



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Gediminas Rožanskas**

**RELINĖS APSAUGOS TIKRINIMO ĮRANGOS IŠMANIAJAME  
TINKLE TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Saulius Gudžius

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**RELINĖS APSAUGOS TIKRINIMO ĮRANGOS IŠMANIAJAME  
TINKLE TYRIMAS**

**Baigiamasis magistro projektas**  
**Elektros energetikos sistemos (612H63005)**

**Vadovas**

(parašas) Prof. dr. Saulius Gudžius

(2017-06-05)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Almantas Bandza

(2017-06-05)

**Projektą atliko**

(parašas) Gediminas Rožanskas

(2017-06-05)

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Gediminas Rožanskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos 612H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Relinės apsaugos tikrinimo įrangos išmaniajame tinkle tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 5 d.  
Kaunas

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

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

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Rožanskas, G. Relinės apsaugos tikrinimo įrangos išmaniajame tinkle tyrimas. *Magistro baigiamasis projektas / vadovas* prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2017. 41 psl.

## SANTRAUKA

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami elektros energetikos sistemos modeliavimo principai bei metodika, taip pat, relinės apsaugos ir automatikos bandymų programinė įranga išmaniajame tinkle. Kuriamas algoritmas greitam didelės elektros sistemos stacionaraus režimo parametrų skaičiavimui. Kuriamos sistemos vienas iš tikslų, pritaikyti ją prie sukurtos komercinės *OMICRON RelaySimTest* programinės įrangos paketo, kad būtų galima kompleksiškai vertinti elektros sistemą, kurios dalyje atliekami relinės apsaugos ir automatikos bandymai. Darbe analizuojami šių dviejų programų veikimo principai. Ištyrus tiek elektros sistemos modeliavimo algoritmą *MATLAB* aplinkoje, tiek *OMICRON RelaySimTest* programinę įrangą buvo padaryta išvada, kad algoritmas greitai suskaičiuoja didelės ir sudėtingos elektros sistemos tinklo stacionaraus režimo parametrus. Toks algoritmas galėtų papildyti *RelaySimTest* programinę įrangą ir suteikti jai lankstumo, norint tirti visą energetinę sistemą, o ne tik jos dalį.

*Reikšminiai žodžiai (iki 8 žodžių):* Algoritmas, modeliavimas, energetika, linija, relinė, stacionarus, automatika.

Rožanskas, Gediminas. Research on Testing Equipment of Relay Protection and Automation in Smart Grid. *Master of Science qualification degree* / supervisor doc. dr. Saulius Gudžius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of power systems.

Kaunas, 2017. 41 p.

## SUMMARY

This thesis examines the power system modeling principles and techniques, as well as relay protection and automation testing software in smart grid. An algorithm for fast high-power system stationary mode parameters calculation has created. One of the goals of this creating system is to adapt it to commercial *OMICRON RelaySimTest* software in order to assess a complex electrical system, which carried out part of relay protection and automation testing. The paper analyzes the two programs operating principles. Examination of the electrical system simulation algorithm in *MATLAB* environment and *OMICRON RelaySimTest* software, it was concluded that the algorithm able to quickly calculate a large and complex power system network stationary mode settings. Such an algorithm could be added to a *RelaySimTest* software and give it the flexibility to explore the entire energy system, not just part of it.

*Keywords (up to 8 words): Algorithm, modeling, energetics, line, relay, stationary, automation.*

# TURINYS

ĮVADAS.....	9
1. APŽVALGINĖ DALIS .....	10
1.1 Elektros energetinė sistema.....	10
1.2 Išmanusis tinklas .....	11
1.3 Relinė apsauga ir automatika .....	15
1.3.1 RAA bandymų įrangos pradžia .....	17
1.3.2 Skaitmeninis realaus laiko simulatorius .....	17
1.3.3 Standartizuotas ryšys tarp skaitmeninės RAA ir valdymo centro .....	19
1.3.4 IEC 61850 panaudojimas .....	20
2. METODINĖ DALIS .....	22
2.1 Programinė įranga sistemos apsaugų bandymui – RelaySimTest.....	22
2.2 Elektromagnetinių vyksmų modeliavimas elektros tinkle .....	23
2.2.1 Savitųjų oro linijų parametrų skaičiavimo metodai.....	24
2.2.2 Savitųjų parametrų oro linijoms verčių suradimo modeliai .....	27
2.2.3 Išmanaus sudėtingo skirstomojo tinklo modelio algoritmas .....	28
3. TIRIAMOJI DALIS .....	30
3.1 Skaičiuojamoji tiriamos elektros energetikos sistemos dalies schema .....	30
3.2 Modeliuojamo tinklo struktūra MATALB aplinkoje .....	30
3.3 Modeliuojamo tinklo struktūros avarinis režimas RelaySimTest programinės įrangos aplinkoje .....	34
IŠVADOS .....	39
LITERATŪROS SĄRAŠAS .....	40

## **LENTELIŲ SĄRAŠAS**

1 lentelė. Išmanaus tinklo charakteristikos [6].....	13
2 lentelė. EES ir išmanaus tinklo technologijų palyginimas [6] .....	15

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Elektros energetinės sistemos struktūros pavyzdys [2].....	10
1.2 pav. Tobulėjančios elektros energetikos sistemos [6].....	12
1.3 pav. Išmanūs tinklai gali suvienyti elektros sistemos šalininkų tikslus [6] .....	13
1.4 pav. Išmanaus tinklo technologijų sritys [6] .....	15
1.5 pav. Tipinė trifazė kintamos srovės RAA sujungimų schema [7] .....	16
1.6 pav. Realus ir ne realus laiko simuliacijų iliustracija. a) realaus laiko, b) ne realaus laiko [9] .....	18
1.7 pav. IEC 61850 Pastotės architektūra [10].....	21
2.1 pav. Stacionaraus režimo skirstomajame tinkle modelio algoritmas.....	29
3.1 pav. Modeliuojamojo tinklo struktūra.....	30
3.2 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros nusistovėjusio režimo fazinių įtampų vertės.....	31
3.3 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros nusistovėjusio režimo fazinių srovių vertės .....	31
3.4 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių įtampų 2-ame mazge vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos .....	32
3.5 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių įtampų 1-ame mazge vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos .....	32
3.6 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių srovių linijoje „Pastotė-1 – 1 mazgas“ srovės vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos .....	33
3.7 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių srovių linijoje L1 srovės vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos .....	33
3.8 pav. OMICRON RelaySimTest programos aplinkoje sumodeliuota tinklo struktūra ....	34
3.9 pav. Modeliuojamos tinklo struktūros pradiniai sistemos (a) ir saugomos linijos (b) parametrai .....	35
3.10 pav. Modeliuojamos tinklo struktūros nusistovėjusio stacionaraus režimo parametrų vertės.....	36
3.11 pav. Trifazio trumpojo jungimo vieta modeliuojamoje tinklo struktūroje.....	36
3.12 pav. Trumpas jungimas ir jo parametrų vertės.....	37
3.13 pav. Trifazio trumpojo jungimo srovių vertės saugomoje linijoje.....	37
3.14 pav. Avarinio režimo atjungimas, įtampų ir srovių verčių nusikrovimas.....	38



## ĮVADAS

Elektros energetikos infrastruktūra per daugelį metų gerokai išsivystė ir dabar jau galima sakyti, kad yra sudėtingiausia, kada nors žmogaus sukurta sistema. Tobulėjant įvairioms technologijoms, žengiant į skaitmeninį amžių, elektros energijos poreikis ženkliai išaugo, lyginant su istorija, kai energetinė infrastruktūra tik buvo pradėta taikyti. Su didesniais elektros energijos poreikiais elektros tiekimo uždaviniai - patikimumas, stabilumas, kokybė - darosi vis svarbesni. Norint įvykdyti šias pagrindines elektros sistemos užduotis, reikalingas atsakingas požiūris į tinklo apsaugas, kurios greitai ir efektyviai reaguotų į tinkle susidariusius nepageidaujamus režimus.

Pastaruoju metu vis daugiau dėmesio skiriama relinės apsaugos ir automatikos įrangai bei technologijų vystymui. Kad ši įranga veiktų patikimai ir tinklą apsaugotų kaip įmanoma geriau, išvengiant netikslių suveikimų, kas neretai pasitaiko šių dienų praktikoje, reikalingas ir tikslus relinės apsaugos sistemų suderinimas su elektros sistema. Įvairūs įrangos bandymų komplektai yra kuriami, tobulinami, kad vartotojas galėtų kuo tiksliau atlikti derinimo darbus. Norint išgauti kuo tikslesnius rezultatus, reikalinga elektros sistemą vertinti kompleksiskai, t.y. kaip vientisą organizmą, kuriame pasikeitus vienai daliai atitinkamai reaguoja ir kita jos dalis.

Darbo tikslas:

1. Sukurti elektros sistemos modeliavimo algoritmą, kuris gebėtų greitai skaičiuoti didelio tinklo stacionaraus režimo pagrindinius parametrus ir kurį būtų galima pritaikyti relinės apsaugos ir automatikos bandymų programinėje įrangoje.

Darbo uždaviniai:

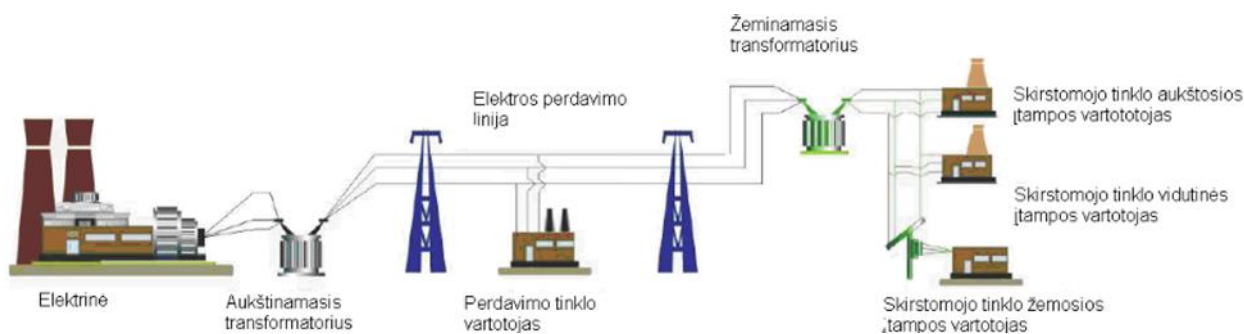
1. Išnagrinėti ir aprašyti elektros sistemos modeliavimo principus;
2. Sudaryti kuriamos sistemos veikimo algoritmą;
3. Išnagrinėti skaitmeninės realaus laiko simuliacijos ypatumus;
4. Išnagrinėti relinės apsaugos ir automatikos bandymų programinės įrangos paketą;
5. Pritaikyti sukurtą algoritmą relinės apsaugos ir automatikos bandymų programinės įrangos paketui.

# 1. APŽVALGINĖ DALIS

## 1.1 Elektros energetinė sistema

Elektros energetikos sistema (EES) – tai didžiausia ir sudėtingiausia, kada nors žmogaus sukurta ir išvystyta, energetinė infrastruktūra, apimanti kelis pagrindinius sektorius, susijusius su elektros energijos gamyba, jos perdavimu bei suvartojimu. Elektrinės, pastotės, skirstyklos, įvairių įtampų linijos bei vartotojai – tai pagrindinės ir privalomos EES dalys (1.1 pav.). Ji apima labai didelius plotus ir užtikrina viso regiono ar šalies elektros energijos tiekimą. Tiesa, kartais tinklas gali aprėpti dvi ar daugiau valstybių, tuomet tokia sistema jau yra vadinama jungtine ir turi išpildyti pagrindinę sąlygą – privalo veikti tuo pačiu srovės dažniu, sinchroniškai.

Gamyba bei suvartojimas privalo visada veikti kaip gyvas organizmas, t. y. elektros energijos gamyba turi būti tiesiogiai susijusi su vartotojų poreikiais, kitaip sistema gali išeiti iš rikiuotės ar net visiškai užgesti. [1]



1.1 pav. Elektros energetinės sistemos struktūros pavyzdys [2]

Ši infrastruktūra padeda išspręsti daugelį problemų. Visų pirma, ženkliai padidėja sistemos patikimumas, nes į bendrą tinklą prijungti vartotojai gali būti maitinami skirtingais keliais ar net nuo skirtingų energijų gaminančių mazgų. Taip pat ji pagerina elektrinių agregatų darbo režimus, kadangi sistemos grafikas tampa tolygesnis, lyginant su pavieniais vartotojais ir jų apkrovomis. Centralizuotas sistemos stebėjimas bei valdymas – tai dar vienas EES pranašumas, kurio pagalba visą sistemą galima kontroliuoti nuotoliniu būdu, panaudojant šiuolaikines, pažangiausias ryšio bei automatikos sistemas.

Kadangi elektros sistema yra labai didelė, tai įtakoja ir jos sudėtingumą. Reikalingos ilgos elektros perdavimo linijos, kurios didina elektrinius nuostolius. Taip pat, norint užtikrinti stabilų bei patikimą EES darbą, atsiranda poreikis relinės apsaugos ir automatikos sistemoms, sugebančioms atlikti automatinę tinklo stebėsenos funkciją bei užtikrinti avarinių režimų sparčius perjungimus, kurių žmogaus ranka ir protas per tokį trumpą laikotarpį padaryti nespėtų. Tokios technologijos yra labai pažengusios, todėl joms įrengti reikalingi kompetentingi specialistai ir tai kainuoja didelius pinigus. [2]

Elektros tinklų pagrindinė užduotis yra tiekti vartotojui kokybišką bei patikimą energiją. Šių dienų moderni visuomenė vis labiau ir labiau tampa priklausoma nuo nuolatinio, nepertraukiamo bei kokybiško elektros energijos prieinamumo. Kompiuteriniai ir telekomunikaciniai, geležinkelių, bankininkystės ir pašto skyrių tinklai, taip pat, nepertraukiamų procesų industrija, gyvybės palaikymo sistemos – visa tai tik maža dalis programų, kurios tiesiog negalėtų pilnai funkcionuoti be patikimo, nenutrūkstamo bei kokybiško energijos tiekimo. Įvykus net menkiausiam sistemos sutrikimui ar nutrūkus elektros tiekimui, būtų pridaryta labai daug įvairios žalos ir nepatogumų. [3] Kad to išvengti, reikalinga plėtoti EES ir diegti vis pažangesnes technologijas, kurios padėtų išvengti kritinių nelaimių, padėtų vis greičiau ir patikimiau valdyti tinklo vartotojų apkrovų srautus, kuo sparčiau atlikti reikalingus perjungimus, greitai ir užtikrintai reaguoti į avarijas, jas atskiriant nuo elektros tinklo, kad kuo mažiau vartotojų liktų be elektros energijos.

## **1.2 Išmanusis tinklas**

Dabartinis energetinis tinklas buvo pradėtas eksploatuoti prieš daugiau nei šimtmetį, kai elektros energijos poreikiai dar buvo žymiai mažesni nei šių dienų. Tais laikais, energijos gamyba buvo lokalizuota ir orientuota įrengti aplink atskiras bendruomenes. Dažniausiai tai būdavo gyvenamieji namai ar nedidelius energijos poreikius keliantys vartotojai, kuriems elektros energijos reikėdavo tik paprastai kaitrinei lemputei ar radijo imtuvui. Energetinis tinklas ankstesniais laikais buvo projektuojamas ir statomas taip, jog sistemos tiekėjas galėtų tiekti elektrą tiesiai į vartotojų namus. Tokia infrastruktūra būdavo apribota tik vienu puse tiekimu iš tinklo iki vartotojo, kas šiais laikais sukeltų begalę problemų, nes energijos poreikiai sparčiai keičiasi, apkrovų grafikai svyruoja nebe mėnesiais, savaitėmis, o valandomis ir tinklui tada reikia prisitaikyti prie vartotojų realiu laiku. [4]

Elektros energijos pramonė yra pasiruošusi žengti žingsnį, kad pakeistų centralizuotą, gamintojo valdomą elektros tinklą į tokį, kuris yra mažiau centralizuotas ir daugiau interaktyvus vartotojui. Perėjimas prie pažangesnės tinklo struktūros gali pakeisti visą industrijos verslo modelį bei jo santykius su tarpininkais, įskaitant ir įtakojant sistemos įrankius, reguliatorius, energijos paslaugų tiekėjus, technologijų ir automatikos prekybininkus bei elektros energijos vartotojus.

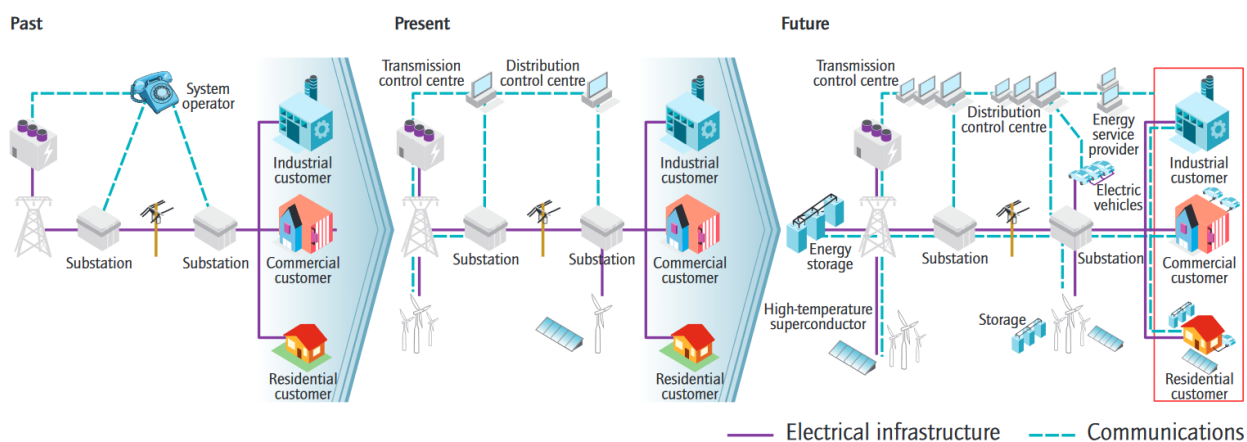
Pažangesnis tinklas padarys šią transformaciją įmanoma, atnešdamas filosofijas, koncepcijas ir technologijas, kurios jau prisileido internetą prie elektros tinklų. Visų svarbiausia, tai įgalins visos industrijos geriausias idėjas tinklo modernizavimui, kuris leis parodyti pilną potencialą. [5]

Energijos saugumas, klimato kaita bei ekonomikos augimas - šiuo metu tai yra pagrindiniai globalūs iššūkiai, kuriuos norint pasiekti, reikia neatidėliotinai spartinti mažą kiekį CO<sub>2</sub> emisijos išskiriančių energetinių išteklių plėtrą. Išmanieji tinklai yra ypač svarbūs tuo, kad įgalina

prisitaikyti prie vartotojų energetinės paklausos ir švariosios energijos technologijas, tokias kaip elektromobiliai, įvairūs atsinaujinančios energijos išteklių.

Išmanusis tinklas - tai elektros tinklas, naudojantis skaitmenines bei kitas pažengusias technologijas, kad gebėtų stebėti bei valdyti elektros energijos srautus iš įvairių generacijos šaltinių tam, jog patenkintų įvairius galutinio vartotojo poreikius. Išmanieji tinklai koordinuoja visų sistemos generatorių, tinklo operatorių, galinių vartotojų ir elektros rinkos tarpininkų poreikius bei galimybes, kad būtų galima valdyti visas sistemos dalis kaip įmanoma efektyviau, sumažinant išlaidas bei gamtai padarytą žalą. Siekiama padidinti elektros tinklo patikimumą, valdymo lankstumą, veikimo stabilumą, gerinti tiekiamos elektros energijos kokybę. Tokia pažangi koncepcija apima be galo didelę inovatyvių techninių sprendimų sritį.

Nors daugelis valstybių jau pradėjo diegti išmaniąsias technologijas į savo tinklus, tačiau visiems regionams dar reikės didelių papildomų investicijų ir nuoseklaus planavimo norint turėti pažangesnį elektros tinklą. Išmanieji tinklai yra besivystantis technologijų rinkinys, kuris bus taikomas skirtingus parametrus turintiems tinklams, įvertinant įvairių valstybių finansines galimybes, ekonominį lygį, esamo elektros tinklo gebėjimą prisitaikyti prie naujų technologijų ir pan. 1.2 pav. parodyta elektros energetinės sistemos evoliucija, kai keičiasi ir tobulėja technologijos.

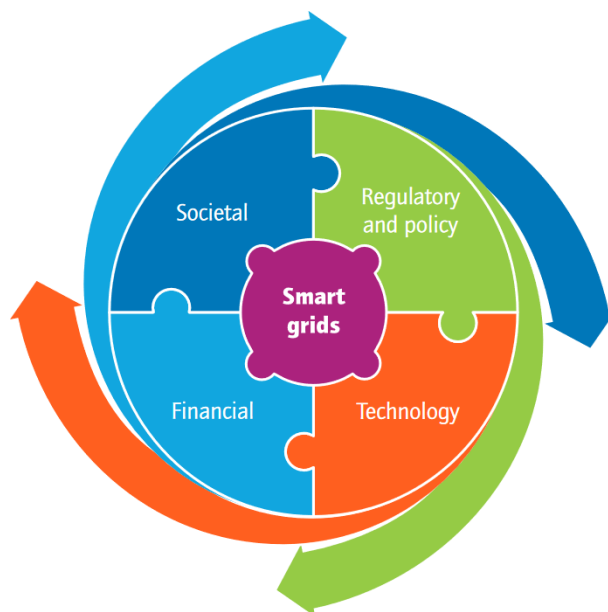


**1.2 pav.** Tobulėjančios elektros energetikos sistemos [6]

Pasaulinės energetikos sistemos susiduria su įvairiais iššūkiais: senėjančiomis infrastruktūromis, nuolatiniu vartotojų energijos poreikių augimu, įvairių atsinaujinančios energijos šaltinių paieška ir panauda, didėjančia elektromobilių paklausa bei poreikiu užtikrinti saugios ir švarios energijos tiekimą.

Šie iššūkiai taip pat privalo būti sprendžiami atsižvelgiant į kiekvienos valstybės finansinius, ekonominius bei techninius rodiklius. Atsižvelgiant į nepaprastai reglamentuotą energetikos sistemą, išmanaus tinklo šalininkai turi užtikrinti, kad jie bendradarbiaus su visais tarpininkais, įskaitant įrangos gamintojus, sistemos operatorius, vartotojus bei jų gynėjus, plėtojant pritaikytus

techninius, finansinius, reguliavimo sprendimus, atskleidžiant pilną išmanaus tinklo potencialą (1.3 pav.). Pagrindinės išmanaus tinklo charakteristikos aprašytos 1 lentelėje [6].

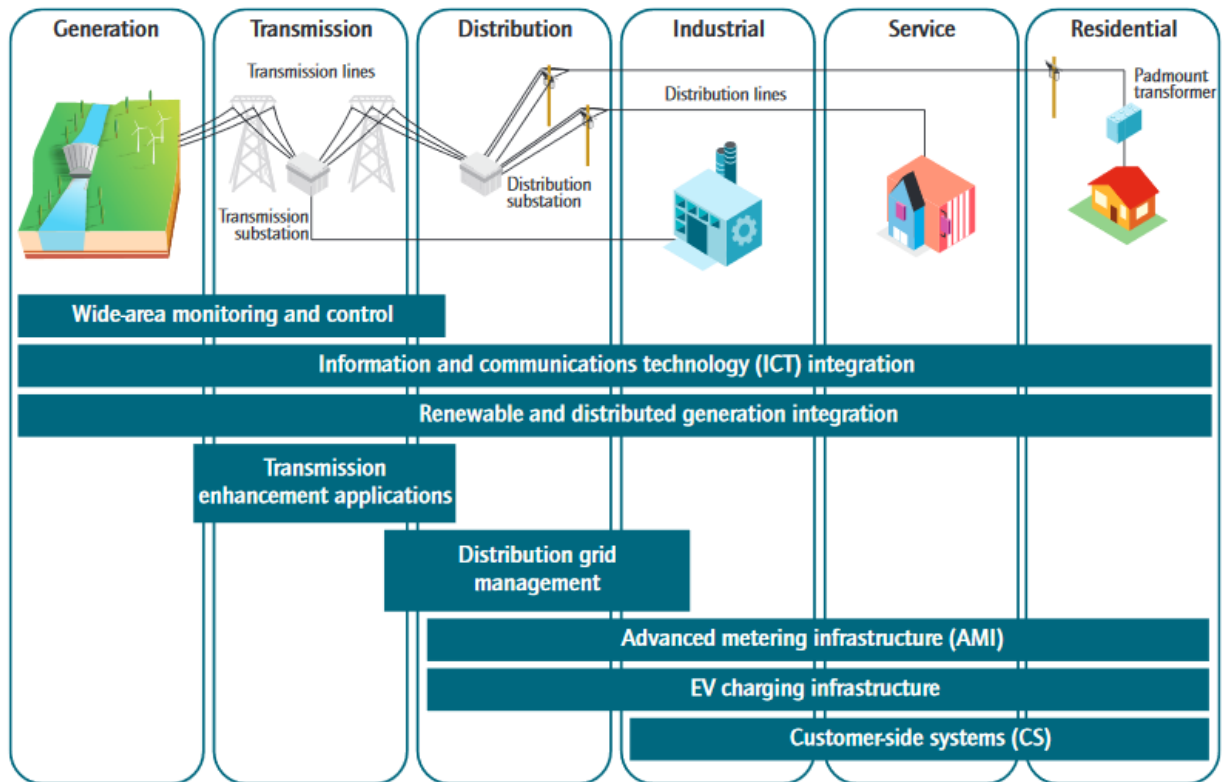


**1.3 pav.** Išmanūs tinklai gali suvienyti elektros sistemos šalininkų tikslus [6]  
**1 lentelė.** Išmanaus tinklo charakteristikos [6]

Charakteristika	Aprašymas
<b>Įgalina informuotą klientų dalyvavimą</b>	Vartotojai padeda balansuoti poreikį bei tiekimą, ir garantuoja patikimumą, keičiant elektros panaudojimo bei prekybos įpročius. Šie pakeitimai yra rezultatas, kai vartotojas turi pasirinkimą, kuris motyvuoja skirtingą pirkimo ir elgesio struktūrą. Šie pasirinkimai įtakoja naujas technologijas, naują vartotojų elektros energijos panaudojimo informaciją, ir naują energijos kainų ir paskatų formą.
<b>Sutelkia visas gamybos bei energijos kaupimo opcijas</b>	Išmanus tinklas pritaiko ne tik dideles ir centralizuotas elektrines, tačiau ir didėjančius vartotojų paskirstytos energijos gamybos išteklių masyvus. Šių išteklių integravimas, įskaitant atsinaujinančius energijos šaltinius, nedidelio masto kombinuotas šilumos ir energijos šaltinius, taip pat ir energijos kaupimą, greitai padidės, kartu su visa tos pačios vertės tinklu, nuo tiekėjo iki rinkodaros ir iki tiekėjo.
<b>Įgalina naujus produktus, paslaugas ir rinkas</b>	Teisingai suprojektuotos ir valdomos rinkos efektyvina vartotojų galimybę pasirinkti tarp konkuruojančių paslaugų. Energija, talpa, vieta, laikas, pokytis ir kokybė – kai kurie iš tinklo kintamųjų, kurie privalo būti aiškiai valdomi. Rinkos gali atlikti pagrindinį vaidmenį, valdant šiuos kintamuosius. Reguluotojams,

<p><b>Suteikia energijos kokybę tam tikram poreikių spektrui</b></p>	<p>savininkams/operatoriams ir vartotojams reikia taisyklių pakeitimų lankstumo, kad atitiktų veiklos ir rinkos sąlygas.</p> <p>Ne visoms komercinėms įmonėms ir tuo labiau, ne visiems paprastiems vartotojams reikia tos pačios elektros energijos kokybės. Išmanusis tinklas tiekia įvairios rūšies (ir kainos) elektros energiją. Aukščiausios elektros energijos funkcijos išlaidos gali būti įtrauktos į elektros paslaugų sutartį. Pažengę valdymo metodai kontroliuoja esminius komponentus, įgalinant greitą diagnozę bei įvykių (žaibai, linijų perjungimų viršįtampiai, linijų avarijos, ir harmonikų šaltiniai) sprendimus, kurie įtakoja energijos kokybę.</p>
<p><b>Optimizuoja turto panaudojimą ir darbo našumą</b></p>	<p>Išmanusis tinklas taiko naujausias technologijas, kad optimizuotų jo aktyvų panaudojimą. Pavyzdžiui, optimizuotas pajėgumas gali būti pasiektas su kintamais parametrais, kas leidžia aktyvams būti panaudotiems esant didesniems apkrovimams, toliau sekat vertinant jų galimybes. Aptarnavimo efektyvumas gali būti optimizuotas sąlygų pagrįstumu, kas laiku parodo, kokiai įrangai reikia aptarnavimo. Sistemos valdymo įrenginiai gali būti sureguliuoti, kad sumažintų nuostolius ir pašalintų perkrovas. Darbo našumas didėja, kai pasirenkama pigiausia energijos perdavimo sistema, pasiekama tarp šių sistemos kontrolės įrenginių tipų.</p>
<p><b>Užtikrina greitą tinklo atsistatymą po trikdžių, išpuolių ar stichinių nelaimių</b></p>	<p>Tinklo atsistatymas reiškia sistemos galimybę greitai ir patikimai reaguoti į susidariusią situaciją tinkle, atskiriant problematinius tinklo elementus ir paliekant likusią sistemą dirbti normaliu režimu. Ši funkcija leidžia iki minimumo sumažinti sistemos trūkius ir energijos tiekimą nuo tiekėjo iki vartotojo bei padeda tiekėjams lengviau valdyti tinklo infrastruktūrą.</p>

Didžioji dalis išmanaus elektros tinklo technologinių sričių, kurių daugelis yra individualių technologijų rinkiniai, apims visą tinklą, pradėdant gamybą, einant link perdavimo bei paskirstymo ir baigiant įvairiais vartotojų tipais. Kai kurios technologijos yra aktyviai diegiamos ir yra laikomos jau išstobulintomis tiek plėtojimo, tiek pritaikymo sąlygoms. Tuo tarpu kitos reikalauja dar daugiau patobulinimų ir projektų. Visiškai optimizuota elektros energetikos sistema išdėstys visas technologijas taip, kaip pavaizduota 1.4 pav.



1.4 pav. Išmanaus tinklo technologijų sritys [6]

Žvalgantį į jau netolimą ateitį, su visų vartotojų įsitraukimu į naujas technologijas, išmanusis tinklas pakeis esamą energetinės sistemos infrastruktūrą į išmaniąją aplinką (2 lentelė), kur vartotojai ir tiekėjai turės ženkliai geresnes sąlygas tarpusavio komunikavimo ir bendradarbiavimo santykiams, kas neabejotinai atneš daug naudos ir duos elektros tinklui reikalingų savybių.

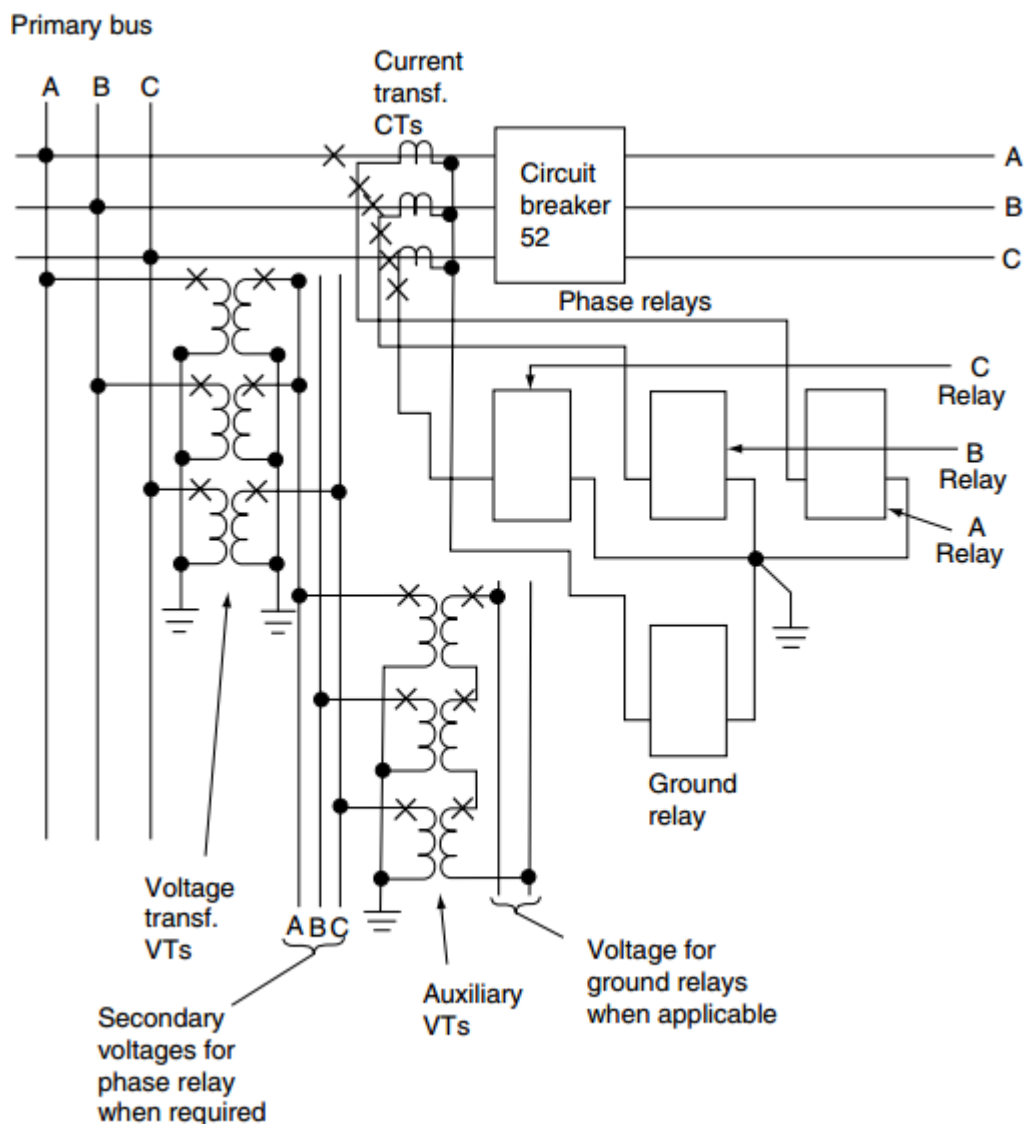
2 lentelė. EES ir išmanaus tinklo technologijų palyginimas [6]

Elektros energetinė sistema	Išmanusis tinklas
Elektromechaninis	Skaitmeninis
Vienpusis ryšys	Abipusis ryšys
Centralizuota gamyba	Paskirstyta gamyba
Keletas tinklo daviklių	Visų elementų davikliai
Neintelektualus tinklas	Save stebinti tinklas
Rankinis tinklo atstatymas	Save atstatantis tinklas

### 1.3 Relinė apsauga ir automatika

Pagrindinis sistemos relinės apsaugos ir automatikos tikslas yra atpažinti ir izoliuoti problemišką tinklo zoną kiek galima tiksliau, efektyviau ir greičiau, kad trikdžių įtaka likusiai sveikai elektros tinklo daliai būtų kuo mažesnė. Nepaisant to, yra dar penki pagrindiniai RAA uždaviniai.

Prieš juos aptariant, reikėtų paminėti, kad sąvoka „apsauga“ nereiškia, jog RAA įranga gali apsaugoti nuo avarijų tinkle, įrangos gedimų, trumpųjų jungimų, žaibų ir pan. Įranga negali numatyti ateityje ištiksiančios bėdos. Apsauginės relės veikia tik tuo atveju, jei buvo užfiksuotas nenormalus režimas ir jį paveikia taip, kad atjungtų atkarpą, kuri įtakoja susidariusį pavojingą elektros tinklui režimą. Taigi, „apsauga“ nereiškia prevencijos, tačiau ji atlieka svarbią funkciją, sustabdant avarijos vietos plitimą, ar nenormalaus režimo įtaką tinkle esančiai įrangai ar vartotojams.



1.5 pav. Tipinė trifazė kintamos srovės RAA sujungimų schema [7]

Pagrindiniai penki relinės apsaugos ir automatikos uždaviniai yra šie:

- 1) *Patikimumas*: užtikrinimas, kad RAA įranga suveiks teisingai;
- 2) *Selektyvumas*: maksimalus paslaugų tiekimo užtikrinimas su minimaliais sistemos sutrikimais;
- 3) *Operacijų greitis*: trumpiausias avarijos laikas ir minimali įtaka įrangai bei sistemos stabilumui;



- 4) *Paprastumas*: pagrindinių tinklo apsaugos reikalavimų išpildymas, panaudojant minimalų įrangos kiekį;
- 5) *Ekonomika*: maksimali apsauga kiek įmanoma mažesniais kaštais. [7]

### 1.3.1 RAA bandymų įrangos pradžia

Energetinės sistemos modeliavimas relinės apsaugos testavimui yra gana seniai žinomas ir taikomas elektros tinklų industrijoje. Viskas prasidėjo dar nuo analoginių modelių, kurie buvo pripažinti tuo laiku geriausiaisiais, arba elektroninių hibridinių modelių. Tačiau, technologijos vietoje nestovi ir tinkle esanti įranga sensta, kurią pakeičia vis naujesnė ir išmanesnė, reikalaujanti vis pažangesnių skaitmeninių technologijų, kurios leistų greitai, efektyviai bei ekonomiškai tokias sistemas išbandyti bei pritaikyti prie tinklo, kuriame ši įranga veiks. Todėl paskutinėmis tendencijomis buvo pripažinti skaitmeniniai imituojamo tinklo įrenginiai, kurie nereikalavo galingų brangių kompiuterių, bet pasiūlė papildomą tinklo apsaugų testavimo ir modeliavimo lankstumą mažesnėmis išlaidomis. Tiesa, šie įrenginiai buvo ganėtinai paprasti, t.y. jų veikimo principas buvo paremtas atviruoju ciklu (angl. *open-loop*), kas reiškia, jog tokia įranga nepalaiko abipusio ryšio tarp imituoto energijos tinklo ir testuojamos relinės apsaugos realiuoju laiku.

Nauja RAA bandymų įrangos karta buvo akcentuojama į operacijas realiuoju laiku ir buvo pripažinta, kad dirbant tokiu režimu, kai imituojamame tinkle vyksta lygiagrečiai ir avarija, reikalinga ženkliai daugiau kompiuterinių resursų. Tokios įrangos projektavimui įvairūs rėmėjai bei tyrėjų komandos kėlė tam tikrus reikalavimus: [8]

- kiek įmanoma pigesnės komercinės techninės bei programinės įrangos panaudojimas;
- įgalinti adekvatų modeliavimo bei klaidos simuliacijos kompleksiskumą;
- užtikrinti pakankamą išėjimų signalų pralaidumą;
- palaikyti realaus laiko sąveiką tarp imituojamojo tinklo bei prijungtų išorinių įrenginių bandymo metu;
- vykdyti patikimą realaus laiko programos vykdymo stebėseną.

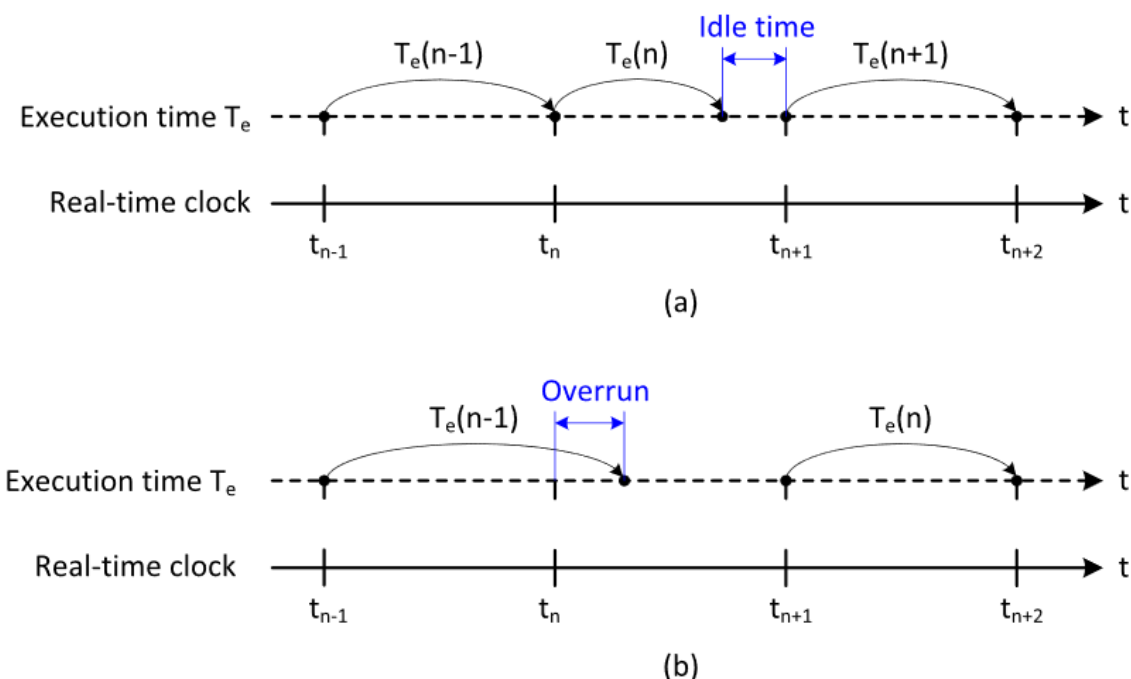
### 1.3.2 Skaitmeninis realaus laiko simulatorius

Elektros energetinės sistemos skaitmeninis simuliacijavimas realiuoju laiku (angl. *digital real-time simulation* [DRTS]) – tai atkartojimas išėties signalų (įtampų/srovių), esant reikiamam tikslumui, kurie atvaizduoja simuliuojamos realios sistemos elgseną. Kad tai pasiekti DRTS turi gebėti spręsti modelio lygtis tame pačiame laiko intervale, kaip realiame pasaulio laikrodyje. Todėl ši įranga išėjimus pateikia diskrečiaisiais laiko intervalais, kur sistemos būsenos yra paskaičiuotos tam tikru diskrečiuoju laiko momentu tam tikruose pastoviuose laiko intervaluose.

DRTS yra technika trumpalaikiam energetinės sistemos imitavimui, naudojant skaitmeninio kompiuterinio laiko domeno sprendimą, pavyzdžiui, elektromagnetinio trumpalaikio tipo metodo panaudojimas. Sistemos yra vaizduojamos ir imituojamos ant aparatinės įrangos platformos, naudojant lygiagrečių skaičiavimo būdą su modelio komponentais, kurie yra pasiekiami programinio paketo bibliotekose, pasinaudojus grafine vartotojo sąsaja.

Priklausomai nuo reikiamo simuliacijos platformos laiko, kad užbaigti išėjimų skaičiavimus kiekviename laiko žingsnyje, gali susidaryti dvi situacijos (1.6 pav.):

- 1) jei sistemos imitacijos vykdymo laikas  $T_e$  yra trumpesnis arba lygus pasirinktam laiko žingsniui, tokiu atveju ši imitacija yra laikoma kaip realaus laiko (1.6 pav.[a]);
- 2) jei laikas  $T_e$  yra vienu arba daugiau žingsnių didesnis nei pasirinkto laiko žingsnio, atsiranda laiko perviršiai ir tokia imitacija yra laikoma ne realaus laiko (1.6 pav.[b]).



**1.6 pav.** Realaus ir ne realaus laiko simuliacijų iliustracija. a) realaus laiko, b) ne realaus laiko [9]

Energetinės sistemos srityje DRTS gali būti klasifikuojamas į dvi kategorijas:

- 1) visiškai skaitmeninės realaus laiko simuliacijos – tai tokios simuliacijos, kurios reikalauja visos sistemos (įskaitant valdymą, apsaugą, ir kitus priedus), kurią būtų galima sumodeliuoti simulatoriuje bei kurios neįtraukia jokių išorinių sąsajų arba išėjimų/įėjimų (angl. *inputs/outputs* [I/Os]);
- 2) realaus laiko simuliacijos (angl. *hardware-in-the-loop* [HIL]); – tai tokios simuliacijos, kurios nuo visiškai skaitmeninių skiriasi tuo, jog kai kurios dalys yra pakeičiamos tam tikrais fiziniais prietaisais. Šis imitacijos būdas įgalina įtaisus arba techninę įrangą, dalyvaujančią simuliacijoje (angl. *device-under-test*, *hardware-*

*under-test* [HuT]), kuri prijungiama naudojant įėjimų/išėjimų sąsajas, pavyzdžiui, filtrai, skaitmeninis į analoginį arba analoginis į skaitmeninį signalą keitikliai ir pan. Ribotas realaus laiko simuliacijos valdymas gali būti atliekamas vartotojo užduotais valdymo įėjimo signalais, pavyzdžiui, įjungti ar išjungti skyriklius modeliuojamoje energetinėje sistemoje.

Apskritai, visiškai skaitmeninės simuliacijos dažniausiai naudojamos suprasti sistemos, esant tam tikriems dinaminiais vidiniams ar išoriniams poveikiams, sąlygoms. Tuo tarpu HIL simuliacijos naudojamos tam, kad sumažinti investavimo riziką į ką tik atsiradusius prototipus, išbandytus RTDS sistemoje.

Daugumą RTDS įtaisų turi tokias dažniausiai pasitaikančias savybes: [9]

- 1) keli procesoriai veikia paraleliai, kad suformuotų tikslinę platformą, kurioje imitacijos vyksta realiame laike;
- 2) pagrindinis kompiuteris panaudojamas modelio paruošimui autonominiame režime, kurį sukompiluoja ir paleidžia tikslinėje platformoje. Pagrindiniai kompiuteriai taip pat naudojami rezultatų, gautų realaus laiko simuliacijoje, stebėsenai.
- 3) I/O terminalai sąsajoms su išoriniais techniniais įrenginiais;
- 4) ryšio tinklas, smulkesnių sistemų atskirose platformose duomenų tarpusavio apsikeitimui. Atskiras ryšio tinklas privalomas duomenų perdavimui tarp pagrindinio kompiuterio bei platformos.

### **1.3.3 Standartizuotas ryšys tarp skaitmeninės RAA ir valdymo centro**

Skaitmeninių technologijų panaudojimas relinės apsaugos ir automatikos industrijoje įgalino daugiafunkcinės įrangos panaudojimą nuosekliuoju ryšiu. Pradėjus naudoti šias nuoseklaus ryšio technologijas, buvo padėtas pagrindas užpatentuotų protokolų atsiradimui, kurie naudojami ryšiui tarp pažangiųjų elektronikos įtaisų, įdiegtų pastotės valdymo sistemoje. Tai įtakojo ir kai kurių IEC standartų išleidimą:

- IEC 60870-5-101/104 – plačiai paplitę bei svarbiais tapę standartai, naudojami ryšiui tarp pastotės bei nuotolinio valdymo centro;
- IEC 60870-5-103 – protokolas skirtas ryšiui su RAA įranga.

Šie abu protokolai buvo lengvai priimti ir naudojami, tačiau labiausiai ribotą funkcionalumą parodė būtent IEC 60870-5-103 protokolas, kuris apribojo kai kurias apsaugų funkcijas bei mažą kiekį standartizuotų duomenų.

Dauguma vartotojų reikalavo atviro protokolo, kurio pagalba būtų galima išpildyti pilną apsaugų funkcionalumą: apsaugas, valdymą ir monitoringą bent jau pastotės viduje. Atviras

protokolas, tai reiškia galimybę būti nepriklausomiems nuo tam tikro gamintojo įrangos, kuri yra įdiegta į sistemą. Naudojant tokį standartą būtų galima lengvai ir nevaržomai diegti ir trečiųjų šalių techninę įrangą, nepriklausomai kokio gamintojo ji yra.

Šiam protokolui buvo keliami tokie reikalavimai:

- apimti visas ryšių tarp pastotės įrenginių problemas;
- užtikrinti suderinamumą tarp viduje pastotės esamų funkcijų;
- palaikyti visus panaudotos architektūros tipus.

Atsižvelgiant į šiuos reikalavimus buvo baigtas ir pristatytas IEC 61850 protokolas, kuriam atliko analizę jungtinių mokslininkų grupės, IEC darbo grupės bei kūrėjai. Taip pat buvo renkami duomenys iš vartotojų ir įvertinamos šio standarto galimybės bei ateities vizijos. Galiausiai šį protokolą pripažino ir dabar naudoja vis plačiau ne tik Lietuvoje bet ir visoje Europoje.

### **1.3.4 IEC 61850 panaudojimas**

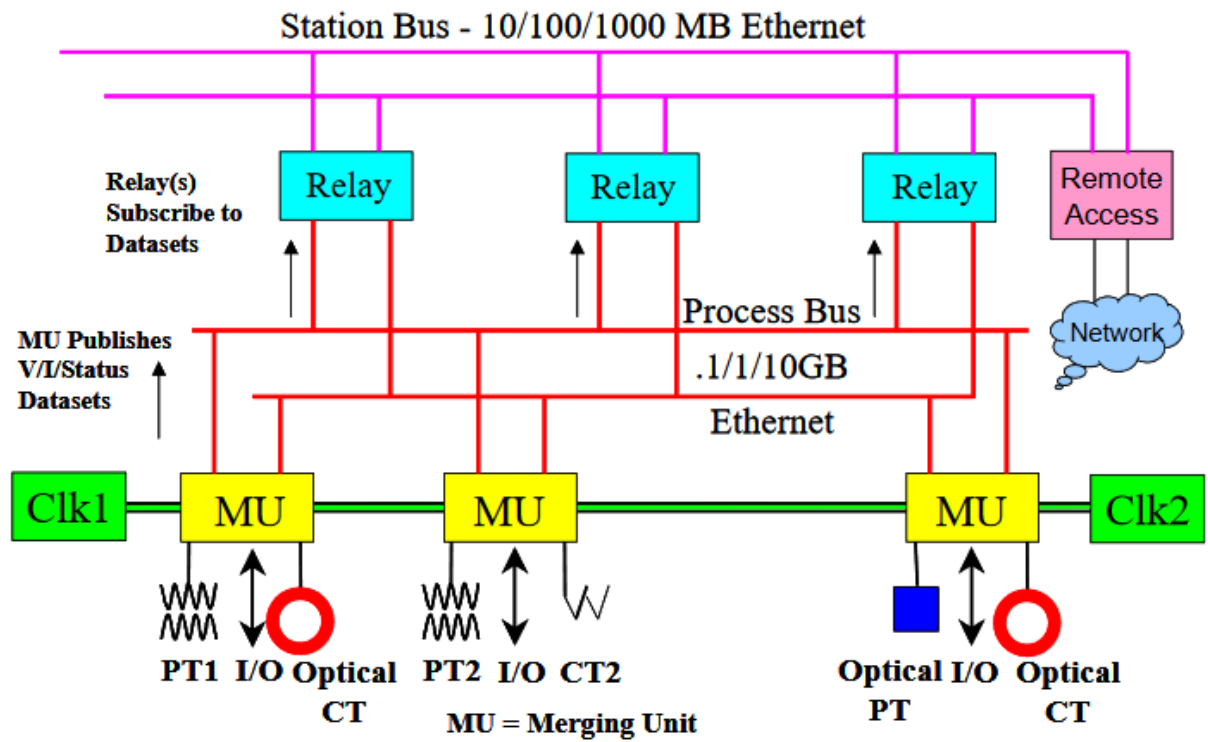
*SCADA* (angl. *Supervisory control and data acquisition*) - vienas iš pagrindinių uždavinių pastotės automatikos sistemoje:

- visų pirminių aukštos įtampos įrenginių vietinis bei nuotolinis valdymas;
- elektros energetikos sistemos matavimų bei valdomųjų įrenginių būsenos informacijos surinkimas;
- įvykių ir signalų tvarkymas.

Sudėjus visas pastotėje naudojamas ryšių technologijas, daviklius, skaitmenines automatikos sistemas į vieną visumą, gaunamas IEC 61850 protokolas. Šis protokolas turi kelis lygmenis:

- procesų lygmuo - tai toks lygmuo, kuriame vyksta pradiniai procesai. Dažniausiai čia būna visi davikliai iš kurių informacijas perduodama relinei apsaugai;
- apsaugų lygmuo - kur apdorojami visi iš įvairių daviklių gauti duomenys;
- nuotolinių ryšių lygmuo - tai vieta, per kurią praeina visi duomenys į/iš pastotės.

Visą įrangą pajungta į optinį greitą internetinį tinklą. Kiekvienas elementas turi dubliavimą, todėl nutrūkus ryšiui vienoje vietoje, bus surastas kelias per kitą ir taip bus užtikrinamas visos sistemos stabilumas. Visa įrangą tarpusavyje sujungiama komutatorių pagalba. Šios struktūros architektūra pavaizduota 1.7 paveiksle. [10]



1.7 pav. IEC 61850 Pastotės architektūra [10]

## 2. METODINĖ DALIS

Apžvalginėje dalyje buvo apžvelgtos naujausios relinės apsaugos ir automatikos bandymų įrangos technologijų tendencijos. Akivaizdu, jog dabartinė elektros energetikos sistema sparčiai keičiasi ir, tik laiko klausimas, kada išmanaus tinklo technologijos pilnai pakeis esamas, jau pasenusias technologijas. Sudėtingėjant pačiai sistemai, reikalingas ir kompleksiškas požiūris į ją. Norint, kad elektros energetikos sistema dirbtų stabiliai, patikimai bei kokybiškai, reikia žvelgti į ją kaip į vientisą gyvą organizmą, kur visos pagrindinės bei pagalbinės sistemos veikia kartu, palaikant abipusį ryšį tarp įvairių įrenginių, daviklių ir pan.

Šioje dalyje bus nagrinėjamos tiriamosios priemonės, kurios ypač aktualios relinės apsaugos ir automatikos bandymams išmaniajame tinkle. Kadangi ši sistemos dalis yra neatsiejama ir išskiriama kaip viena svarbiausių elektros energetinio tinklo dalių, kuri apsaugo sistemą nuo didelių neigiamų padarinių esant sutrikimams ar avarijoms tinkle, todėl jai skiriamas didelis dėmesys tiek suderinant įrangą prie tinklo, tiek ją eksploatuojant. Šis įrangos suderinimo procesas, kol kas, reikalauja daug resursų. Reikalingi šias technologijas išmanantys geriausi specialistai, reikalingas gana ilgas derinimo laikas bei nemažos pačio proceso lėšos. Todėl norint šį procesą padaryti efektyvesniu, reikia taikyti naujausias relinės apsaugos ir automatikos bandymų technologijas, kurios ir bus tiriamos šiame darbe.

### 2.1 Programinė įranga sistemos apsaugų bandymui – *RelaySimTest*

*OMICRON RelaySimTest* – tai programinė įranga skirta sistemos relinės apsaugos ir automatikos bandymams atlikti, naudojant vieną ar net kelis *CMC* bandymų įrankių rinkinius.

Projektuojant, skaičiuojant ar montuojant relinės apsaugos ir automatikos įrangą yra padaroma nemažai klaidų, kurios gali įtakoti netinkamą įrangos veikimą realioje sudėtingoje sistemoje. Šios programinės įrangos unikalumas tame ir slypi, jog ji, panaudojant mažiausią įmanomą operacijų kiekį, geba ištaisyti įvairias klaidas, padarytas projektavimo metu.

Moderniosios skaitmeninės apsauginės relės naudoja sudėtingus kompleksiškus algoritmus, kurie prisitaiko prie tinklo ir jo sutrikimų. Paprastas funkcijas turintys apsaugų bandymų įrangos rinkiniai dažniausiai nėra tinkami sudėtingoms sistemos testuoti arba tiesiog yra labai neefektyvus šiam darbui atlikti. *RelaySimTest* įranga apima visus šiuos reikalavimus, pasiūlydama laikiną pirminį sistemos imitavimą.

Ši programinė įranga siūlo vartotojui greitą bei efektyvią jos naudojimo pradžią, kadangi galima rinktis jau daug kartų išbandytus, standartinių situacijų modelių, šablonus, kurie jau yra įrašyti. Net ir kompleksiškesni įvairių scenarijų tinklai gali būti sumodeliuoti, pasinaudojant gana lanksčia ir paprasta tinklo modeliavimo funkcija.

## 2.2 Elektromagnetinių vyksmų modeliavimas elektros tinkle

Elektros tinklo saugumas ir patikimumas reiškia gebėjimą nepertraukiamai tiekti elektros energiją vartotojams. Tarp elektros energijos persiuntimo patikimumo ir paslaugų kokybės parametrų, tokių kaip SAIDI, SAIFI, yra ir rodiklis MAIFI, kuris parodo trumpalaikių elektros energijos persiuntimo nutraukimo skaičių. Norint pasiekti reikiamą ekonominį efektyvumą yra svarbu palaikyti balansą tarp elektros tinklo saugumo užtikrinimo ir išlaidų patirtų palaikant elektros energijos persiuntimo patikimumą ir paslaugų kokybę apibrėžiančius parametrus.

Trumpalaikiai pasikartojantys gedimai elektros linijose yra dažna kartotinių elektros linijų įjungimo priežastis. Apsaugos ir automatikos įrenginiams reaguojant tik į matuojamų srovės ir įtampos parametrų pasikeitimus negalima išvengti kartotinių elektros linijų junginėjimų, o tai ne tik blogina MAIFI rodiklį, bet ir priverstinai didina eksploatacines išlaidas diegiant įvairias apsaugos nuo viršįtampių priemones.

Greitas avarinės situacijos atpažinimas ir įvertinimas leistų adekvačiai reaguoti į įvairius avarinius procesus elektros linijose. Remiantis srovės ir įtampos parametrų kitimo greitųjų pereinamųjų vyksmų registracijų analize, būtų galima atlikti savalaikį viršįtampių atpažinimą, įvertinant fazių įsijungimo nevienalaikiškumo bei kitų galimų viršįtampių priežastingumo reiškinį įtaką.

Greitųjų pereinamųjų vyksmų atpažinimas ir analizė turi būti grindžiama tokiais algebriniais metodais, kuriais remiantis būtų galima sukurti greitųjų pereinamųjų vyksmų atpažinimo modelius.

Trifazio tinklo režimų programos algoritmo prastinimui tikslinga liniją su asimetrija atvaizduoti ekvivalentine linija su pasikeitusiais banginiais parametrais. Stacionariųjų režimų modeliavimui racionalu linijas modeliuoti sutelktų parametrų  $\Pi$  tipo keturpolių ekvivalentinėmis schemomis. Schemoje apkrovų ekvivalentiniai laidžiai sumuojami su  $\Pi$  schemų skersiniais laidžiais. Režimų modeliavimui apkrovos priimamos kaip aktyviosios ir reaktyvios galios, todėl apkrovų laidžiai surandami iteracijomis iš mazgo įtampos ir apkrovos galios srautų pasiskirstymo skaičiavimų procese. [11]

Aukštesniųjų harmonikų modeliavimui linijų schemoms parengti reikia naudoti banginius parametrus. Tokie geriausiai nusako schemų priklausomybę nuo harmonikų dažnio. Linijos banginiai parametrai apsprendžia vyksmų charakterį atskiruose banginiuose kanaluose, o juos suformuoja laidų išsidėstymas linijoje [12] ir linijos savitieji linijos laidžiai bei impedansai.

Modalinė matricų algebra leidžia surasti linijų keturpolio koeficientų matricas banginiams kanalams, o iš jų ir ekvivalentines sutelktų parametrų  $\Pi$  schemas.

Linija su prijungtu kurioje nors linijos vietoje asimetrijos laidžiu, modeliuojamu pilnąja 3 eilės matrica, gali būti pakeista į trifazę ekvivalentinę  $\Pi$  schemą, nepažeidžiant įtampų bei srautų skaičiuojamojoje schemoje. Tokią galimybę suteikia algebroje tam tikra matricų specifika.

Bendrojo pobūdžio matricoms modalinių matricų radimo procesą galima pagreitinti, atliekant matricų dalinę diagonalizavimo procedūrą unitarinių matricų pagalba.

### 2.2.1 Savitųjų oro linijų parametrų skaičiavimo metodai

Elektros linijų savitieji parametrai priklauso nuo laidininkų tipų, laidų geometrijos atramose ir įlinkių tarp atramų, žemės po laidais savybių. Modeliuojant elektros liniją reikia įvertinti parametrų adekvatumą ir siekti trumpesnių skaičiavimų. Tai pasiekama naudojant skaitmeninius aproksimacinius metodus, o tikslumą galima patikrinti elektromagnetinio lauko Maxwello lygčių pagrindu sukurtomis technologijomis [13, 14].

Savitųjų parametrų įvertinimui 20-ajame amžiuje buvo rasta įvairių būdų [15]. Su minimaliomis prielaidomis ir fizikiniai geriausiai pagrįsti metodai Kostenko matematiniuose modeliuose, skirtuose daugialaidėms linijoms [16], kur savitųjų parametrų modeliavimui, palyginus analizės rezultatus su gautomis eksperimente registracijomis, priimtos prielaidos:

- linija sudaryta iš ilgų cilindrinė laidų, lygiagrečių žemės paviršiumi;
- linijos lauko sukurti krūviai žemėje randasi paviršiuje;
- žemės gruntas savitąją varžą yra vienalytis visame gylyje.

Kai linijos parametrai yra nežinomi, juos tikslinga surasti iš linijos savitųjų laidumų ir impedansų. Savitiesiems laidumams apskaičiuoti paprastai naudojamos idealios linijos be vidinio skersinio elektrinio lauko linijos laiduose bei žemėje, kadangi ši dedamoji žemės ir laidų vidiniuose laukuose yra menka lyginant su skersine dedamąja išorėje tarp laidų bei tarp laidų ir žemės. Linijos savitųjų laidžių matricą tokiai linijai aprašo išraiška:

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

čia  $\varepsilon$  - oro dielektrinė konstanta,  $F/m$ ;  $r_k$  ir  $h_k$  -  $k$  laido spindulys ir aukštis virš žemės;

$d_{ik}$  ir  $D_{ik}$  - atstumas tarp  $i$ -ojo bei  $k$ -ojo laidų ir atstumas tarp  $i$ -ojo laido ir  $k$ -ojo laido veidrodinio atspindžio žemės paviršiaus atžvilgiu pėdsako;

$Z_{ii}$  impedansui  $d_{ik} = r_i$  ir  $D_{ik} = 2h_i$ ;  $r_i$  ir  $h_i$  -  $i$ -tojo laido spindulys ir aukštis virš žemės;

$\alpha_{ik}$  - potencialinis koeficientas,  $m/F$ :

$$\begin{cases} \alpha_{ik} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}, \\ \alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{2h_k}{r_k}; \end{cases}$$



Savitieji linijos impedansai susideda iš vidinio laidų  $Z_v$ , žemės  $Z_g$  ir išorinio tarp laidų bei tarp laidų ir žemės impedanso  $Z_o$ :

$$Z_f = Z_v + Z_g + Z_o. \quad (2)$$

Cilindrinio laidininko vidinio impedanso išraišką pirmasis paskelbė Schelkunoff [17]:

$$Z_v = \frac{\sqrt{j\omega \cdot \mu \cdot \sigma}}{2\pi \cdot \sigma \cdot r} \cdot \frac{J_0(\sqrt{j\omega \cdot \mu \cdot \sigma \cdot r})}{J_1(\sqrt{j\omega \cdot \mu \cdot \sigma \cdot r})}; \quad (3)$$

čia  $\mu$  ir  $\sigma$  - magnetinė laido medžiagos konstanta ir specifinis laidumas;

$r$  - laido spindulys;

$J_0$  ir  $J_1$  - nulinės ir pirmos eilės pirmosios rūšies Besselio funkcijos.

Tikslesnė vidinio impedanso išraiška, įvertinant medžiagų rūšis, gaunama iš elektromagnetinio lauko Maxwello lygčių [18]:

$$Z_v = \frac{k}{2\pi \cdot \sigma \cdot r} \cdot \frac{J_0(k \cdot r)}{J_1(k \cdot r)}; \quad (4)$$

čia  $k$  - medžiagos banginis skaičius;  $k^2 = \omega^2 \mu \cdot \left( \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)$

$$k^2 = \omega^2 \mu \cdot \left( \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right).$$

Vidinio impedanso didesnei sprendimų spartai gauti yra tikslinga pasinaudoti Wedepohlo ir Wilcoxo [3] sukurta aproksimacine formule:

$$Z_v = \frac{k}{2\pi \cdot \sigma \cdot r} \cdot \frac{J_0(k \cdot r)}{J_1(k \cdot r)}; \quad (5)$$

čia  $r_k$ ,  $\sigma_k$  ir  $\mu_k$  -  $k$  laido spindulys, laido metalo specifinis laidumas ir magnetinė konstanta.

Formulė (3) aukštu tikslumu leidžia gauti impedanso reikšmes plačiame dažnių diapazone (iki 100 MHz ir daugiau).

Išorinio tarp laidų bei tarp laidų ir žemės impedanso  $Z_o$  išraiška gaunama iš idealios be nuostolių linijos sąlygų:

$$\mathbf{Z}_o = j\omega\mu\mathfrak{e}(\alpha_{ik}); \quad (6)$$

čia  $\mu$  - magnetinė oro konstanta.

Žemės  $\mathbf{Z}_g$  impedansui skaičiavimo technologiją su mažiausiomis prielaidomis ir analitiniais sprendiniais surado Kostenko, patikslindamas Carsono žemės impedansų formulę:

$$\begin{cases} Z_{gk} = \frac{j\omega\mu}{\pi} F_{kk} \in \mathbf{Z}_g, \\ Z_{gik} = \frac{j\omega\mu}{\pi} F_{ik} \in \mathbf{Z}_g; \end{cases} \quad (7)$$

čia  $F_{kk}$  ir  $F_{ik}$  - faktoriai, atitinkantys literatūroje žinomus Carsono integralų pavadinimais.

Gautoji  $F_{ik}$  faktoriaus išraiška [2] atrodo taip:

$$F_{ik} = \frac{\pi}{2\chi_1} [\mathbf{H}_1(\chi_1) - Y_1(\chi_1)] - \frac{1}{\chi_1^2} + \frac{\pi}{2\chi_2} [\mathbf{H}_1(\chi_2) - Y_1(\chi_2)] - \frac{1}{\chi_2^2}; \quad (8)$$

čia  $\mathbf{H}_1$  ir  $Y_1$  - pirmosios eilės Struvės ir pirmosios eilės bei antrosios rūšies Besselio funkcijos;

$$\chi_1 = r_d e^{j(\phi+\theta)}; \quad \chi_2 = r_d e^{j(\phi-\theta)};$$

$$r_d = D_{ik} \left| \sqrt{-k_g^2 + k_o^2} \right|; \quad \phi = \arg \sqrt{-k_g^2 + k_o^2}; \quad \operatorname{Re} \sqrt{-k_g^2 + k_o^2} > 0;$$

$$\theta = \operatorname{atg} \left( \frac{d_{ik}}{D_{ik}} \right);$$

$$F_{kk} \text{ faktoriui } D_{kk} = 2h_k;$$

$r_k$  ir  $h_k$  -  $k$ -ojo laido spindulys ir aukštis virš žemės;

$k_g$  ir  $k_o$  - aplinkos banginiai skaičiai gruntui ir orui:

$$\begin{cases} k_g = \omega \sqrt{\hat{\epsilon}_g \mu_g}, \\ \hat{\epsilon}_g = \epsilon_g - j \frac{1}{\omega \rho}; \end{cases}$$

$\epsilon_g$  ir  $\rho$  - dielektrinė grunto konstanta ir grunto lyginamoji varža;

$\mu_g$  - magnetinė žemės grunto konstanta;  $k_o = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$ .

## 2.2.2 Savitųjų parametru oro linijoms verčių suradimo modeliai

Elektromagnetinių vyksmų eigą labiausiai įtakoja kintantys specifiniai elektros linijos impedansai, kai kinta laiduose srovių momentiniai dažniai [19, 20]. Skaičiavimų pagreitinimui tikslinga tokių kaitos vyksmą prastinti. Tam reikia rasti linijos impedanso ekvivalentą. Sudarant algoritmus buvo panaudota tipinė idealios linijos be energijos nuostolių impedanso išraiška linijos laidui  $Z_s$  ir tarpusavio impedansui  $Z_m$  tarp  $i$  ir  $k$  laido:

$$Z_s = \frac{j\omega\mu_o}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_i}; \quad (9)$$

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_o}{2\pi} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}; \quad (10)$$

čia  $h_i$  ir  $r_i$  – laido aukštis ir skerspjūvio spindulys;

$d_{ik}$  ir  $D_{ik}$  – atstumas tarp  $i$  ir  $k$  laido, ir atstumas tarp  $i$  laido ir  $k$  laido veidrodinio atspindžio žemės paviršiaus atžvilgiu;

$\omega$  – pramoninis kampinis dažnis;  $\mu_o$  – oro magnetinė konstanta.

Literatūroje banginius parametrus tiksliausiai aprašo formulės [1-5]. Jos pakankamai gerai atspindi elektromagnetinius vyksmus oro linijose, tačiau greitųjų vyksmų atpažinimo modeliuose yra nepakankamai racionalios, nes reikalauja didelių aritmetikos veiksmų kiekio bei kompiuterinio laiko sąnaudų. Todėl buvo svarbu surasti aproksimacines formules, kurios leistų linijos impedansus apskaičiuoti supaprastintai, elementariomis funkcijomis, nepažeidžiant adekvatumo sąlygų ir tinkančias sparčiam greitųjų vyksmų modeliavimui.

Idealios linijos impedansai didėja proporcingai dažniui, o dėl nuostolių laiduose ir grunte [13] bei laidų atžvilgiu atsiradusių skersinių elektromagnetinių laukų, realios linijos impedansai auga lėčiau.

Darbe panaudotos laido nuosavojo ir tarpusavio tarp  $i$ -tojo ir  $k$ -tojo laido impedansų išraiškos realiai linijai:

- linijos laidos nuosavojo impedanso:

$$Z_s = \frac{j\omega\mu_o}{2\pi} \ln \frac{2h_i(1+l_i)}{r_i l_i}; \quad (11)$$

čia  $h_i$  ir  $r_i$  - laido aukštis ir skerspjūvio spindulys;

- tarpusavio impedanso tarp  $i$ -tojo ir  $k$ -tojo laido:

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_o}{2\pi} \ln \frac{D_{ik}(1+l_{ik})}{d_{ik}l_{ik}}; \quad (12)$$

(13) ir (14) išraiškomis randami aproksimacijų dvinariai  $i$  laidui ir  $Z_s$  impedansui:

$$l_i = j2h_i k_g (0,563 - 0,00405 \cdot \ln(\omega)); \quad (13)$$

$$l_{ik} = jD_{ik} k_g (0,563 - 0,00405 \cdot \ln(\omega)); \quad (14)$$

čia  $k_g$  – banginis skaičius žemės grunto ir oro aplinkoje:

$$k_g = \sqrt{\mu_o(\epsilon_g - j\sigma_g\omega)}; \quad (15)$$

$\epsilon_g$  ir  $\sigma_g$  – grunto dielektrinė konstanta ir savitasis laidumas.

Naudojant šias aproksimuojančias išraiškas oro linijų impedansus dažnyje nuo 50 Hz iki 10 MHz apskaičiuoja ne didesne nei 0,1 % paklaida.

### 2.2.3 Išmanaus sudėtingo skirstomojo tinklo modelio algoritmas

Išmaniajame skirstomajame tinkle vartotojams patikimą elektros tiekimą, atsijungus tinklui nuo perdavimo tinklų, palaiko vietinės elektrinės. Tokių elektros šaltinių impedansus apsprendžia transformatorių, paskirstymo įrenginių ir vidaus linijų bei generuojančios įrangos vidiniai impedansai. Todėl šie iteraciniame apkrovų impedansų nustatyme dalyvauja kaip pastovūs dydžiai. Visas skirstomojo tinklo stacionaraus režimo modelio algoritmas turi 6 pagrindinius etapus ir yra pavaizduotas blokinėje struktūroje 2.1 paveikslėlyje.

Sudėtingo skirstomojo tinklo modelio algoritmas kiek kitaip, daugiau naudojant algebros tiesiškumo superpozicijos principu, vienam iteraciniam ciklui gali būti sudarytas iš tokių etapų:

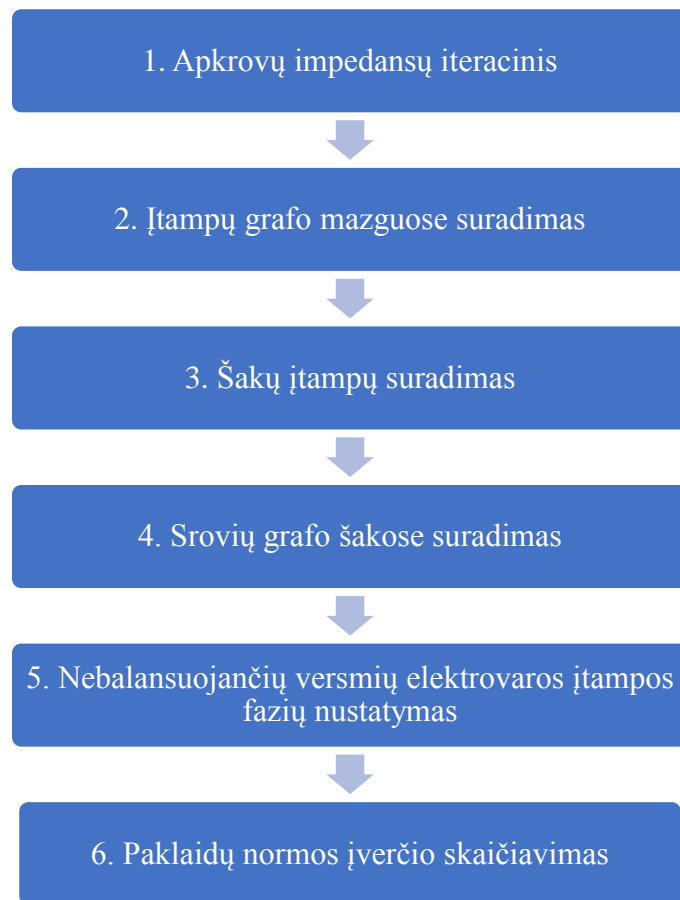
- suformuojami pagrindinis dalinis grafas (toliau vadinamas pagrindu) ir ekvivalentinių grandžių daliniai grafai;
- radialinių linijų apkrovos ir galios nuostoliai jungiančiose apkrovas linijose pridedami prie pagrindo mazgų galių.

Toliau taikomas įtampų nuo mazginių srovių superpozicijos principas:

- mazginių potencialų metodu randamos pagrindo mazgų įtampos nuo pagrindo mazginių srovių;
- į pasyvų pagrindą įjungiamos (atstatant į ankstesnį pavidalą) ekvivalentintos šakos ir nuo šakos kiekvieno mazgo mazginių srovių metodu surandami įtampų priedai pagrindo mazgų įtampoms ir mazgų įtampos ekvivalentintoje šakoje;

- kontūrinių srovių metodu iš ekvivalentintos šakos galų (pagrindo mazgų aibėje) įtampų surandami įtampų priedai ekvivalentintos šakos mazgų įtampoms;
- iš suminių pagrindo mazgų įtampų surandamos mazgų įtampos radialinėse linijose.

Toks algoritmas naudotinas, kai mazginių parametrų matricos yra per daug didelės skaitmeninio valdiklio atminties talpai. Kitu atveju lygčių sprendimui, taikant Gausso eliminavimo metodą, dažnai pasiekiamas trumpesnis modeliavimo laikas. Tai priklauso nuo to, kokio našumo valdiklyje naudojamos technologijos: mikroprocesoriaus, mikrovaldiklio ar FPGA loginė struktūra.



**2.1 pav.** Stacionaraus režimo skirstomajame tinkle modelio algoritmas

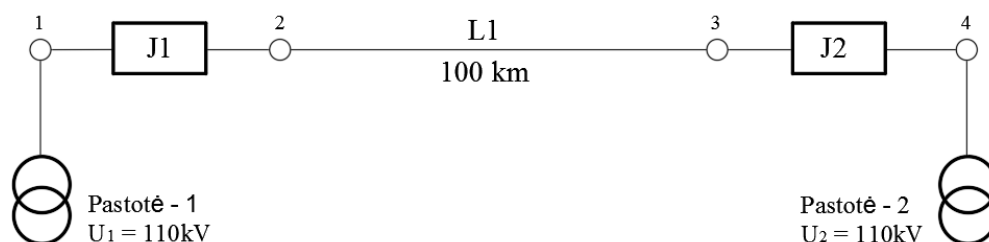
### 3. TIRIAMOJI DALIS

Metodinėje dalyje buvo apžvelgtos technologijos, modeliavimo metodikos, kurios bus pritaikytos tolimesnėje darbo eigoje. Šiame skyriuje bus pasinaudota *OMICRON* programinės įrangos paketu *RelaySimTest* bei *MathWorks - MATLAB*, kurių aplinkose pagal aukščiau pateiktas skaičiavimo metodikas ir apžvelgtas programinės įrangos galimybes bus modeliuojama darbai pasirinkta elektros tinklo dalies struktūra.

#### 3.1 Skaičiuojamoji tiriamos elektros energetikos sistemos dalies schema

Šiame magistro darbe buvo pasirinkta 3.1 paveiksle pavaizduota elektros energetinės sistemos dalies schema. Ją sudaro:

1. aukštos įtampos oro perdavimo linija – L1;
2. dvi aukštos įtampos, perdavimo tinklo, pastotės: Pastotė-1 ir Pastotė-2, maitinančios liniją L1 iš abiejų pusių;
3. du tos pačios įtampos jungtuvai: J1 ir J2, skirti tai pačiai aukštos įtampos oro linijai atjungti/prijungti iš abiejų galų;



3.1 pav. Modeliuojamojo tinklo struktūra

Sistemos pagrindiniai parametrai: įtampa – 110kV,

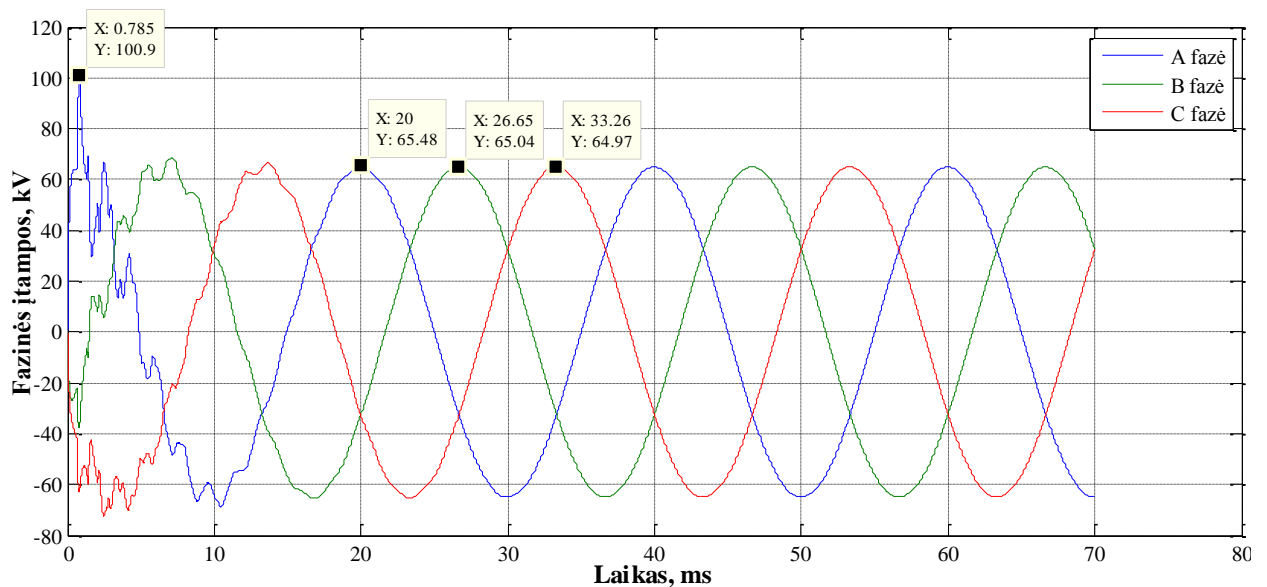
Norint modeliuoti įvairius avarinius režimus *RelaySimTest* aplinkoje, reikalinga susivesti pradinius sistemos, linijų ir pan. parametrus. Tačiau ranka suvedinėjami parametrai dažniausiai būna tik visos energetinės sistemos mažos dalies nominalieji parametrai, užduoti užsakovų ar atitinkamų asmenų, bei gali skirtis nuo realiųjų skaitinių verčių, gautų modeliuojant elektros tinklą ir įvertinant visą sistemą. Todėl prieš pradėdant modeliuoti avariją *RelaySimTest* grafinėje vartotojo aplinkoje, bus panaudotas algoritmas, kuris yra išpildytas *MATLAB* programos pakete ir sukurta programa elektros tinklo pradiniams parametrus suskaičiuoti.

#### 3.2 Modeliuojamo tinklo struktūra *MATLAB* aplinkoje

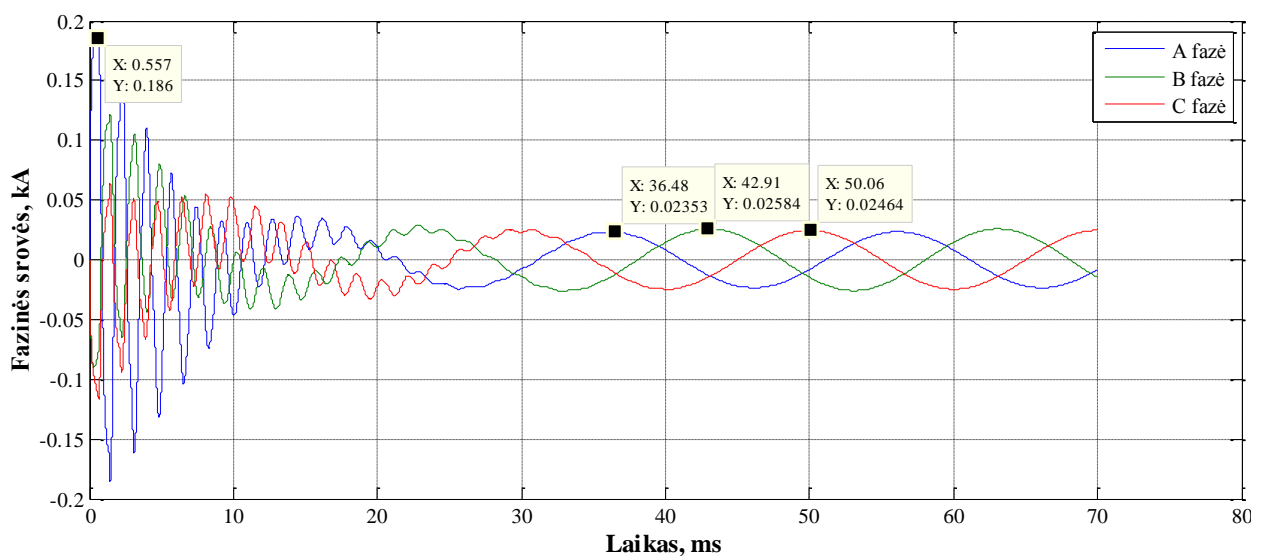
Pasinaudojus metodinėje dalyje aptartais elektromagnetinių vyksmų energetinėje sistemoje modeliavimo principais, buvo sukurta programa, gebanti skaičiuoti modeliuojamo tinklo ar jo

dalis pradinius parametrus, komutacijų metu vykstančius reiškinius ir pan. Programa tinklo režimą gali suskaičiuoti labai greitai, kadangi yra panaudotos aproksimacinės, skaitmeninės technologijos draugiškos, formulės ir metodika. Tyrimas, panaudojant šį algoritmą, atliktas su namų vartotojams skirta kompiuterine įranga, kuri, kaip žinia, neskirta atlikti serverinių kompiuterių funkcijoms, tačiau, šiuos procesus sugeba apdoroti gana greitai. Būtent šiam tyrimui būdingos elektros tinklo dalies pradinius parametrus apskaičiuoja per 0.3 sekundės.

Suvedus vidinės sistemos aktyviuosius bei reaktyviuosius varžumus, įvertinant oro linijos parametrus buvo gauti pradiniai, modeliujamojo tinklo sistemos, nusistovėjusio režimo, pagrindiniai parametrai – fazinės srovės bei įtampos (3.2 ir 3.3 pav.), kai perdavimo linija kol kas atjungta iš abiejų galų.



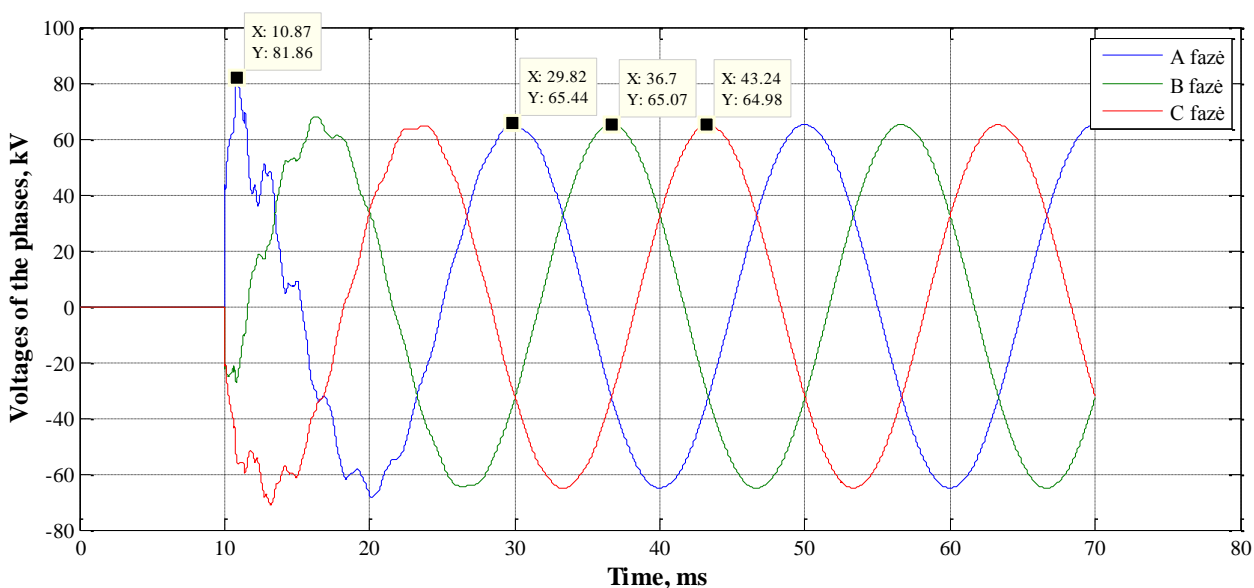
3.2 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros nusistovėjusio režimo fazinių įtampų vertės



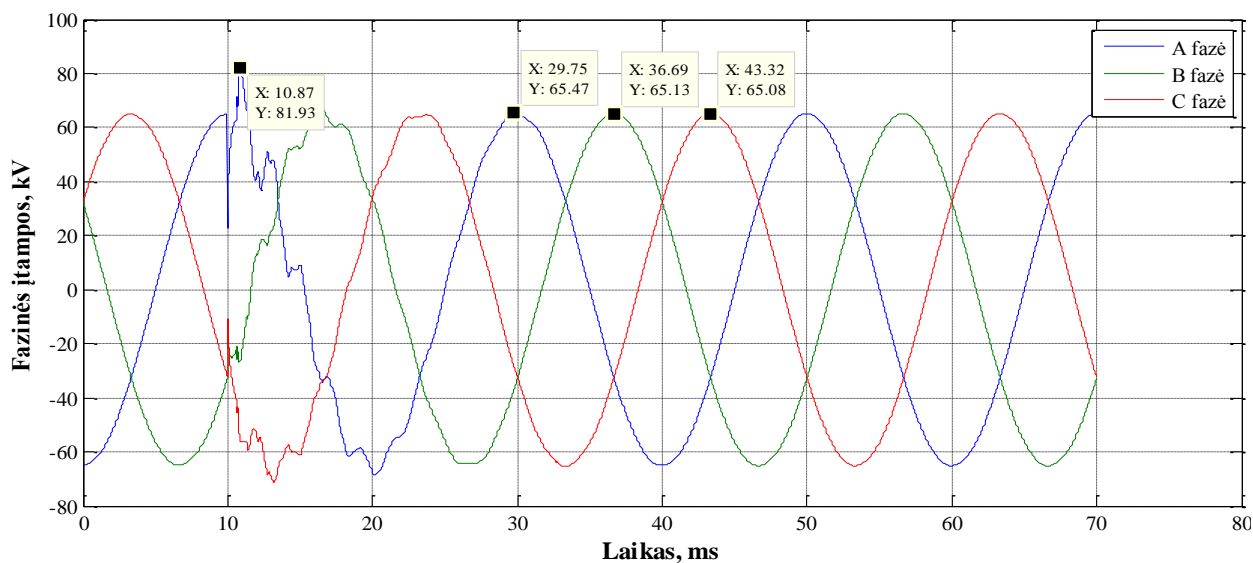
3.3 pav. Modeliuojamos elektros tinklo struktūros nusistovėjusio režimo fazinių srovių vertės

Iš pateiktų priklausomybių grafikų matomas aiškus komutacinis reiškiny, kurio metu sistema pradeda veikti. Pereinamasis procesas tęsiasi maždaug 20ms. Šio proceso metu matomi aiškūs srovių linijoje „Pastotė-1 – 1 mazgas“ bei įtampų 1-ame mazge pikai - 100kV ties 0,8ms. po kurių sistema nusistovi ir pereina į stacionarios būsenos sistemą, kurios parametrai nebekinta ir fazinė įtampa tame pačiame mazge siekia ~65kV. Akivaizdu, kad įtampa mazge nusistovi greičiau nei srovė šioje linijoje. 2-ame bei 3-iame mazguose įtampos lygios nuliui, kadangi linija nėra prijungta į tinklą, taip pat, kaip ir srovės linijoje L2.

Kitas tyrimo žingsnis – jungtuvų J1 ir J2 pagalba į sistemą yra prijungiama linija L1. Šio proceso metu daroma prielaida, jog 110kV jungtuvai veikia idealiai ir visas fazes įjungia be jokių, nors ir minimalių, laiko nuokrypių.



**3.4 pav.** Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių įtampų 2-ame mazge vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos

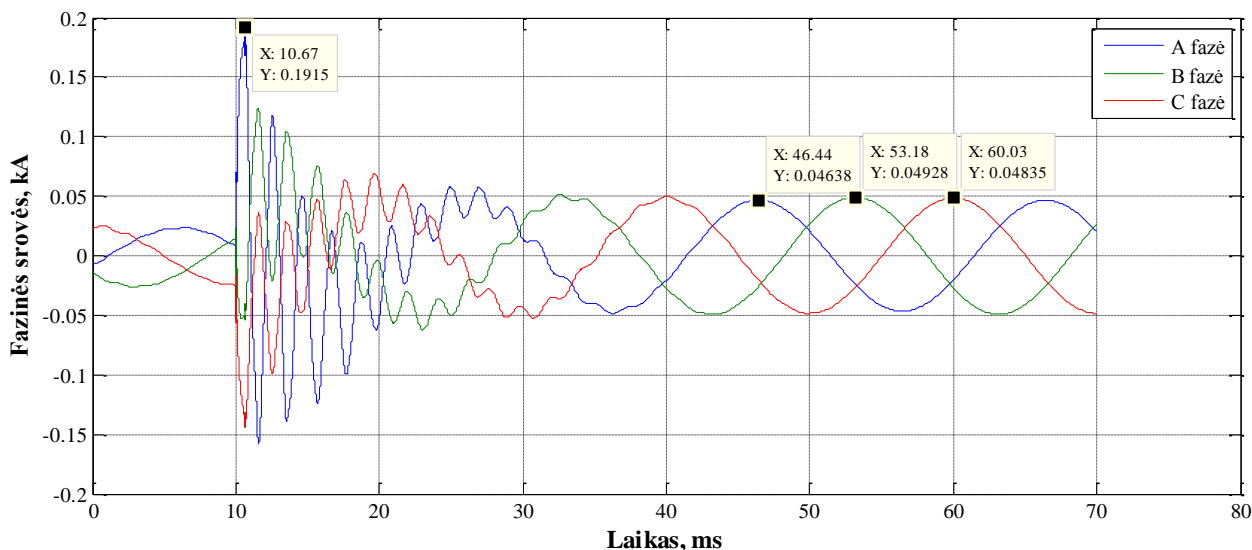


**3.5 pav.** Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių įtampų 1-ame mazge vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos

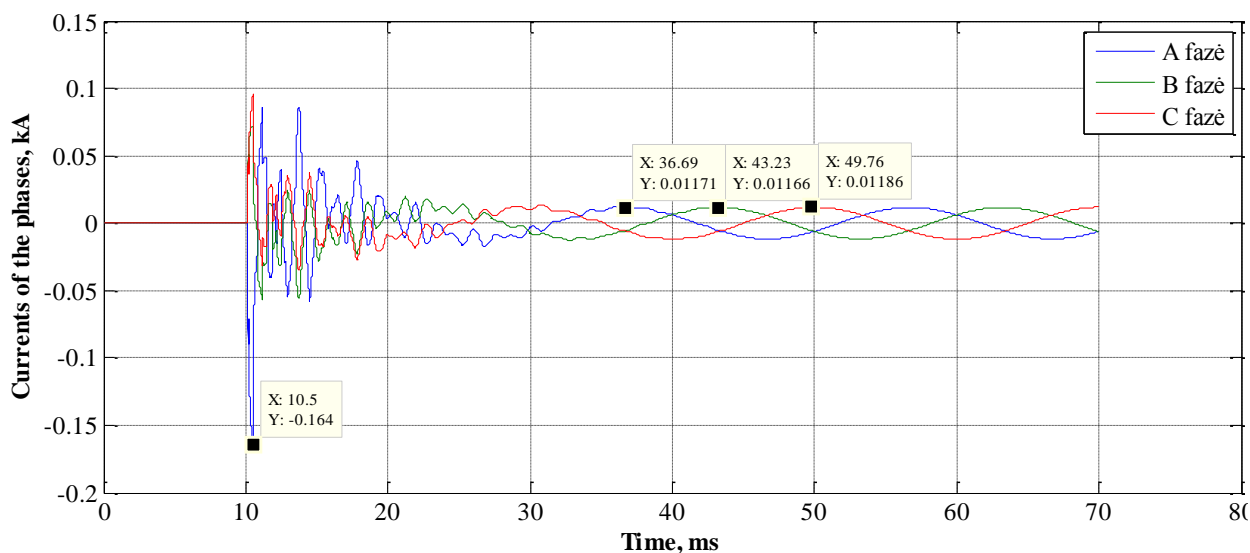


Prijungus liniją prie sistemos, aiškiai matomas dar vienas komutacinis reiškinys, kurio metu vėl matomas gana žymus įtampų susvyravimas. Komutacinis viršįtampis siekia ~82kV tiek 1-ame, tiek 2-ame mazge (3.4 ir 3.5 pav.). Taip pat, pereinamojo proceso metu, matomi ir ryškūs srovės linijose svyravimai (3.6 ir 3.7 pav.). Šių srovių pikai siekia:

- Linijoje „Pastotė-1 – 1 mazgas“ ~0,19kA;
- Linijoje L1 ~0,16kA.



**3.6 pav.** Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių srovių linijoje „Pastotė-1 – 1 mazgas“ srovės vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos



**3.7 pav.** Modeliuojamos elektros tinklo struktūros fazinių srovių linijoje L1 srovės vertės, po linijos L1 prijungimo prie sistemos

Žvelgiant į šiuos priklausomybių grafikus, matosi aiškūs pradinių tinklo parametrų (įtampų bei srovių) svyravimai. Kaip žinia, kiekvienas tinkle įvykęs momentas sukelia sistemos parametrų pakitimus, vieni iš jų didesnius, kiti mažesnius. Todėl kartais tinkle neįvykus jokiai avarijai atsitinka taip, jog netinkamai suveikia relinės apsaugos ir automatikos sistemos, kas įtakoja ir

paslaugų tiekimo kokybę vartotojui. Į šiuos parametrų svyramus relinė apsauga turi reaguoti adekvačiai, visi parametrai turi būti suorientuoti į atitinkamą, tuo metu esantį, režimą sistemoje. Tiriant tinklą kompleksiskai, bandymų įrangos pagalba, prijungtos prie sistemos įvairiomis naujausiomis ryšio technologijomis, užduoti RAA sistemoms parametrus, kad maksimaliai pajautrinti parametrus bei tuo pačiu išvengti klaidingų automatikos suveikimų ir/arba nesuveikimų tada, kada to reikia.

### 3.3 Modeliuojamo tinklo struktūros avarinis režimas *RelaySimTest* programinės įrangos aplinkoje

Atsižvelgiant į *MATLAB* aplinkoje sumodeliuotos tinklo struktūros pradinių parametrų reikšmes, galima atlikti sistemos avarijos bandymą *OMICRON RelaySimTest* programinės įrangos aplinkoje rezultatu palyginimui ir aptarimui.

Norint modeliuoti įvairius režimus, pradžia reikia nusibraižyti tinklo struktūrą, kuri bus tiriamą šioje dalyje (3.8 pav.). Tai atliekama šio programos paketo grafinės vartotojo sąsajos pagalba, kuri leidžia lengvai sudėti norimą tinklą, dėlioiant jį jau iš paruoštų blokų.



3.8 pav. *OMICRON RelaySimTest* programos aplinkoje sumodeliuota tinklo struktūra

3.8 paveiksle matomas jau sumodeliuotas tinklas. Struktūrą stengtasi pritaikyti kaip įmanoma arčiau darbe tiriamosios schemos, kad gauti kuo tikslesnius rezultatus. Čia matoma struktūra, kurią sudaro dvi šynų sistemos, kurios iš abiejų galiu jungia saugomą liniją prie bendros elektros energetikos sistemos. Šiuo atveju jungtuvai, esantys sistemos pusėje (priešais šynas) yra nejunginėjami, kadangi tiriamą avarija vyksta linijoje. Taip pat, linijos galuose yra prijungti srovės ir įtampos transformatoriai, kad būtų galima matuoti sistemos parametrus (srovę, įtampą, dažnį) toje linijoje bei šynose.

Kitas žingsnis - saugomos linijos bei ją maitinančios sistemos pagrindinių pradinių parametrų suvedimas (3.9 pav.).

Name:	Infeed 1
Nominal voltage L-L:	<input type="text" value="110,00 kV"/>
$\Delta V$ :	0,00 %
Actual voltage L-L:	110,00 kV
Nominal frequency:	50,00 Hz
$\Delta f$ :	0,00 %
Actual frequency:	50,00 Hz
Phase angle:	0,00 °

a)

### General

Name:	Protected line
Nominal frequency:	50,00 Hz
Default grounding:	Solidly grounded ▼
Nominal voltage L-L (prim.):	110,00 kV
Nominal current (prim.):	600,00 A

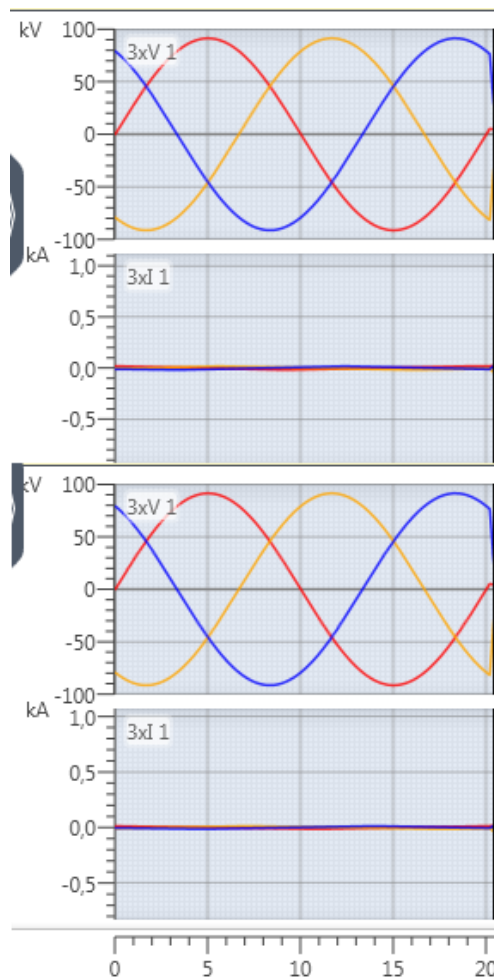
### Line

Line length:	100,00 km
Line impedances:	R', X', RN/R, XN/X ▼
R':	193,00 mΩ/km
X':	400,00 mΩ/km
RN/R:	0,6000
XN/X:	0,6000

b)

### 3.9 pav. Modeliuojamos tinklo struktūros pradiniai sistemos (a) ir saugomos linijos (b) parametrai

Atsižvelgiant į visą sistemą, kuri buvo sumodeliuota *RelaySimTest* aplinkoje, buvo gautas nusistovėjęs stacionarus modeliuojamos struktūros režimas, kurio parametru vertės vaizduojamos 3.10 paveiksle. Matoma, kad sistemos nusistovėjusi fazinė įtampa siekia ~64,7kV, bei fazinė srovė - ~13A. Šis režimas tęsiasi 20ms ir tada sistema pereina į avarinį režimą – trifazį trumpąjį jungimą linijoje, kuris vyksta linijos viduryje, t.y. ties 50km (pav 3.11).



Š-1

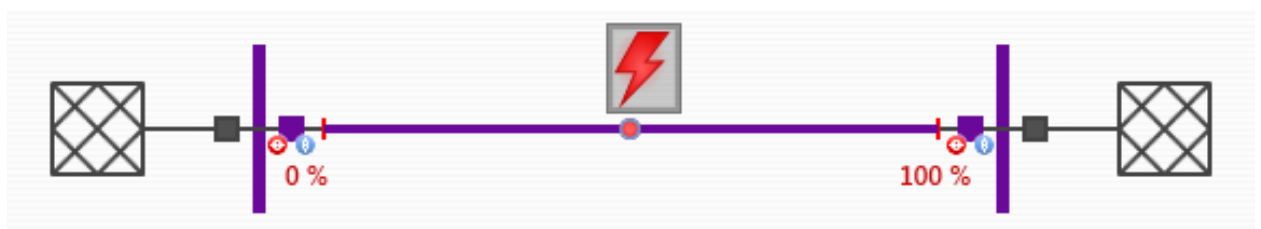
V L1-N prim.:	64,606 kV	∠	-0,36 °
V L2-N prim.:	64,606 kV	∠	-120,36 °
V L3-N prim.:	64,606 kV	∠	119,64 °
I L1 prim.:	13,171 A	∠	95,25 °
I L2 prim.:	13,171 A	∠	-24,75 °
I L3 prim.:	13,171 A	∠	-144,75 °

Š-2

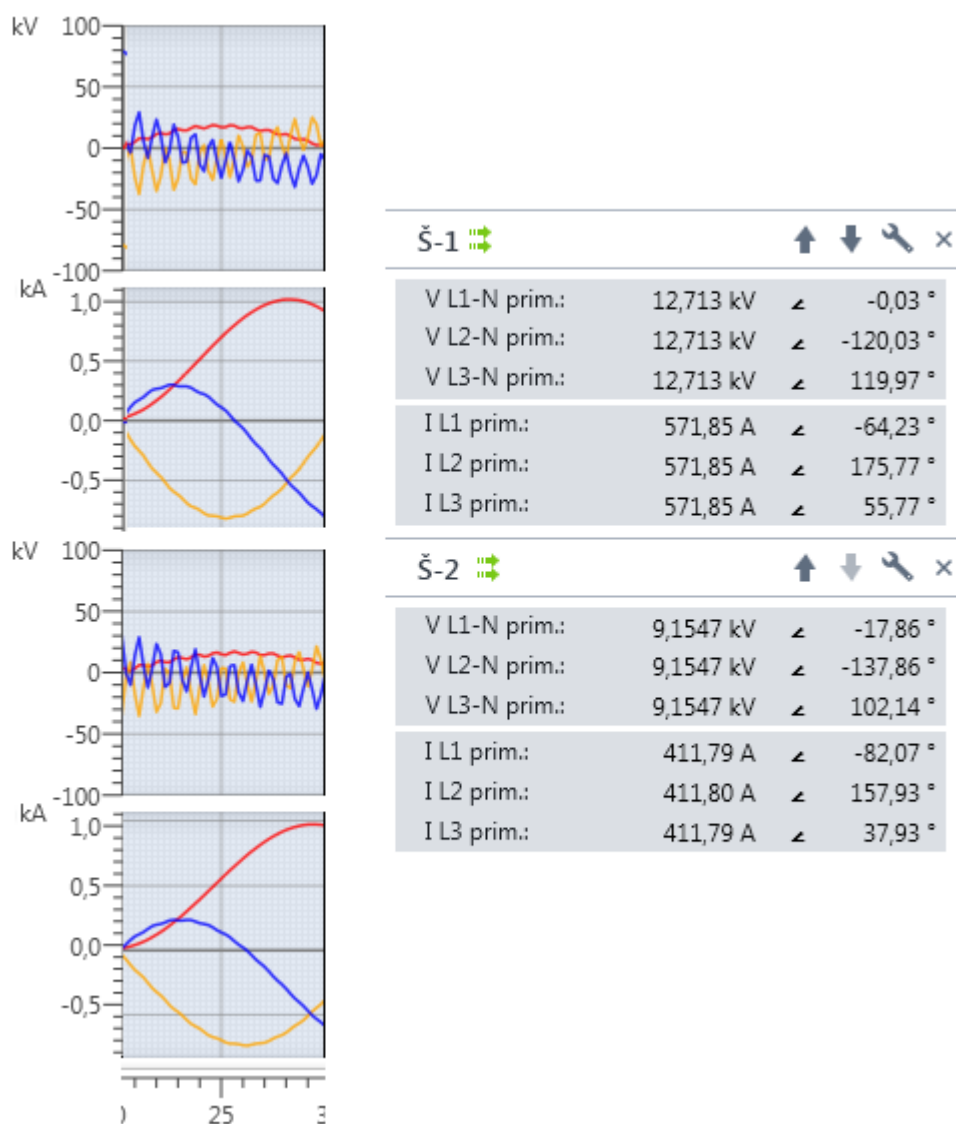
V L1-N prim.:	64,714 kV	∠	-0,34 °
V L2-N prim.:	64,714 kV	∠	-120,34 °
V L3-N prim.:	64,714 kV	∠	119,66 °
I L1 prim.:	9,4850 A	∠	77,41 °
I L2 prim.:	9,4850 A	∠	-42,59 °
I L3 prim.:	9,4850 A	∠	-162,59 °

**3.10 pav.** Modeliuojamos tinklo struktūros nusistovėjusio stacionaraus režimo parametrų vertės

Po 20ms įvykęs trumpasis jungimas vaizduojamas 3.12 paveiksle. Šioje iliustracijos aiškiai matomas grubus sistemų parametrų kitimas, kaip ir priklauso vykstant trumpajam jungimui. Sistemų fazinės įtampos kritiškai krinta iki 12kV, o fazinės srovės tuo metu išauga iki ~570A.



**3.11 pav.** Trifazio trumpojo jungimo vieta modeliuojamoje tinklo struktūroje



**3.12 pav.** Trumpas jungimas ir jo parametru vertės

Linijoje trifazio trumpojo jungimo fazinės srovės išauga iki ~572A (3.13 pav.).

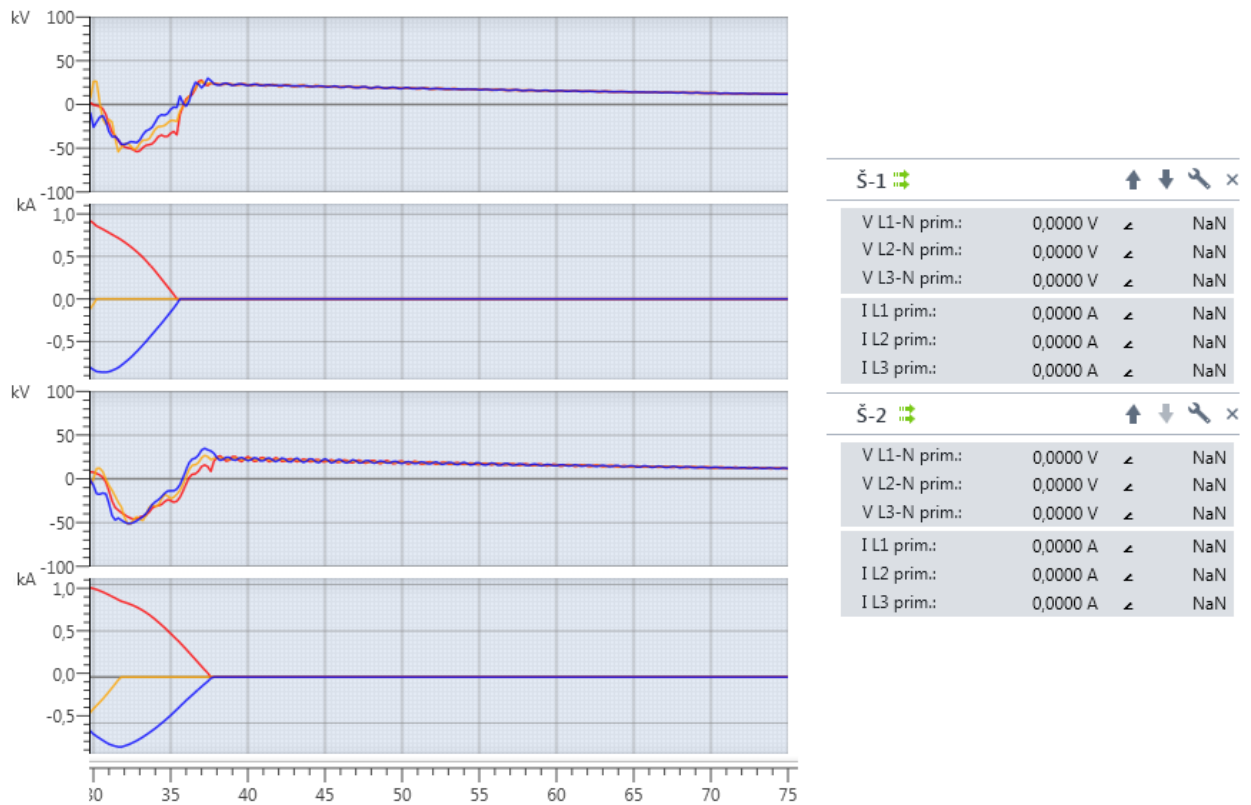
Protected line	
☰ Pastotė - 1	
I L2:	<b>571,85 A</b>
☰ Pastotė - 2	
I L2:	<b>411,79 A</b>

**3.13 pav.** Trifazio trumpojo jungimo srovių vertės saugomoje linijoje.

Kaip įprasta, įvykus trumpajam jungimui linijoje, suveikė relinė apsauga ir automatika ir pastarąją atjungė iš abiejų galų (3.14 pav.), kad sistemoje parametrai kuo greičiau atsistatytų į normalias, būtent tai sistemai būdingas, vertes, bei išvengiant didesnių nuotolsių ir avarijos padarinių, kurie gali būti labai rimti.

3.14 paveiksle matomas linijos nusikrovimas jau po įvykusio greitojo pereinamojo vyksmo. Apkrova buvo atjungta, tačiau linijoje dar yra likutinė srovės ir po ~17ms ši srovės vertė kirto iki 0A, o dėl oro linijos įsikrovimo, likutinė įtampa nulinę vertę pasiekia po kurio laiko, t.y. po maždaug 90ms.

Minėtame paveiksle, šynų įtampos matomos nulinės todėl, kad srovės ir įtampos transformatoriai sistemos parametru vertes matuoja į linijos pusę.



**3.14 pav.** Avarinio režimo atjungimas, įtampų ir srovių verčių nusikrovimas

## IŠVADOS

1. Išnagrinėti elektros energetikos sistemos modeliavimo principai bei metodika, kuri toliau buvo pritaikyta kuriant tiriamosios sistemos algoritmą.
2. *MATLAB* programinio paketo aplinkoje buvo sukurtas sistemos modeliavimo algoritmas, gebantis, pagal užduotus pradinius oro ir kabelinių linijų bei sistemos parametrus, skaičiuoti pradinius nusistovėjusios elektros sistemos režimo pagrindinius parametrus (fazines sroves, įtampas), įvertinant įvairius komutacinius reiškinius, kurie itin svarbūs elektros energetinės sistemos stabilumui ir patikimumui.
3. Atlikta modelio analizė parodė, kad metodika yra tinkama didelių, išvystytų elektros sistemų infrastruktūrų greitam skaičiavimui, įvertinant tam tikrų linijų atkarpų atjungimus, prijungimus ir trumpuosius jungimus, kurie sukelia pagrindinių tinklo parametrų verčių pokyčius.
4. Išnagrinėjus programinės įrangos paketą *RelaySimTest*, pastebėta, kad programos aplinkoje gali būti modeliuojama tik tinklo dalis ar keletas linijų tarp pastočių, bet ne visas elektros tinklas.
5. *MATLAB* aplinkoje sukurtą sistemos modeliavimo algoritmą pritaikius *RelaySimTest* programiniam paketui atsirastų didesnės galimybės relinės apsaugos ir automatikos įrangos derinimui bei profilaktikai, taip pat, pritaikius naujausias ryšio ir duomenų perdavimo technologijas, būtų galima daryti kompleksinius bandymus ne tik tinklo dalyje, bet ir tam tikroje išvystytoje didelėje energetinėje sistemoje.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. NARGĖLAS, A. *Relinė Apsauga Ir Automatika: Mokymo Priemonė*. Kaunas: KTU, 2010.
2. SVINKŪNAS, G. ir A. NAVICKAS. *Elektros Energetikos Pagrindai: Mokomoji Knyga*. 2-a patais. ir papild. laida. ed. Kaunas: Technologija, 2013 ISBN 9786090210017.
3. PAITHANKAR, G.Y. ir S.R. BHIDE. *Fundamentals of Power System Protection*. PHI Learning, 2010 ISBN 9788120341234.
4. *What is the Smart Grid?* U.S. Department of Energy. Available from: [https://www.smartgrid.gov/the\\_smart\\_grid/smart\\_grid.html](https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html).
5. EKANAYAKE, J.B., ir kt. *Smart Grid: Technology and Applications*. Wiley, 2012 ISBN 9781119969099.
6. *Technology Roadmap: Smart Grids*. Paris, France: International Energy Agency, 2011 [www.iea.org](http://www.iea.org).
7. BLACKBURN, J.L. ir T.J. DOMIN. *Protective Relaying: Principles and Applications*. 3rd ed. ed. Boca Raton Fla.]: CRC Press, 2007 ISBN 9781574447163.
8. KEZUNOVIC, M., ir kt. Design, Implementation and Validation of a Real-Time Digital Simulator for Protection Relay Testing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol. 11, no. 1. pp. 158-164 ISSN 0885-8977.
9. OMAR FARUQUE, M.D., ir kt. Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2015, vol. 2, no. 2. pp. 63-73.
10. Prieiga per internetą: [https://www.controlglobal.com/assets/knowledge\\_centers/abb/assets/IEC61850\\_Overview\\_and\\_Benefits\\_Paper\\_General.pdf](https://www.controlglobal.com/assets/knowledge_centers/abb/assets/IEC61850_Overview_and_Benefits_Paper_General.pdf).
11. GUDŽIUS S., L. A. MARKEVIČIUS, A. MORKVĖNAS and A. ROŽANSKIENĖ. Stationary regime model of asymmetrical line. In Proc. Electromagnetic disturbances EMD'2012, 22<sup>nd</sup> International Conference, September, 2012, p. 30-34 ISSN 1822-3249.
12. Hayashi S., Surges on Transmission Systems. - *Denki-Shoin*: Tokyo, 1955. International Conference, September, 2012, p. 30-34 ISSN 1822-3249.
13. КОСТЕНКО, М. В., et al. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. Москва: Энергия, 1973.
14. MAXWELL, J. C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Oxford University Press, New York, 1998, vol. 2.
15. AMETANI, A. A. A highly efficient method for calculating transmission line transients. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Sept. 1976, vol. 95(5), pp. 1545-1551. ISSN(P) 0018-9510.



16. КОСТЕНКО, М. В. Распространение электромагнитных волн вдоль многопроводной линии. «*Электричество*», 1960, No 2.
17. SCHELKUNOFF, S. A. The electromagnetic theory of coaxial transmission line and cylindrical shields. *Bell System Technical Journal*. October 1934, vol.13, pp. 532–579.
18. КОСТЕНКО, М. В., and Л. С. ПЕРЕЛЬМАН. К расчету волновых процессов в многопроводных линиях. *Известия АН СССР. « Энергетика и транспорт»*, 1963, No 6.
19. MARTINEZ-VELASCO J. A. *Power system transients: parameter determination*. CRC Press, p. 644, 2009 ISBN 9781420065299.
20. DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*. Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.