reikalauja greito ir labai patikimo maitinimo linijos, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, nustatymo. Dažnai patikimam linijos nustatymui taikomas trumpalaikis sistemos įžeminimas maitinimo transformatoriaus neutralę per rezistorių trumpam sujungiant su įžeminimo grandine. Tačiau rezistoriaus įjungimo ir atjungimo operacijos labai pailgina nustatymo procesą bei sukelia tinkle labai nepageidaujamus komutacinio pobūdžio viršįtampius.

Gedimų vienoje fazėje sukelti pradiniai elektromagnetiniai greitieji vyksmai yra raiškūs, pasižymi didelėmis įtampų bei srovių amplitudėmis – to negalima pasakyti apie nusistovėjusius stacionariusius vyksmus [87]. Sudėtingos konfigūracijos skirstomajame tinkle gedimų vienoje fazėje srovės yra kompensuojamosios, todėl gedimo nustatymas iš kompensuotųjų ir gerokai sumažintų stacionariųjų parametrų yra netikslus ir dažnai būna klaidingas.

Liniją, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, galima nustatyti iš nulinės sekos srovės krypties ir įtampos poliaringumo linijos pradžioje: linijos laidui susijungus su įžemintu objektu, jame esant teigiamai įtampai, srovė pradinio vyksmo metu nulinės sekos kanale teka į liniją, o srovės kryptis tampa priešinga, kai trumpinamas linijos laidas turi neigiamą potencialą. 3.3 pav. parodytos tipinių registracijos rezultatų kreivės: 1)–2) – įtampų fazėse pereinamieji pokyčiai, 3)–6) – srovės įvadų fazėse ir nulinėse sekose pažeistoje bei sveikoje linijoje. Registracijos rezultatuose filtravimu yra pašalintos 50 Hz (stacionariosios) dedamosios. Laido, kuriame įvyko gedimas fazėje A, įtampa trumpojo susijungimo su atrama metu buvo neigiama, todėl skirstyklos šynas fazėje A pasiekė teigiamas įtampos pokytis. Šis įtampos pokytis sukelia srovės tėkmę į skirstyklos šynas nuliniame sekų kanale. Sveikose, nepažeistose linijose nulinės sekos srovė (6) yra priešingos krypties. Skirtingos srovės maitinimo linijose leidžia patikimai atskirti pažeistąją liniją nuo sveikųjų: pažeistojoje linijoje pradinio vyksmo metu nulinės sekos srovė yra ištekanti iš linijos, kai nulinės sekos įtampos pokytis yra teigiamas, ir priešingai, srovė yra įtekanti į liniją, kai įtampos pokytis neigiamas.

- 1) fazės A įtampa
- 2) fazių B ir C įtampos
- 3) srovė fazėje A
- 4) srovė fazėse B ir C
- 5) nulinės sekos srovė pažeistoje linijoje
- 6) nulinės sekos srovė nepažeistoje linijoje



Registracijų trukmė, μ s

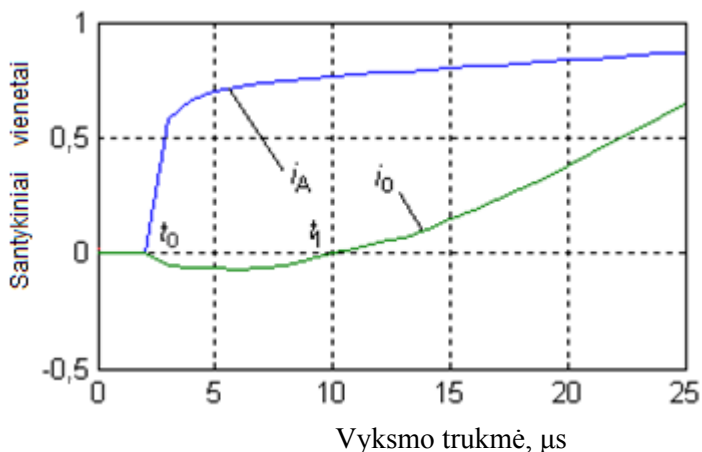
3.3 pav. Pradinio vyksmo registracijos rezultatai po linijos vienos fazės susijungimo su įžemintu objektu. 1–2 – įtampos maitinančios skirstyklos šynose, 3–5 – srovės pažeistoje linijoje, 6 – nulinės sekos įtampa sveikoje linijoje. Pateikti registracijų santykiniai dydžiai

Pereinamųjų vyksmų matavimai ir registracijos veikiančiuose skirstomuosiuose tinkluose leido pastebėti, kad pradinio momentu srovė linijos pradžioje trumpu laiko tarpsniu gali turėti priešingą kryptį (3.4 pav.). Iš srovių fazėje A ir nulinės sekos transformatoriuje registracijų matyti, kad laiko tarpsniu nuo momento t_0 iki t_1 srovės yra priešingų kryptių. Vyksmų modeliavimas parodė, kad trumpalaikis nulinio kanalo srovės pasikeitimas į priešingą kryptį įmanomas tik tuo atveju, kai elektromagnetiniai tinklo parametrai fazėse yra nevienodi. Tokius pasikeitimus sukelia nevienodi parametrai oro linijų fazėse.

Srovių pradinėje vyksmo stadijoje atsiranda todėl, kad linijose nevienodai greitai slopsta elektromagnetinės bangos banginiuose kanaluose. Nulinės sekos kanale elektromagnetinė banga slopsta greičiau nei tarpfaziniuose kanaluose dėl

didesnės energijos disipacijos ir bangų dispersijos žemės grunte. Pradinio momento tarpfazinių kanalų srovės nulemia priešingą srovės kryptį nulinės sekos transformatoriaus grandyje. Laiko tarpsnis t_1-t_0 labiausiai priklauso nuo grunto lyginamosios varžos bei atstumo iki gedimo vienoje fazėje vietos. Kuo atstumas ir varža didesni, tuo laiko tarpsnis didesnis. 3.4 paveiksle pateiktos registracijos metu matuota grunto lyginamoji varža buvo apie 320 Ω m, atstumas nuo skirstyklos iki fazės A susijungimo su įžemintu objektu vietos – 600 metrų.

Linijai, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, nustatyti skirtas įtaisas turi lyginti užregistruotų diskrečiųjų momentinių nulinės sekos įtampos ir srovės ženklų binarinį ryšį – sutapimą arba nesutapimą. Todėl tokių binarinių porų registracijos pradžia nuo pereinamojo vyksmo pradžios turi būti pavėlinta tarpsniu t_1-t_0 . Kad būtų galima nustatyti galimo didžiausio tarpsnio trukmę, įtaisui prie tinklo derinti reikia atlikti vyksmų modeliavimą atsižvelgiant į įvairius grunto santykinės varžos pasikeitimus. Nustatymo tikslumą lemia tinkamų registruotų įtampos ir srovės porų skaičius. Registracijos veikiančiuose tinkluose ir atliekant modeliavimą parodė, kad gedimui nustatyti tikslinga panaudoti binarines poras, surastas nuo momento t_1 iki pereinamosios srovės nuliniame kanale pirmojo maksimumo.



3.4 pav. Srovės fazėje A (i_A) ir nuliniame kanale (i_0) pradinio atplitusių elektromagnetinių bangų vyksmo metu po laido fazėje A susijungimo su įžemintu objektu. Susijungimas už 600 metrų nuo skirstyklos

Linijos, kurioje įvyko vienos fazės gedimas, nustatymo patikimumas priklauso nuo teigiamų ir neigiamų binarinių porų registracijose santykio:

$$patikimumas = \frac{n^+}{n^+ + n^-} \quad (85)$$

arba

$$patikimumas = \frac{t^+}{t}; \quad (86)$$

čia n^+ ir n^- – teigiamų ir neigiamų binarinių porų skaičius; t^+ ir t^- – registracijų, kurių metu yra surastos teigiamos binarinės poros, trukmė ir visa registracijų trukmė.

(86) santykis rodo, kad linijos, kurioje įvyko gedimas, nustatymo patikimumas turėtų nepriklausyti nuo vyksmų registracijų diskretiškumo žingsnio, nors palankių ir nepalankių registracijų išdėstymas viso vyksmo metu iš dalies keičia patikimumo įvertį. Į registracijas įtraukus visas poras nuo vyksmo pradžios iki pirmojo srovės maksimumo 3.3 ir 3.4 pav., pavyzdžiui, (86) santykis duotų 0,89 patikimumo vertę. Pavėlinus registracijas 5-iomis mikrosekundėmis patikimumas pagerėtų iki 0,95 vertės.

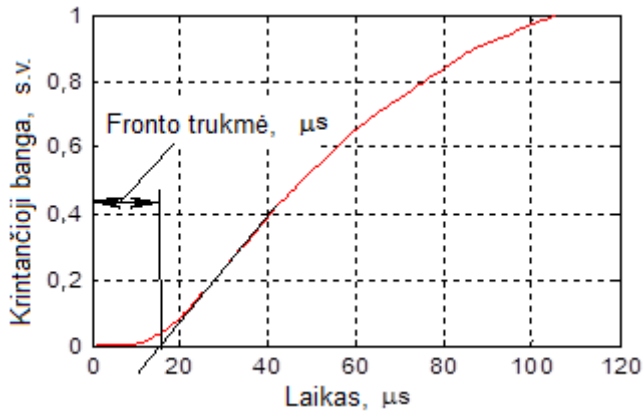
Nepalankių registracijų porų skaičius priklauso nuo registracijos pradžios tinkamo parinkimo ir nuo trikdžių, kuriuos sukelia įtaiso įėjimo grandinės (srovės ir įtampos transformatoriai bei jungiamieji laidai). Todėl yra tikslinga pradinį registracijų momentą pavėlinti kiek daugiau, jeigu įtaise registracijų diskretiškumo žingsnis yra gana mažas ir registruotų porų skaičius didelis. Ruošiant šį darbą eksperimentiniuose bandomuosiuose įtaisuose buvo nustatytas 40 ns diskretiškumo žingsnis. Todėl pavėlinus registracijų pradžią 5 mikrosekundėmis aptartame pavyzdyje buvo gauta 1 675 registracijų.

Didžiausią neigiamą įtaką linijos, kurioje įvyko gedimas, nustatymui daro trikdžiai vyksmo pradžios registracijoms. Praktiniai matavimai veikiančiuose tinkluose parodė, kad didžiausią įtaką trikdžiai daro įtampos matavimo grandims. Prie pastotės šynų prijungti įrenginiai palaiko įvairias susiformavusias virpesių harmonikas, dėl to ypač pažeidžiamos registracinės poros vyksmo pradžioje, kol įtampų vertės dar gana mažos. Todėl tikslinga registracijų pradžią vėlinti kiek galima labiau. Taip, pavyzdžiui, pavėlinimas iki 30 μ s dar leidžia su 40 ns diskretiškumo žingsniu aptariamame pavyzdyje gauti apie $n^+ = 1000$ palankių registracijų ir pasiekti didelį linijos, kurioje įvyko gedimas, nustatymo patikimumą.

3.6. Atstumo iki gedimo vietos nustatymo galimybių tyrimas

Gedimo vietai nustatyti reikia nukreipti įtaiso žvilgsnį į gedimo vietos aplinką. Tam būtina nustatyti apytikrį atstumą iki gedimo vietos. Stacionariųjų parametrų, įtampos ir srovės matavimai visiškai netinka gerai išvystytuose ir kompensuotuosiuose tinkluose. Susijungimo su įžemintu objektu srovės labai silpnos, ir įvairiais tokiems tinklams sukurtais metodais negaunama reikiamo tikslumo rezultatų.

Greitųjų vyksmų registravimas bei analizė leidžia net ir kompensuotuosiuose skirstomuosiuose tinkluose atstumą iki gedimo vietos nustatyti gana tiksliai. Skirstyklos šynas elektromagnetinės bangos nuo susijungimo su įžemintu objektu vietos oro linijomis pasiekia šviesos greičiu, tačiau nulinės sekos kanalu paviršinė elektromagnetinė banga vėluoja. 3.5 pav. parodyta nulinės sekos bangos, pasiekusios skirstyklos šynas, tipinė frontinė dalis. Ši dėl energijos disipacinių vyksmų įgyja nuožulnų lėkštą frontą, sudarydama vėlinimosi nuo tarplaidinių bangų vaizdą. Paveikslėlyje parodyta vyksmo pradžios kreivės liestinė, kuri, kirsdamasi su koordinatine abscise, suformuoja fronto trukmės parametą.

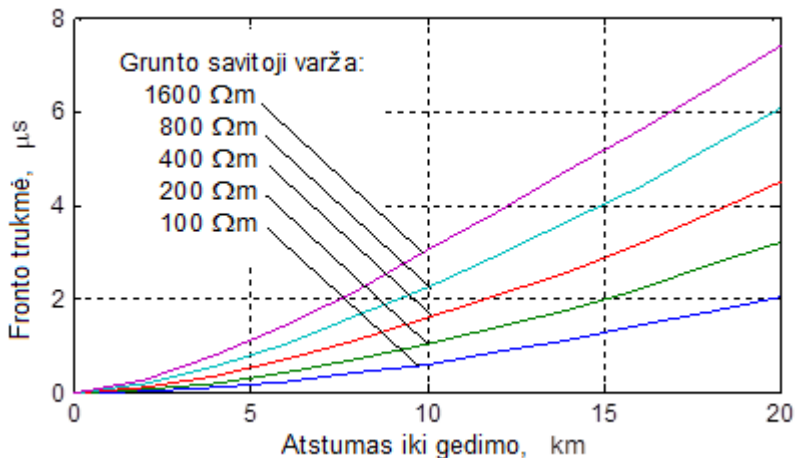


3.5 pav. Nulinės sekos elektromagnetinės bangos fronto trukmės parametro radimas

Fronto trukmės parametro dydis priklauso nuo elektromagnetinės bangos sklidimo linijos trasoje kelio ilgio, žemės grunto specifinės varžos, laidų linijos trasoje išdėstymo. Kai žinomi pastarieji du faktoriai, iš bangos fronto trukmės galima rasti atstumą, kurį nusklendė banga. Tam yra keletas palankių sąlygų:

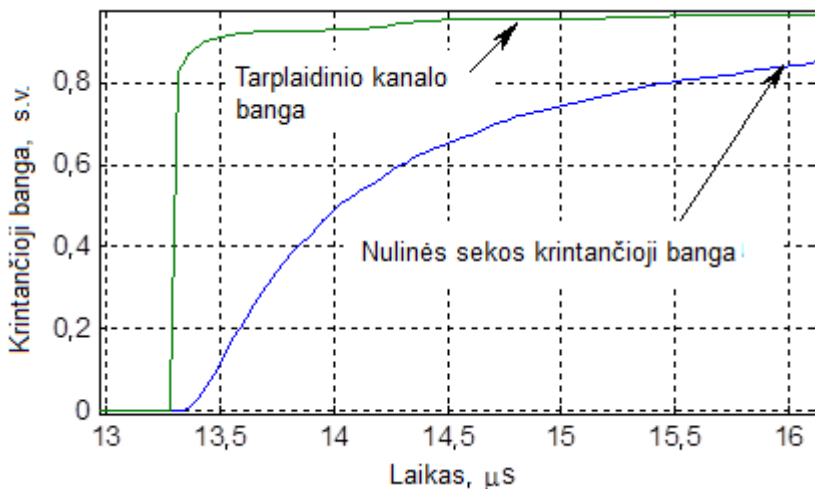
- pradinė elektromagnetinių vyksmų stadija būna ir frontas susiformuoja didžiausios pradinės energetinės galios metu ir todėl frontinės srovių bei įtampų registracijos yra aiškios;
- bangos frontas formuojasi tiesinėje parametru erdvėje ir yra nepažeistas galimais įvairiais tinklo netiesiniais parametrais;
- bangos sankirtose su linijų atšakomis vienodai sumažėja visos parametru reikšmės proporcingai bangos lūžio koeficientui, nekintant fronto trukmės parametru kreivėse, atvaizduotose santykiniais vienetais, santykyje su bangos amplitude.

3.6 paveiksle yra parodyta fronto trukmės parametro priklausomybė nuo žemės grunto savitosios varžos ir nulinės sekos bangos kelio ilgio 15 kV linijos trasoje. Linijos laidų vidutinis aukštis – 11 metrų.



3.6 pav. Nulinės sekos elektromagnetinės bangos fronto trukmės parametro priklausomybė nuo žemės grunto savitosios varžos ir bangos kelio 15 kV linijos trasoje ilgio

Įtaise, registruojančiame atplitusios krintančiosios bangos parametrus, nulinės sekos bangos pradžią patogiausia fiksuoti tarplaidinių bangų pradžios momentu, kaip yra parodyta 3.7 paveiksle.



3.7 pav. Nulinės sekos krintančiosios bangos pradžios nustatymas

Linijoje bangos plinta tarp atramų įsvirusiuose tarpuose. Dėl šios priežasties ir dėl nelygaus žemės paviršiaus plintančiosios bangos kelyje kinta laidų aukštis. Tai turi įtakos fronto trukmės parametro dydžiui ir atstumo iki gedimo vietos nustatymo tikslumui. Nors reikia paminėti, kad laidų aukščio pokyčiai didelės įtakos neturi. 3.8 pav. yra parodytas fronto trukmės pokytis 20 km linijos trasoje dėl aukščio pasikeitimo nuo 10 iki 12 metrų.

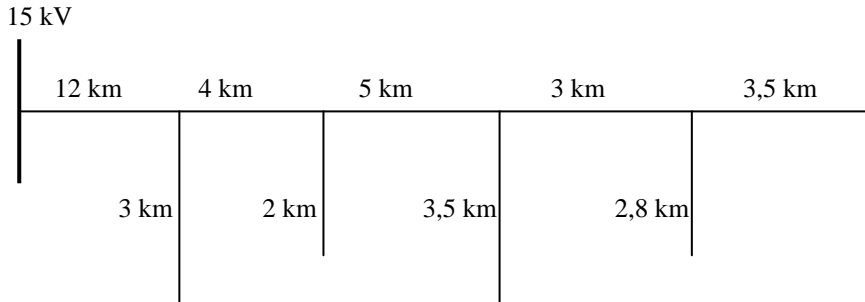


3.8 pav. Bangos fronto trukmės priklausomybė nuo linijos laidų aukščio

Atstumo iki gedimo vietos nustatymo paklaidoms, susidarančioms dėl faktorių neatitikties esantiems tinklo schemeje, įvertinti buvo atliekami statistiniai tyrimai įvairios konfigūracijos skirstomojo tinklo linijų modeliams. Rezultatai leido apibrėžti gedimo vietos paieškos zonos ribas. Tyrimams Monte Karlo metodu pasirinkti atsitiktiniai dydžiai: linijos atkarpų ilgio nustatymo paklaidos, žemės grunto lyginamosios varžos vertės ir linijos laidų vidutiniai aukščiai. Tai esminiai faktoriai, lemiantys nulinės sekos bangos fronto trukmės parametro vertę. Kiti faktoriai, tokie kaip laidų išdėstymas atramose, laidų specifinio laidumo pokyčiai dėl aplinkos bei vidinės temperatūros svyravimo, komutacinių įtaisų linijų atsišakojimo vietose bei kita, daro nepalyginamai mažesnę įtaką ir todėl analizėje buvo nevertinami.

3.9 pav. parodyta viena iš linijos schemų, panaudotų fronto trukmės parametro bei atstumo iki gedimo vietos atsitiktinių reikšmių skirstinių tyrimui. Tai 15 kV oro linija su lygiašonio trikampio forma išdėstytais laidais nešančiosiose tarpinėse atramose, turinčiose vidutinį 11 metrų laidų aukštį. Buvo modeliuojamas gedimas vienoje fazėje 20 km atstumu nuo maitinančios skirstyklos. Atsitiktiniai faktoriai buvo generuojami normališkuoju skirstiniu su 10 % nuokrypiu – paklaida Δ . Pasirinkus 95 % pasiklovimo intervalą, randamas vidutinio kvadratinio nuokrypio nuo dėsnių dydis:

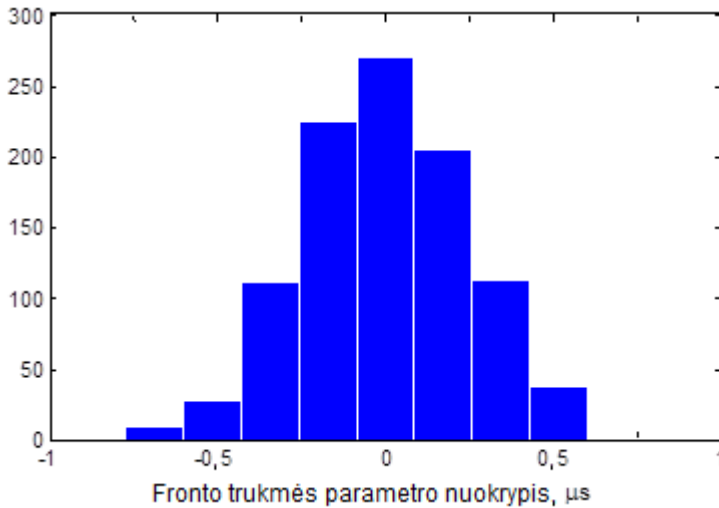
$$\sigma = \frac{\Delta}{1,96}$$



3.9 pav. Statistinio modeliavimo principinė skaičiuojamoji skirstomojo tinklo linijos schema

Analizės rezultatai po 1 000 atliktų statistinio modeliavimo bandymų histogramos pavidalu parodyti 3.10 ir 3.11 pav.

3.10 pav. parodyta nulinės sekos bangos fronto trukmės histograma. Iš jos matyti, kad realiai priimtinos nuokrypių ribos yra apie $\pm 0,5 \mu\text{s}$.

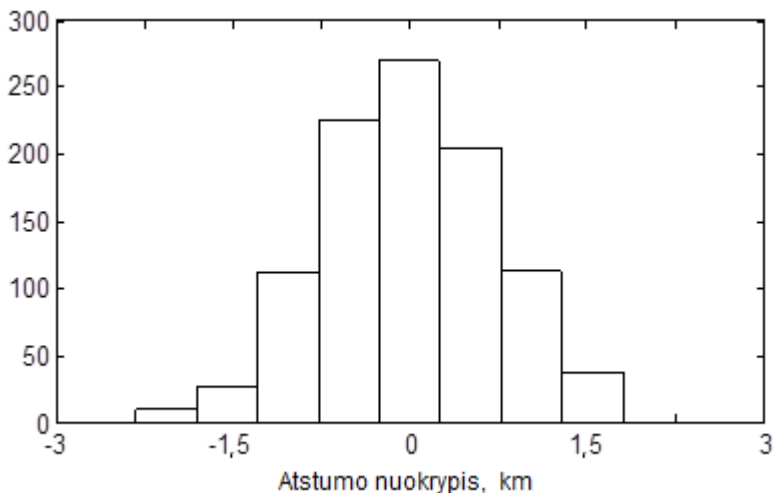


3.10 pav. Nulinės sekos elektromagnetinės bangos fronto trukmės parametro histograma

3.11 pav. yra parodytas skirstinys galimų nuokrypių nustatant atstumą iš gautųjų bangos fronto trukmės verčių. Iš jo matyti, kad tikėtina gedimo vietos paieškos zona yra apie $\pm 1,5 \text{ km}$ pločio. Statistiniai modeliavimai ir kitose įvairiose schemose leido nustatyti apytikrių zonos ribų priklausomybę nuo vidutinio tikėtino atstumo iki gedimo vietos (km):

$$\Delta l \approx 1,5 - l;$$

čia l – tikėtinas vidutinis atstumas iki gedimo vietos, km.



3.11 pav. Atstumo iki gedimo vietos nuokrypio nuo skaičiuojamojo tikėtino atstumo histograma

Paminėtina, kad gedimo vietos nustatymo įtaisuose pažeistai linijai nustatyti bei apytikriam atstumui iki gedimo vietos rasti algoritmai yra nekomplikuotieji. Įtaise mikrovaldiklis visas reikiamas operacijas atlieka per mikrosekundes, todėl išmaniojo skirstomojo tinklo automatinio dispečerinio valdymo struktūra būtiniausią informaciją apie tinklo pažeidimo pobūdį gauna reikiamu trumpiausiu laiku. Be to, ši atpažinimo technologija leidžia fiksuoti savaime išnykstančius gedimus, pavyzdžiui, medžio šakos prisilietimus prie linijos vėjo gūsių metu. Neišnykstančio gedimo atpažinimas lokalizavimo darbų vietai nustatyti yra veiksmas, trunkantis kiek ilgiau, nes reikalauja panaudoti sudėtingesnę paieškos algoritmą.

3.7. Vienos fazės gedimo vietos skirstomajame tinkle nustatymo struktūra

Kad kitos skirstyklos linijos ir maitinamasis perdavimo tinklas neturėtų įtakos vienos fazės gedimo vietos nustatymo rezultatui, modelyje elektromagnetinį vyksmą tikslinga sukelti nuo skirstyklos šynų atsispindėjusia banga. Jos vertės laiko intervale randamos naudojantis linijos pradžios srovės ir įtampos registraciniais duomenimis:

$$U^-(t) = u(t) - w \cdot i(t); \quad (87)$$

čia $u(t)$ ir $i(t)$ – šynų įtampos ir srovės linijos pradžioje nulinės sekos vertės laiko intervale, w – nulinės sekos linijos pradžios banginė varža.

Modeliuose įvairioms galimoms vienos fazės gedimo vietoms iš surastosis tikėtinų vietų zonos surandamos nuo gedimo vietos atsispindėjusios ir į skirstyklos šynas krintančios nulinės sekos bangos. Surastųjų bangų laiko funkcijos yra paiginamos su registracijomis gauta krintančiąja banga:

$$U^+(t) = u(t) + w \cdot i(t). \quad (88)$$

Geriausios atitikmės modeliai yra modeliai, nustatantys gedimo zoną. Tikslios gedimo vietos linijoje paieška trunka ilgiau už paties gedimo linijoje nustatymą ir

gedimo zonos toje linijoje paiešką, nes vyksmų trukmės modelyje suformuotų ir registracija gautų bangų palyginimui yra ilgesnės bei reikiamų modelių aibė yra gausi. Modelių aibė pagausėja modelyje optimizavus kurį nors parametą, pavyzdžiui, radus vidutinę savitąją žemės grunto varžą po linija.

Aprašyta technologija yra panaudota įtaisuose, instaliuotuose įvairiuose skirstomuosiuose tinkluose. Juose programinė struktūra orientuota į pažeistos linijos nustatymą, tikėtinų gedimo vietų zonos radimą, labiausiai tikėtinų vienos fazės gedimo vietų nustatymą ir vidutinės savitosios žemės grunto varžos po linija radimą.

3.8. Pagrindiniai skyriaus rezultatai

1. Sudarytas gedimo vienoje fazėje sukkelto elektromagnetinio vyksmo elektros tinkle modelis skirstomojo tinklo greitiesiems vyksmams atpažinti.
2. Rastas skirstomojo tinklo linijoms tinkamiausias srovių ir įtampų koordinacių transformavimo kanoninių modalinių matricių pavidalas ir jų radimo supaprastintos algebrinės formulės.
3. Vyksmo modelio algoritmo vientisumui išlaikyti sudarytas linijos transponavimo vietoms modalinių matricių perskaičiavimo būdas.
4. Skaičiuojamosios schemas talpų įtakos modeliui aprašymui yra suformuotas ir aprobuotas artutinis skaitmeninis filtras.
5. Sudarytas vienos fazės susijungimo su įžemintu objektu mazgo modelis, leidžiantis įvertinti objekto, per kurį įvyksta susijungimas, varžą.
6. Rastas gedimo vienoje fazėje pažeistos linijos nustatymo būdas ir įvertintas galimas nustatymo patikimumas.
7. Nustatyta pradinio vyksmo nehomogeniškumo priežastis ir šio nehomogeniškumo pašalinimo principas.
8. Įvesta nulinės sekos krintančiosios bangos fronto trukmės parametro sąvoka sudaro galimybės nustatyti artutinį atstumą iki gedimo vietos prielaidą.
9. Suformuotos palankios sąlygos nustatyti atstumą iki gedimo vietos.
10. Įvertinta nulinės sekos krintančiosios bangos fronto trukmės priklausomybė nuo pagrindinių faktorių: bangos kelio, žemės grunto specifinės varžos bei laidų oro linijoje aukščio.
11. Atlikti statistiniai vyksmų įvykus vienos fazės gedimui modeliavimai leido įvertinti nulinės sekos krintančiosios bangos fronto trukmės parametro dispersijos ribas bei tikėtiną gedimo vietos zoną.

IŠVADOS

1. Tyrimas, kuriuo įvertinti skirtingų gedimų vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje atpažinimo technologijų pranašumai bei trūkumai, parodė, kad nėra vieno kompleksinio metodo, kuriuo būtų galima greitai atpažinti gedimą elektros skirstomajame tinkle ir pakankamai tiksliai nustatyti gedimo oro linijoje vietą.
2. Suformuotos banginių vyksmų linijose lygtys, padedančios įvertinti elektromagnetinių bangų kitimą laiko intervale bei linijos sekų banginių varžų priklausomybę nuo dažnio, leidžia sudaryti pagrindą metodikos, kuria vadovaujantis galima spręsti gedimo vienoje elektros skirstomojo tinklo fazėje atpažinimo uždavinius, nes atliekant skaičiavimus:
 - įvairių konstrukcijų linijoms ir žemės grunto varžoms kintant diapazone iki 3000 Ω m tiksliausias elektromagnetinių bangų sklidimo pastoviasis ir linijų bangines varžas galima rasti pasirinkus optimalų 23 kHz dažnį visame greitųjų vyksmų 10 kHz–10 MHz dažnio diapazone;
 - bangines varžas tarplaidiniuose banginiuose kanaluose galima laikyti pastoviais dydžiais, nes jos beveik nesikeičia kintant grunto varžai;
 - linijos modeliui supaprastinti galima rasti ekvivalentinį laidų aukštį, laikant, kad jis vienodas visoje linijos dalyje virš žemės.
3. Naudojantis greituosius elektromagnetinius vyksmus aprašančių lygčių tiesiškumo savybėmis, galima adaptuoti bei optimizuoti elektros tinklo schemas elementų parametrus ir sudėtingos konfigūracijos elektros oro linijai surasti ekvivalentinį supaprastintą skaičiuojamojo elektros tinklo modelį, nes atliekant skaičiavimus galima:
 - įvertinti pradinį vyksmo momentą, nustatyti pradinio vyksmo nehomogeniškumo priežastis ir rasti šio nehomogeniškumo pašalinimo principus;
 - sudaryti specifinį analizės algoritmą, kuris leistų sumažinti šynų sekcijoje vykstančių pašalinių procesų įtaką;
 - įvertinti oro linijos konstrukcinius parametrus, laidų išlinkimą tarpstiebiuose, kabelinius intarpus, transformatorių talpas, žemės grunto ir objekto, per kurį įvyksta susijungimas su žeme, varžas ir taip sumažinti netiesinių elektros tinklo parametrų įtaką;
 - įvertinant linijos, kurioje įvyko gedimas, elektromagnetinių parametrų fazėse nevienodumo įtaką, sukurti mazgo modelį gedimo vietai nustatyti.
4. Sukurtas gedimo vietos nustatymo modelis, kuris pagal užregistruotas greitųjų elektromagnetinių vyksmų charakteristikas ir remiantis nulinės sekos krintančiosios bangos fronto trukmės parametru leidžia nustatyti atstumo iki gedimo vietos paieškos zoną. Esant žemės grunto specifinei varžai diapazone nuo 100 iki 300 Ω m, remiantis gedimų vienoje fazėje registracijų elektros skirstomojo tinklo linijose iki 20 km duomenimis, atstumo iki gedimo vietos nustatymo paklaida neviršija 10 %.

LITERATŪRA

1. WAHLROOS, A., and J. ALTONEN. Compensated networks and admittance based earth fault protection. In seminar “*Methods and techniques for earth fault detection, indication and location*” (1MRS757370), February 15, 2011, Aalto University, Espoo, Finland.
2. ZAYANDEHROODI, H., A. MOHAMED, H. SHAREEF, and M. MOHAMMADJAFARI. Automated Fault Location in a Power System with Distributed Generations Using Radial Basis Function Neural Networks. *Journal of Applied Sciences*. 2010, 10(23), 30–32.
3. MÄKI, K., S. REPO, and P. JARVENTAUSTA. Impacts of distributed generation on earth fault protection in distribution systems with isolated neutral. In *CIREC 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21–24 May 2007*.
4. LINČIKS, J., and D. BARANOVSKIS. Single phase earth fault location in the medium voltage distribution networks. *Power and Electrical Engineering*, 2009, 25, 13–18. ISSN 1407-7345.
5. MADIBA, T., W. SITI, and A. A. JIMOH. The application of the fault current limiters in power distribution system. *Journal of Energy & Power Engineering*. 2011, 5(12), 1205–1212.
6. LIAN, B., and M. M. A. SALAMA. An overview of digital fault location algorithms for power transmission lines using transient waveforms. *Electric Power System Research*. 1994, 29, 17–25.
7. MAHSEREDJIAN, J., S. DENNETIERE, L. DUB’E, B. KHODABAKHCHIAN, and L. G’ERIN-LAJOIE. On a new approach for the simulation of transients in power systems. *Electric Power Systems Research*. 2007, 77, 1514–1520.
8. KEZUNOVIC, M. Fault location. In *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. Johns Wiley, 1999, 7, 276–285.
9. DIAZ, H. R., and M. T. LOPEZ. Fault location techniques for electrical distribution networks: literature survey. In *5th IASTED International Conference “Power and energy systems”, June 15–17, 2005, Benalmadena, Spain*.
10. WANG, Z. Earth fault detection in distribution network based on wide-area measurement information. In *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 16–18 Sept. 2011, Yichang*. IEEE, 2011, pp. 5855–5859.
11. CHAN, D. T. W., and C. Z. LU. Distribution system fault identification by mapping of characteristic vectors *Electric Power Syst. Res.* 2001, 57, 15–23.
12. BASTARD, P., L. GARCIA-SANTANDER, X. LE PIVERT, I. GAL, and E. L. PARRA. A voltage-based fault location method for radial distribution networks. In *Fifth International Conference on Power System Management and Control, 17–19 April 2002*. IET, 2002, pp. 216–221.
13. PEREIRA, R. A. F., L. G. W. DA SILVA, M. KEZUNOVIC, and J. R. S. MANTOVANI. Location of single line-to-ground faults on distribution feeders using voltage measurements, In *IEEE PES Transmissions and Distribution Conference and Exposition 2006 (TDC’06): Latin America, Caracas, 15–18 Aug. 2006*. IEEE, 2006, pp. 1–6.
14. PEREIRA, R. A. F., L. G. W. DA SILVA, M. KEZUNOVIC, and J. R. S. MANTOVANI. Optimized placement of voltage measurement devices

- for determining location of single line-to-ground faults on overhead electric power distribution feeders. In *XVI Congresso Brasileiro de Automatica, Salvador, Brasil, 2006*.
15. YUAN, B., H. TAOKA, and Y. FUJIMOTO. New 3-phase load flow program for steady state initialization of the EMTP. In *1998 International Conference on Power System Technology POWERCON'98, Beijing, 18–21 Aug 1998*. IEEE, 1998, vol. 2, pp. 850–854.
 16. LEHTONEN, M., S. PETTISSALO, and J. H. ETULA. Computational fault location for electrical distribution networks. In *Proc. 1991 Power System Monitoring and Control Conf., London, 26–28 Jun 1991*. IET, 1991, pp. 38–43.
 17. MATLA, W., A. JOHN, R. SPEH, and E. ALBRECHT. New method of fault location in MV systems. In *Proc. CIRED 1993 12th International Electricity Distribution Conf.*, pp. 2.8/1–2.8/5.
 18. DAS, R., M. S. SACHDEV, and T. S. SIDHU. A technique for estimating locations of shunt faults on distribution lines. In *Proc. IEEE WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing Conf.* IEEE, 1995, vol. 1, pp. 6–11.
 19. SACHDEV, M. S., R. DAS, and T. S. SIDHU. Determining locations of faults in distribution systems. In *Proc. 1997 Developments in power system protection Conf.*, pp. 188–191.
 20. AGGARWAL, R. K., Y. ASLAN, and A. T. JOHNS. An interactive approach to fault location on overhead distribution lines with load taps. In *Proc. 1997 Sixth International developments in power system protection Conf.*, pp. 184–187.
 21. HANNINEN, S., M. LEHTONEN, and E. ANTILA. A method for detection and location of high resistance earth faults. In *Proc. 1998 International Energy Management and Power Delivery Conf.*, vol. 2, pp. 495–500.
 22. VALENTI, A., G. HUARD, P. JOHANNET, F. BROUAYE, and P. BASTARD. Traveling wave fault location for radial MV distribution systems, theoretical approach and EMTP simulations. In *Proc 1999 IPST'99 International Power Systems Transients Conf., Budapest, Hungary, 1999*, pp. 229–234.
 23. SAHA, M. M., R. DAS, P. VERHO, and D. NOVOSEL. Review of fault location techniques for distributions systems. In *Proc. 2002 Power Systems and Communications Infrastructures for the future, Beijing, September 2002*.
 24. SAHA, M. M., and F. PROVOOST. Fault location in medium voltage network. In *Proc. 1999 CIRED'99 Conf.*
 25. SAHA, M. M., F. PROVOOST, and E. ROSOLOWSKI. Fault location method for MV cable network. In *Proc 2001 IEE Seventh International Developments in Power System Protection Conf.*, pp. 323–326.
 26. SAHA, M. M., E. ROSOLOWSKI, J. IZYKOWSKI. A new fault location algorithm for distribution networks. In *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 5–8 April 2004*, vol. 1, pp. 168–171.
 27. NOVOSEL, D., D. HART, Y. HU, and J. MYLLYMAKI. System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads. U.S. Patent 5 839 093, Nov. 17, 1998.
 28. DAS, R., M. S. SACHDEV, and T. S. SIDHU. A fault locator for radial subtransmission and distribution lines. In *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 443–448.

29. JOHNS, A. T., L. L. LAI, M. EL-HAMI, and D. J. DARUVALA. New approach to directional fault location for overhead power distribution feeders. In *Proc. Inst. Elect. Eng.-Gener. Transm. Distrib.*, Jul. 1991, vol. 138. IET, 2002, pp. 351–357.
30. TANG, Y., H. F. WANG, R. K. AGGARWAL, and A. T. JOHNS. Fault indicators in transmission and distribution systems. In *Proc. 2000 International Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies Conf.*, pp. 238–243.
31. WATSON, N., and J. ARRILLAGA. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. *IET Power and Energy Series 39*. The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, ISBN 0-85296-106-5.
32. PROBERT, S. A., and Y. H. SONG. Detection and Classification of High Frequency Transients Using Wavelet Analysis. In *Proc. 2002 IEEE Power engineering Society Summer Meeting, Chicago, Illinois*, pp. 801–806.
33. BO, Z. Q., G. WELLER, F. JIANG, and Q. X. YANG. Application of GPS based fault location scheme for distribution system. In *Proc. 1998 POWERCON'98 International Power System Technology Conf., Beijing, China, 1998*, vol. 1, pp. 53–57.
34. BO, Z. Q., G. WELLER, and M. A. REDFERN. Accurate fault location technique for distribution system using faultgenerated high-frequency transient voltage signals. In *Proc. Inst. Elect. Eng.-Gener. Transm. Distrib.*, Jan. 1999. vol. 146, pp. 73–79.
35. JIANG, F., Z. Q. BO, G. WELLER, P. S. CHIN, and M. A. REDFERN. A GPS based fault location scheme for distributions line using wavelet transform technique. In *Proc 1999 IPST'99 International Power Systems Transients Conf., Budapest, Hungary, 1999*, pp. 241–245.
36. EICKHOFF, F., E. HANDSCHIN, and W. HOFFMANN. Knowledge based alarm handling and fault location in distribution networks. *IEEE Trans. Power Systems*, 1992, 7, 770–776.
37. MAGNAGO, F. H., and A. ABUR. A new fault location technique for radial distribution systems based on high frequency signals. In *Proc 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Conf., Edmonton, Alta, Canada, 1999*, vol. 1, pp. 426–431.
38. HIZAM, H., P. A. CROSSLEY, P. F. GALE, and G. BRYSON. Fault section identification and location on a distribution feeder using traveling waves. In *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1107–1112.
39. THOMAS, D. W. P., R. J. O. CARVALHO, and E. T. PEREIRA. Fault location in distribution systems based on traveling waves. In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 23–26 June 2003*, vol. 2, pp. 5.
40. IMRIS, P., and M. LEHTONEN. Fault location in underground distribution networks using traveling waves. In *Proc. Scientific conference of Riga, Technical University, Riga, Latvia, October 9–11 2003*, pp. 227–232.
41. EL-HAMI, M., L. L. LAI, D. J. DARUVALA, and A. T. JOHNS. A new traveling-wave based scheme for fault detection on overhead power distribution feeders. *IEEE Trans. Power Delivery*. 1992, 7, 1825–1833.
42. HIZAM, H., and P. A. CROSSLEY. Estimation of fault location on a radial distribution network using fault generated travelling waves signals. *Journal of Applied Sciences*. 2007, 7(23), 3736–3742. ISSN 1812-5654.

43. CROSSLEY, P., M. DAVIDSON, and P. GALE. Fault location using travelling waves. In *Proc. Inst. Elect. Eng. Colloquium on Instrumentation in the Electrical Supply Industry, London, UK, 1993*. pp. 6/1–6/3.
44. GALE, P. F., P. A. CROSSLEY, X. BINGYIN, G. YAOZHONG, B. J. CORY, and J. R. G. BARKER. Fault location based on travelling waves. In *Proc. Fifth International developments in Power System Protection Conf., York, UK, 1993*. pp. 54–59.
45. BO, Z. Q., R. K. AGGARWAL, A. T. JOHNS, and P. J. MOORE. Accurate fault location and protection scheme for power cable using fault generated high frequency voltage transients. In *Proc. 1996 MELECON '96 8th Mediterranean Electrotechnical Conf.*, vol. 2, pp. 777–780.
46. YONG, B., C. WEI, L. JIANGSHENG, D. LEI, L. QINGDONG, Y. NING. Single phase to earth fault location method in distribution network based on signal injection principle *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. In *2011 4th International Conference on Date of Conference, July 2011*.
47. NOURI, H., C. WANG, and T. DAVIES. An accurate fault location technique for distribution lines with tapped loads using wavelet transform. In *Proc. 2001 IEEE Power Tech Conf.*, vol. 3, 2001.
48. ENGU, E., K. RAMAR, R. MONTANO, and C. COORAY. Fault characterization and classification using wavelet and fast Fourier transforms. In *Proc. 7th International WSEAS conference on Application of Electrical Engineering*, 2008, 7(4), pp. 398–408.
49. CHEN, Z., Z. Q. BO, F. JIANG, X. Z. DONG, G. WELLER, and N. F. CHIN. Wavelet transform based accurate fault location and protection technique for cable circuits. In *Proc. 2000 APSCOM-00 International Advances in Power System Control, Operation and Management Conf.*, vol. 1, pp. 59–63.
50. YAN, F., Z. CHEN, Z. LIANG, Y. KONG, and P. LI. Fault location using wavelet packets. In *Proc. 2002 Powercon International on Power System Technology Conf.*, pp. 2575–2579.
51. MOSHTAGH, J., and R. K. AGGARWAL. A new approach to fault location in a single core underground cable system using combined fuzzy logic and wavelet analysis. In *Eighth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection 2004, 5–8 April 2004*.
52. ROBERTSON, D. C., O. I. CAMPS, J. S. MAYER, W. B. GISH. Wavelets and electromagnetic power system transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1999, 11(2), 1050–1058.
53. NIKANDER, A., and P. JARVENTAUSTA. Methods for earth fault identification and distance estimation in a compensated medium voltage distribution. In *Proc. 1998 International Energy Management and Power Delivery Conf.*, vol. 2, pp. 595–600.
54. BO, Z. Q., A. T. JOHNS, and R. K. AGGARWAL. A novel fault locator based on the detection of fault generated high frequency transients. In *Proc. 1997 Sixth International Conference on Developments in Power System Protection Conf.*, pp. 197–200.
55. DURIC, M. B., Z. M. RADOJEVIC, and V. V. TERZIJA. Time domain solution of arcing faults detection and fault distance calculation on distribution lines. In *Proc. CIRED 1997 14th International Exhibition on Electricity Distribution Conf.*, vol. 1, pp. 1/1–1/5.

56. MOSHTAGH, J. and R. K. AGGARWAL. A new approach to fault location in a single core underground cable system using combined fuzzy logic and wavelet analysis. In *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection 2004, 5–8 April 2004*.
57. ELKASHY, N. I., M. LEHTONEN, H. A. DARWISH, A.-M. TAALAB, and M. A. IZZULARAB. A novel selectivity technique for high impedance arcing fault detection in compensated MV networks. *European Transactions on Electrical Power ETEP*. 2007, DOI:10.1002/etep.179.
58. LIANG, J., S. ELANGOVA, and J. B. X. DEVOTA. Application of wavelet transform in travelling wave protection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2000, 22(8), 537–542.
59. KACHESOV, V. E., V. Y. LAVROV, and A. B. CHEREPANOV. Parametric method of fault location in distribution networks. *Power Technology and Engineering*. 2003, 37(4), 262–268.
60. BOGDASHOVA, L. V., and V. E. KACHESOV. Parametric on-line fault location methods for distribution MV networks. In *Power Tech, 2005 IEEE Russia, St. Petersburg, 27–30 June 2005*. IEEE, 2005, pp. 1–7.
61. THOMAS, D. W. P., C. CHRISTOPOULOS, R. J. O. CARVALHO, and E. T. PEREIRA. Single and double ended travelling-wave fault location on a MV system. In *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 2004, 5–8 April 2004*, vol.1, pp. 200–203.
62. KACHESOV, V. E. Method of ground fault location for distribution networks. Patent RU № 2216749, *Bulletin of Inventions*, №32, 2003.
63. GOMEZ, P., and F. A. URIBE. The numerical Laplace transform: an accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices. *Electrical Power and Energy Systems*. 2009, 31, 116–123.
64. GLINKOWSKI, M. T., and N. C. WANG. ANNs pinpoint underground distribution faults. *IEEE Computer Applications in Power*. 1995, 8, 31–34.
65. JARVENTAUSTA, P., P. VERHO, and J. PARTANEN. Using fuzzy sets to model the uncertainty in the fault location process of distribution networks. *IEEE Trans. Power Delivery*. 1994, 9, 954–960.
66. YUAN-YIH, H., F. C. LU, Y. CHIEN, J. P. LIU, J. T. LIN, P. H. S. YU, and R. R. T. KUO. An expert system for locating distribution system faults. *IEEE Trans. Power Delivery*. 1991, 6, 366–372.
67. KUAN, K. K., and K. WARWICK. Real-time expert system for fault location on high voltage underground distribution cables. In *Proc. Inst. Elect. Eng.-Gener. Transm. Distrib., May 1992*, vol.139, pp. 235–240.
68. KEZUNOVIC, M., S. LUO, and D. R. SEVEIK. A novel method for transmission network fault location using generic algorithms and sparse field recordings. In *Proc. 2002 IEEE Power engineering Society Summer Meeting, Chicago, Illinois*, pp. 1101–1106.
69. HÄNNINEN, S., M. LEHTONEN, and U. PULKKINEN. A probabilistic method for detection and location of very high resistive earth faults. *Electric Power Syst. Res*. 2000, 54, 199–206.
70. WAHLROOS, A., and J. ALTONEN. Performance of a novel neutral admittance criterion in MV feeder earth-fault protection. In *CIREC 2009, Prague*.
71. ALTONEN, Janne, and Ari WAHLROOS. Novel algorithm for earth fault location in compensated MV-networks. In *CIREC 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10–13 June 2013*.

72. HANNINEN, S. and M. LEHTONEN. Earth fault distance computation with artificial neural network trained by neutral voltage transients. In *Proc. 2001 Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 1187–1192.
73. THOMAN, P., M. PAAR, and B. BATORA. Using of the artificial neural networks to the localization of the earth faults in radial networks. In *CIGRE 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 21–24 May 2007*.
74. EBERL, G., S. HANNINEN, M. LEHTONEN, and P. SCHEGNER. Comparison of artificial neural networks and conventional algorithms in ground fault distance computation. In *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 1991–1996.
75. LIU, W., and W. ZHONG. A fuzzy set method for fault location identification in power distribution systems. In *Proc. 1996 IEEE Decision and Control Conf.*, vol. 2, pp. 2208–2212.
76. FERHATBEGOVIĆ, Š. G., . MARUŠIĆ, and I. PAVIĆ. Single phase fault distance estimation in medium voltage distribution network based on traveling waves. *International Review of Electrical Engineering*. 2012, 7(1), 32–35.
77. CLARKE, E. *Circuit analysis of AC systems, symmetrical and related components*. General Electric Co., Schenectady, NY, 1950.
78. SEMLYEN, A., B. GUSTAVSEN. Phase-Domain Transmission-Line Modeling With Enforcement of Symmetry Via The Propagated Characteristic Admittance Matrix. *IEEE transactions on power delivery*, vol. 27, no. 2, April 2012, pp. 626–631.
79. MITTRA, R. *Transient electromagnetic fields*. New York: Springer-Verlag, 1976, ch. 2.
80. HAGEDORN, P., and A. DASGUPTA. *Vibrations and waves in continuous mechanical systems*. England, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
81. MARTÍ, L. Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices. *IEEE Trans. Power Delivery*. 1988, 3, 1099–1110.
82. GRIGSBY, L. L. *Electric power generation, transmission, and distribution, third edition*. CRS press.
83. BERTRAND, J., P. BERTRAND, and J. OVARLEZ. *The Mellin transform. The Transforms and Applications Handbook: Second Edition*. CRC Press LLC, 2000.
84. NASER, T. *Power systems modelling and fault analysis. Theory and practice*. UK, Oxford: Linacre House, 2008.
85. DEBNATH, J. K., W.-K. FUNG, A. M. GOLE, and SH. FILIZADEH. Electromagnetic transient simulation of large-scale electrical power networks using graphics processing units. *25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) ©2012 IEEE*.
86. JUN-QING, L., CH. YA-LI. Study on Electromagnetic Transient Characteristic of DFIG During Voltage Dip. *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 26–29, 2013, Busan, Korea*.
87. LIU, B., Y. TONG, X.-P. DENG, X.-X. FENG. Measuring of very fast transient overvoltage and very fast transient current generated by disconnector operating. *2014 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2014) Chengdu, 20–22 Oct. 2014*, pp. 1349–1354.

Patentiniai dokumentai:

88. LIETUVOS RESPUBLIKOS VALSTYBINIS PATENTŲ BIURAS. Pažyma nr. 2005 067.
89. UAB ENERGIJOS SRAUTAS. A method of earth fault identification and location in three-phase electrical network. Inventors: Markevičius, Andronis Linas, Gudžius, Saulius Morkvenas, Alfonsas, Markevičius, Linas. Publication Number: WO/2007/011196. Publication Date: 25.01.2007. International Application No.: PCT/LT2006/000006. International Filing Date: 18.07.2006. Priority Data: 2005 06 07. Int. Class.: G01R 31/08 (2006.01). Publication Language: English (EN).

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

STRAIPSNIAI

TARPTAUTINĖSE DUOMENŲ BAZĖSE ESANČIUOSE MOKSLO LEIDINIUOSE PASKELBTI STRAIPSNIAI

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

1. Gudžius, Saulius; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas Andronis; Miliūnė, Renata; Markevičius, Linas. Recognition of fast electromagnetic transients in HV overhead lines // Electronics and Electrical Engineering = Электроника и электротехника = Elektronika ir elektrotechnika. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1215. 2011, nr. 1(107), p. 103–106. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Computers & Applied Sciences Complete; Central & Eastern European Academic Source]. [0,283]. [IF (E): 0,913 (2011)]

Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

1. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. 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, ISSN 1822-3249, Białystok-Kaunas: Technologija. 2005, p. 329–332.
2. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. Electromagnetic transient processes recognition model in insulated neutral net // EMD 2006: proceedings of the XVI International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 27–29 2006, Kaunas, Lithuania / Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University, Białystok Technical University. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-3249. 2006, p. 242–247. [ISI Proceedings]. [0,250]

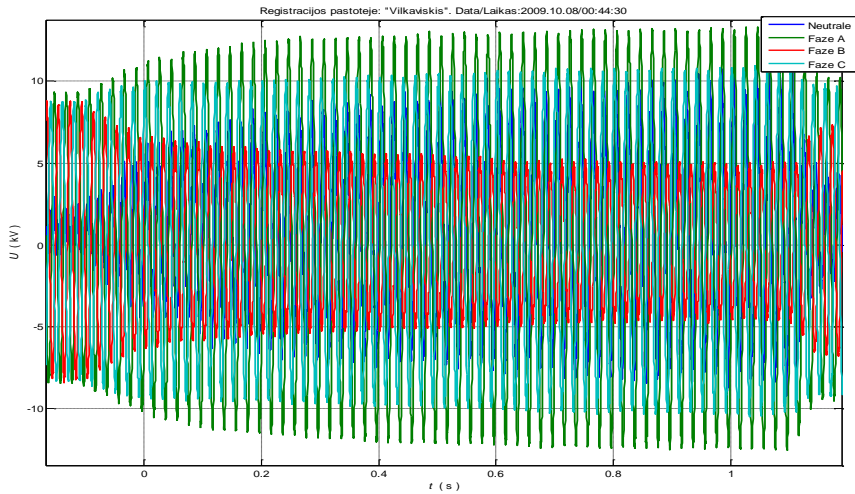
3. Gudžius, Saulius; Jonaitis, Audrius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. The spotting reliability of the transient processes during one phase to ground fault // EMD 2007: proceedings of the XVII International Conference on Electromagnetic Disturbances, September 19–21 2007, Białystok, Poland / Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University, Białystok Technical University. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-3249. 2007, p. 183–186. [ISI Proceedings]. [0,200]
4. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas; Navickas, Algimantas Stanislovas. The spotting reliability of the transient processes during one phase to ground fault // Electrical and Control Technologies-2008: selected papers of the 3rd international conference, May 8–9 2008, Kaunas, Lithuania / Kaunas University of Technology, IFAC Committee of National Lithuanian Organisation, Lithuanian Electricity Association, Full Member of EUROELECTRIC. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-5934. 2008, p. 268–271. [ISI Proceedings]. [0,200]
5. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. Estimation of earth-faults in insulated neutral networks by earth-fault initiation's character // EMD 2008: the 18th International Conference "Electromagnetic Disturbances EMD'2008", September 25–26 2008, Vilnius, Lithuania: proceedings, Vol. 2 / Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University, Białystok Technical University. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-3249. 2008, p. 37–40. [ISI Proceedings]. [0,250]

KITUOSE RECENZUOJAMUOSE MOKSLO LEIDINIUOSE PASKELBTI STRAIPSNIAI

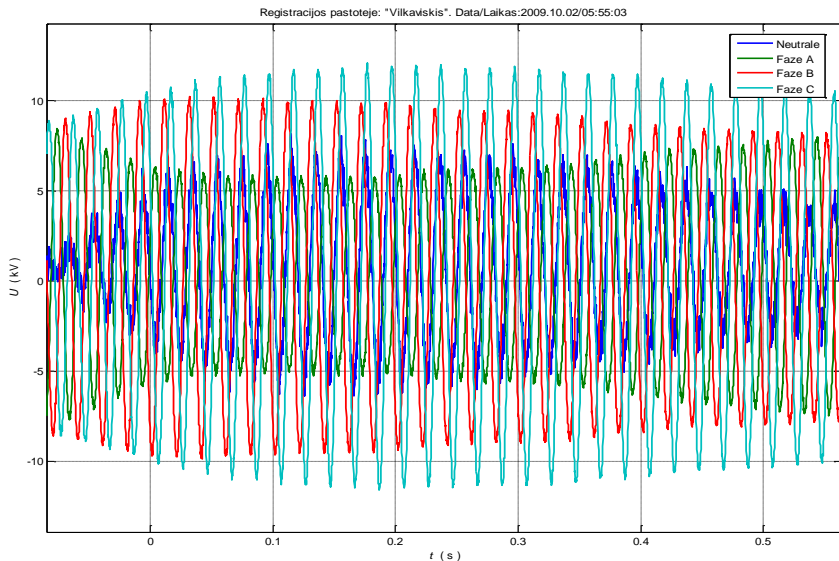
Konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

1. Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas. Numerical modelling for the recognition of the very fast electromagnetic transients // Proceedings of the 19th International Conference Electromagnetic Disturbances EMD 2009 / Białystok Technical University, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-3249. 2009, p. 181–184. [0,250]
2. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. Pradinių įžemėjimo pereinamųjų vyksmų eksperimentinis tyrimas // Elektros ir valdymo technologijos ECT 2010: 5-osios tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinys / Kauno technologijos universitetas. Elektros ir valdymo inžinerijos fakultetas. Kaunas: Technologija, 2010. ISBN 9789955258148. p. 21–24. [0,250]
3. Gudžius, Saulius; Markevičius, Linas Andronis; Morkvėnas, Alfonsas; Markevičius, Linas. Analysis of fast electromagnetic processes in overhead distribution lines // Proceedings of the XX International Conference on Electromagnetic Disturbances EMD 2010 / Białystok Technical University, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-3249. 2010, p. 183–186. [0,250]

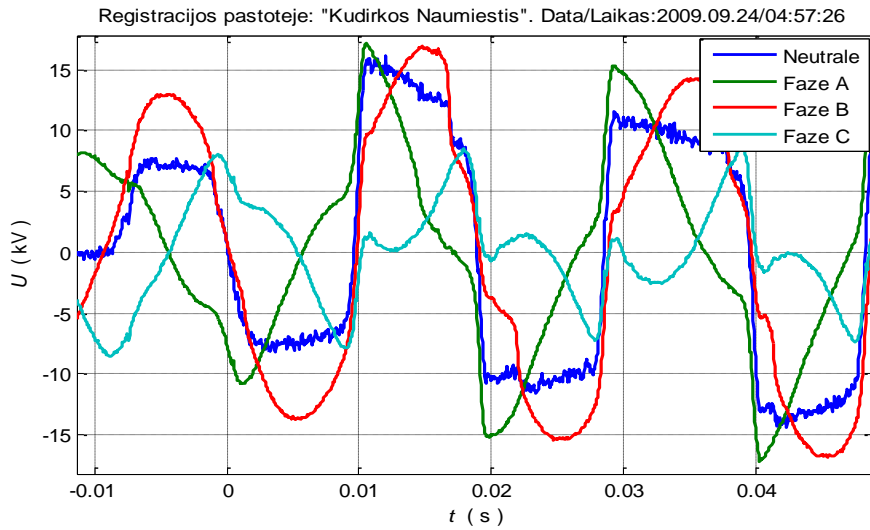
PRIEDAS. GEDIMŲ VIENOJE ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO FAZĖJE REGISTRACIJŲ OSILOGRAMOS



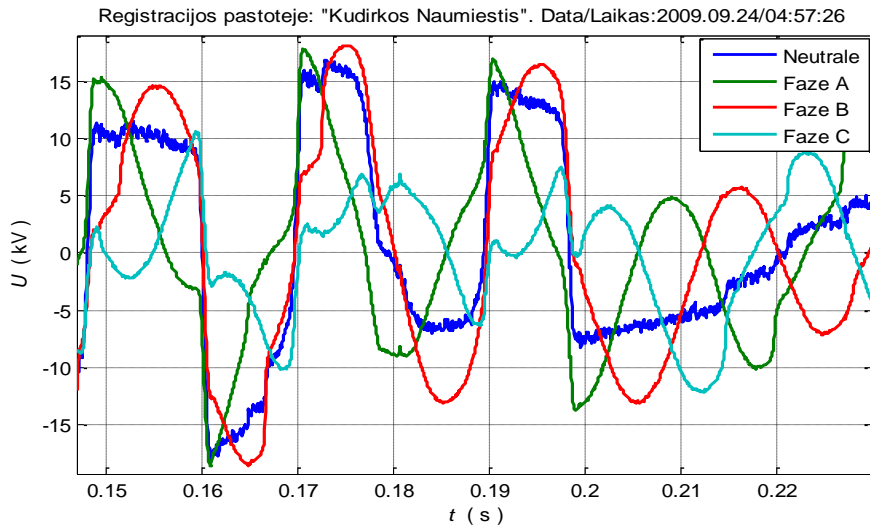
P1 pav. Pereinamojo vyksmo registracija dėl trumpalaikio gedimo vienoje fazėje (fazė B), laiko mastelis ~1 s



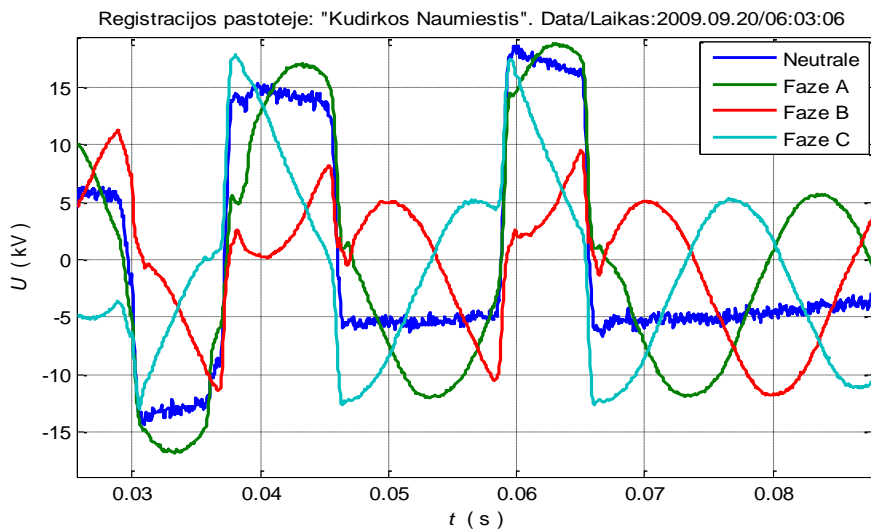
P2 pav. Pereinamojo vyksmo registracija dėl trumpalaikio gedimo vienoje fazėje (fazė B), laiko mastelis ~0,5 s



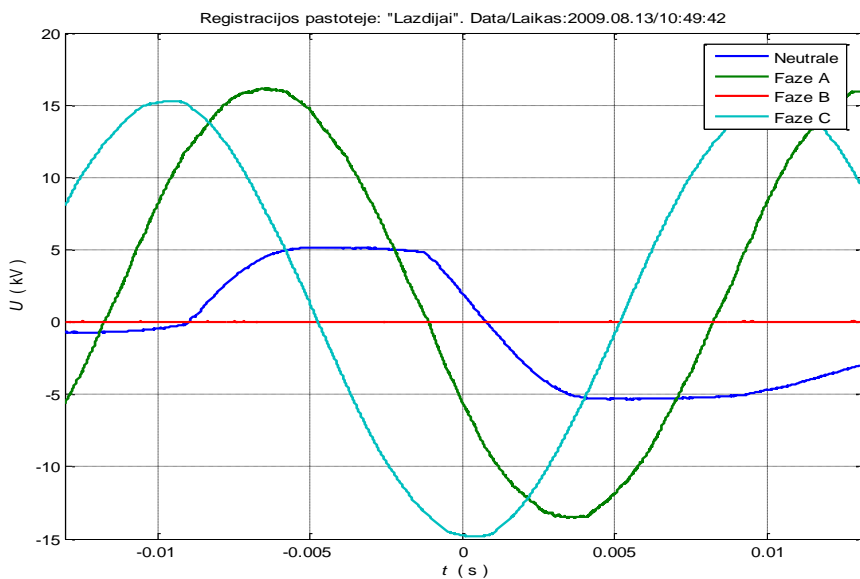
P3 pav. Pereinamojo vyksmo (šakos prisilietimas) pradžios registracija dėl daugkartinio trumpalaikio gedimo vienoje fazėje (fazė C)



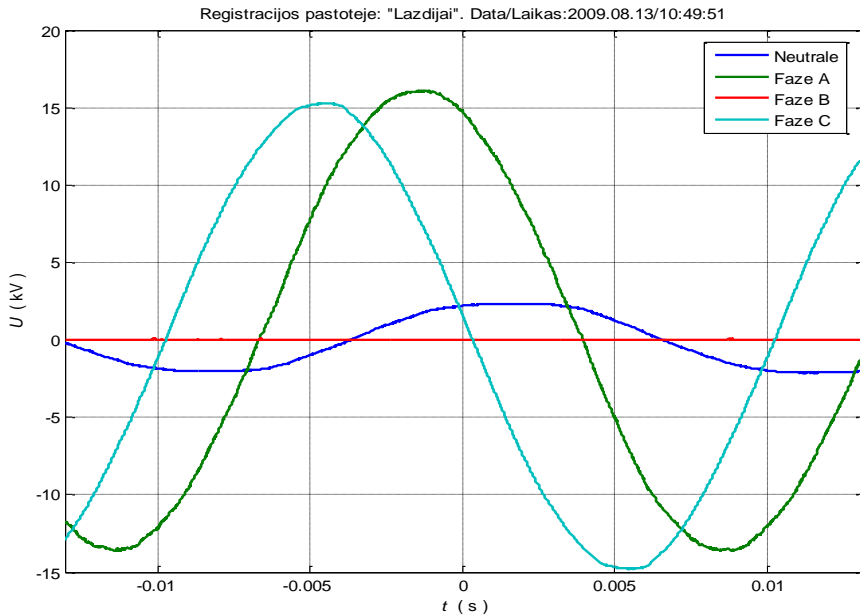
P4 pav. Pereinamojo vyksmo (šakos prisilietimas) pabaigos registracija dėl daugkartinio trumpalaikio gedimo vienoje fazėje (fazė C)



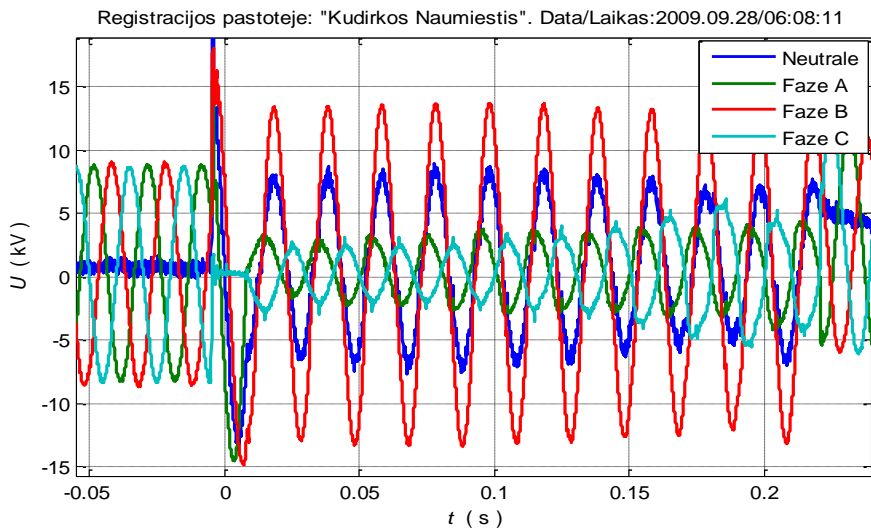
P5 pav. Pereinamojo vyksmo (pamušimas izoliatoriuje) registracija dėl pasikartojančio trumpalaikio gedimo vienoje fazėje (fazė B)



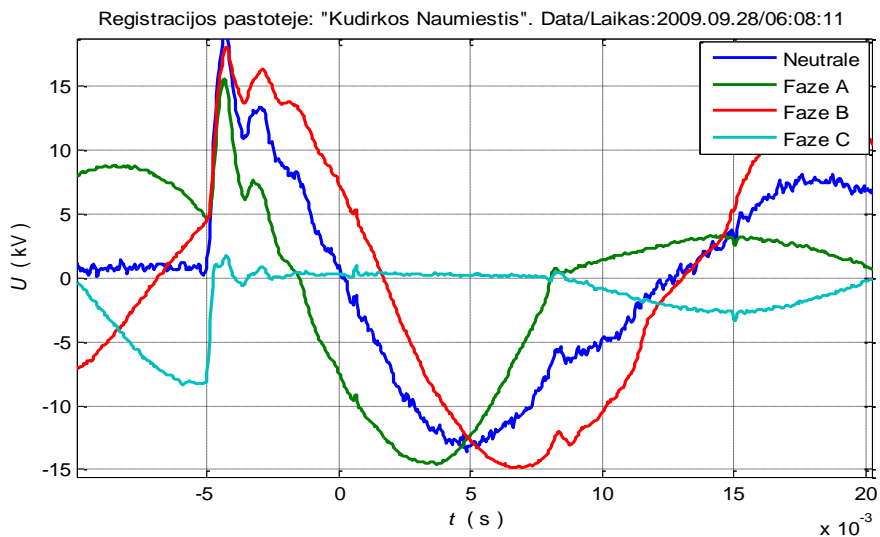
P6 pav. Pereinamojo vyksmo dėl gedimo vienoje fazėje (fazė B) per didelę varžą registracija (vyksmo pradžia)



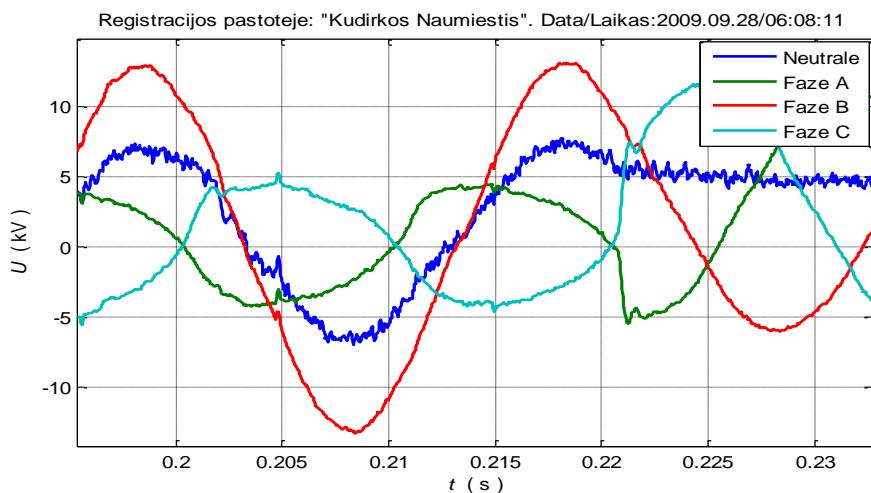
P7 pav. Pereinamojo vyksmo dėl gedimo vienoje fazėje (fazė B) per didelę varžą registracija (vyksmo pabaiga)



P8 pav. Gedimo vienoje fazėje (fazė C) perėjimo į trumpąjį susijungimą su faze A pereinamojo vyksmo registracija, laiko mastelis ~0,2 s



P9 pav. Gedimo vienoje fazėje (fazė C) perėjimo į trumpąjį susijungimą su faze A pereinamojo vyksmo registracija, laiko mastelis $\sim 0,02$ s



P10 pav. Pereinamojo vyksmo po dvifazio trumpojo susijungimo tarp fazių A ir C atjungimo registracija

SL344. 2016-03-08, 12,25 leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas 99
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas