



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Tomas Žukauskas**

**Distancinės apsaugos, naudojančios IEC 61850-9-2 protokolą,  
patikimumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas:**

Doc. dr. Vytautas Šiožinys

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**Distancinės apsaugos, naudojančios IEC 61850-9-2 protokolą,  
patikimumo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

**Vadovas:**

Doc. dr. Vytautas Šiožinys

**Recenzentas:**

Doc. dr. Almantas Bandza

**Projektą atliko:**

Tomas Žukauskas EEME 4

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Tomas Žukauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Distancinės apsaugos, naudojančios IEC 61850-9-2 protokolą, patikimumo tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tomo Žukausko** baigiamasis projektas tema „Distancinės apsaugos, naudojančios IEC 61850-9-2 protokolą, patikimumo 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)

Tomas Žukauskas. Distancinės apsaugos, naudojančios IEC – 61850 - 9 - 2 protokolą, patikimumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vytautas Šiožinys; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 59 psl.

## **SANTRAUKA**

Šiame magistriniame darbe tiriamas distancinės apsaugos, naudojančios IEC 61850 - 9 - 2 protokolą, patikimumo tyrimas. Literatūros analizėje analizuojamas išmatuotų verčių protokolas, jo veikimo principas, struktūra. Analizuojamos elektros pastotės ryšio tinklų topologijos, taipogi tinklo topologijų patikimumas. Apžvelgiamas distancinės apsaugos veikimas.

Tyrimo dalyje, tiriamos trukmės tarp išmatuotų verčių paketų, esant žiedinei ir dubliuotai topologijai, naudojant realią įrangą. Antrojoje tyrimo dalyje tiriami pastotės tinklo topologijų patikimumai. Sistemų patikimumai tiriami nuosekliai, žiediniai ir dubliuoti topologijai. Trečiojoje tyrimo dalyje pritaikomas išmatuotų verčių protokolas, distancinei apsaugai. Sukuriamas distancinės apsaugos modelis „Simulink“ aplinkoje. Sukurtas modelis testuojamas su išmatuotų verčių protokolu, kad matytųsi kaip elgiasi distancinė apsauga, kai yra netenkama vieno ar daugiau išmatuotų verčių paketų.

*Reikšminiai žodžiai: IEC 61850 - 9 - 2, išmatuotos vertės, distancinė apsauga, pastotės tinklo topologija, pastotės tinklų patikimumas.*

Tomas Žukauskas. Reliability Analysis of IEC 61850-9-2 Protocol Based Distance Protection. Final project of master's degree / supervisor doc. dr. Vytautas Šiožinys; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2016. 59 pp.

## SUMMARY

This final Master's degree project is focused on the reliability analysis of IEC 61850-9-2 protocol based distance protection. In the theoretical part, the Sampled Values protocol, its operation principle and structure were examined. Topologies of the electric substation network as well as topologies of the reliability of network were also analysed. In addition, the operation of distance protection was overviewed.

In the practical part, the duration among Sampled Values packets were analysed, with ring and redundancy topologies present, and by using practical equipment. In the second part of the analysis, the reliability of the substation network topologies was examined. The reliability of systems was analysed by employing cascading, ring and redundancy topologies. In the third part of the analysis, the Sampled Values protocol was applied to the distance protection. A distance protection model was created in the "Simulink" environment. In order to reveal how the distance protection operated when one or more Sampled Values packets were lost, the designed model had been tested with the Sampled Values protocol.

*Keywords: IEC 61850 - 9 - 2, sampled values, distance protection, substation network topology, substation topology reliability.*

# Turinys

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS .....	9
ĮVADAS .....	10
1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ .....	12
1.1. IEC 61850 protokolas .....	12
1.2. IEC 61850 veikimo struktūra.....	13
1.3. IEC 61850 protokolo pastočių automatika .....	14
1.4. IEC 61850-9-2 (išmatuotų verčių) protokolas .....	15
1.5. „Ethernet“ tinklų ryšių topologijos .....	17
1.5.1. Nuosekloji topologija .....	17
1.5.2. Žiedinė topologija.....	18
1.5.3. Žvaigždinė – žiedinė topologija .....	18
1.5.4. Dubliuota - žiedinė topologija .....	19
1.5.5. HSR ir PRP topologijos.....	20
1.6. IEC 61850-9-2 protokolo patikimumo skaičiavimas.....	21
1.6.1. Patikimumo skaičiavimas, taikant Markovo grandines.....	23
1.7. Skaitmeninė distancinė apsauga .....	27
1.7.1. Distancinės relės kompleksinės varžos skaičiavimas.....	29
Literatūros analizės išvados .....	32
2. TYRIMAS.....	33
2.1. Matuotų verčių paketų, siuntimo trukmių tyrimas.....	33
2.2. Patikimumo skaičiavimas .....	38
2.2.1. Nuoseklios topologijos patikimumo skaičiavimas .....	38
2.2.2. Žiedinės topologijos patikimumo skaičiavimas .....	41
2.2.3. Dubliuotos topologijos patikimumo skaičiavimas .....	43
2.3. Distancinės apsaugos naudojančios išmatuotas vertes modeliavimas.....	45
IŠVADOS.....	55
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	57
PRIEDAI .....	60
Priedas 1. Nuoseklios topologijos patikimumo skaičiavimo algoritmas. ....	60
Priedas 2. Žiedinės topologijos patikimumo skaičiavimo algoritmas. ....	61
Priedas 3. Dubliuotos topologijos patikimumo skaičiavimo algoritmas. ....	62

Priedas 4. Dubliuotos topologijos intensyvumų matrica. ....	64
Priedas 5. Distancinės apsaugos pilnutinės varžos skaičiavimas. ....	65
Priedas 5. SV žinutės struktūra. ....	67

## Iliustracijų sąrašas

1.1 pav. Pagrindinė trijų lygmenų ryšių struktūra .....	13
1.2 pav. Ryšių sluoksniai .....	15
1.3 pav. IEC 61850-9-2 procesų sluoksnio schema.....	16
1.4 pav. Nuosekioji topologija .....	17
1.5 pav. Žiedinė topologija .....	18
1.6 pav. Žvaigždinė – žiedinė topologija.....	19
1.7 pav. Dubliuota žiedinė topologija.....	19
1.8 pav. PRP jungimo topologija.....	20
1.9 pav. HSR jungimo topologija .....	21
1.10 pav. Nuoseklusis jungimas .....	22
1.11 pav. Lygiagretusis jungimas .....	23
1.12 pav. Markovo modelis atkuriamai nuosekliai sistemai .....	24
1.13 pav. Markovo modelis atkuriamai lygiagrečiai sistemai .....	26
1.14 pav. Distancinės apsaugos bendroji schema.....	28
1.15 pav. Distancinių relių charakteristikų tipai.....	28
1.16 pav. Daugiakampė distancinės relės charakteristika .....	29
2.1 pav. „Ethernet“ komutatorius “Cisco Catalyst 3560G“ .....	33
2.2 pav. Žiedinės ir dubliuotos topologijos jungimai .....	33
2.3 pav. Simuliuojami įtampos ir srovės signalai .....	34
2.4 pav. Gauti rezultatai tarp matuotų verčių paketų.....	34
2.5 pav. Žiedinės topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikai .....	36
2.6 pav. Žiedinės topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikų didžiausios dispersijos.....	36
2.7 pav. Dubliuotos topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikai .....	37
2.8 pav. Dubliuotos topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikų didžiausios dispersijos.....	37
2.9 pav. Nuoseklios topologijos struktūrinė ir Markovo schemas .....	39
2.10 pav. Žvaigždinės topologijos struktūrinė ir Markovo schemas.....	41
2.11 pav. Dubliuotos topologijos struktūrinė ir Markovo schemas .....	43
2.12 pav. Distancinės apsaugos modelis .....	45
2.13 pav. Įtampos ir srovės grafikai esant dvifaziam trumpajam jungimui .....	47
2.14 pav. Aktyvios ir reaktyvios varžos išskaičiavimo blokas.....	47
2.15 pav. Aktyvios ir reaktyvios varžų skaičiavimo algoritmo modelis .....	48
2.16 pav. Įtampos A ir B fazių signalai prieš filtrą ir po filtro .....	49
2.17 pav. Srovės A ir B fazių signalai prieš filtrą ir po filtro .....	49
2.18 pav. Aktyvios ir reaktyvios varžos grafikai.....	50

2.19 pav. Pilnosios varžos sklidimo trajektorija.....	51
2.20 pav. Pilnutinės varžos sklidimo trajektorija į pirmąją zoną.....	51
2.21 pav. Signalo praradimo blokas .....	52
2.22 pav. Įtampos dingimas A fazėje .....	52
2.23 pav. Pilnutinės varžos grafikas esant dvifaziam trumpajam jungimui ir dingus įtampos matavimui 2 ms .....	53



## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

IED – (angl. *Intelligent Electronic Device*) išmanusis elektroninis įrenginys.

IEC – (angl. *International Electrotechnical Commission*) tarptautinė elektrotechnikos komisija.

SCL – (angl. *Substation configuration language*) pastotės konfigūravimo kalba.

GOOSE – (angl. *Generic Object Oriented Substation Events*) bendras objektiškai orientuotas pastočių įvykis.

SV – (angl. *Sampled value*) matuota vertė.

MU – (angl. *Merging Unit*) matavimo įrenginys.

MTTF – (angl. *Mean time to failure*) darbo iki gedimo vidutinė trukmė.

MTBF – (angl. *Mean time between failure*) vidutinis laikas tarp sustojimų, dėl gedimo.

DVS – dispečerinė valdymo sistema.

OSI – (angl. *Open Systems Interconnection Reference Model*) atvirųjų sistemų jungčių modelis.

LAN – (angl. *Local area network*) – vietinis tinklas.

RSTP – (angl. *Rapid Spanning Tree Protocol*) – spartusis tinklo protokolas.

## IVADAS

Energetinei įrangai, ypač apgyventuose vietose, keliamas didžiausias iššūkis aprūpinti vartotojus patikima energija, konkurencingomis kainomis. Įrenginių gedimai, žaibavimai, avarijos ir natūralios katastrofos, visos šios priežastys sudaro energijos sutrikimus ir avarijas, dažniausiai ilgą laiką nutraukia elektros energijos tiekimą. Elektrinės sistemos automatizavimas sukuria patikimą ir save atstatančią elektrinę sistemą, kuri greitai reaguoja į realaus laiko įvykius, kad išlaikytų nenutrūkstamą elektros energijos tiekimą. Energetinė įranga reikalauja aukšto lygio duomenų ryšių tinklo, kuris palaikytų tiek esamas funkcijas, tiek ateities perspektyvas.

Energetikoje siekiant pagerinti elektros energijos tiekimo kokybę pradėtos naudoti informacinės technologijos. Dispečerinėse stotyse, informacinio tinklo dėka, realiu laiku gaunama informacija iš arba į matavimo prietaisus, apsaugos įtaisus ar kitus įrenginius, esančius už keliasdešimties ar kelių šimtų kilometrų pastotėse ir elektrinėse. Siunčiama informacija yra koduojama pagal tam tikrą susitarimą, tas susitarimas vadinamas - protokolu.

Visi ryšiai turi būti pritaikyti vientusiai IED integracijai, kuri leistų skirtingų gamintojų prietaisų bendrą sujungimą. Tam, kad tokia įranga galėtų laisvai keistis informacija, reikalingas IED gamintojų ir vartotojų susitarimas. Dėl to, Tarptautinė elektrotechnikos komisija (IEC) sukūrė IEC 61850 standartą.

IEC 61850 – tai elektrinių pastočių komunikacijos ryšių protokolas. Šis protokolas užtikrina valdymo, apsaugos, matavimo įrenginių bendrą integraciją elektros pastotėse. Protokolas suteikia spartaus greičio apsaugą, blokuotes ar atjungimą. „Ethernet“ linija leidžia didelį našumą ir saugumą, kuris yra reikalingas šio standarto reikalavimų išpildymui dabartinėms elektros pastotėms.

Šiame magistriniame darbe bus tiriamos trukmės tarp išmatuotų verčių paketų, esant skirtingoms ryšių tinklų topologijoms, kad nustatyti kokiais laiko intervalais yra siunčiami duomenų paketai. Skaičiuojami ryšių tinklų topologijų patikimumai, kad išsiaiškinti su kuria tinklo topologija sistema yra patikimiausia. Taip pat pritaikomas išmatuotų verčių protokolas, distancinei apsaugai. Distancinės apsaugos modelis testuojamas su išmatuotų verčių protokolu, norint sužinoti, kaip elgiasi distancinė apsauga, kai yra netenkama vieno ar daugiau išmatuotų verčių paketų.

Darbo tikslas – distancinės apsaugos, veikiančios su IEC 61850-9-2 išmatuotomis vertėmis, patikimumo tyrimas.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti išmatuotų verčių protokolo veikimą bei struktūrą.
2. Apžvelgti elektros pastotės , ryšių tinklo jungimo topologijas.
3. Išsiaiškinti tinklo topologijų patikimumo skaičiavimo algoritmus.
4. Išanalizuoti distancinės apsaugos veikimo principą.
5. Eksperimentiniu tyrimu ištirti, išmatuotų verčių paketų, siuntimo trukmes.
6. Apskaičiuoti vietinio tinklo topologijų patikimumus, naudojančius IEC 61850-9-2 protokolą.
7. „Simulink“ aplinkoje ištirti, išmatuotų verčių duomenų paketų netekimo poveikį distancinėms apsaugoms.

# 1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ

## 1.1. IEC 61850 protokolas

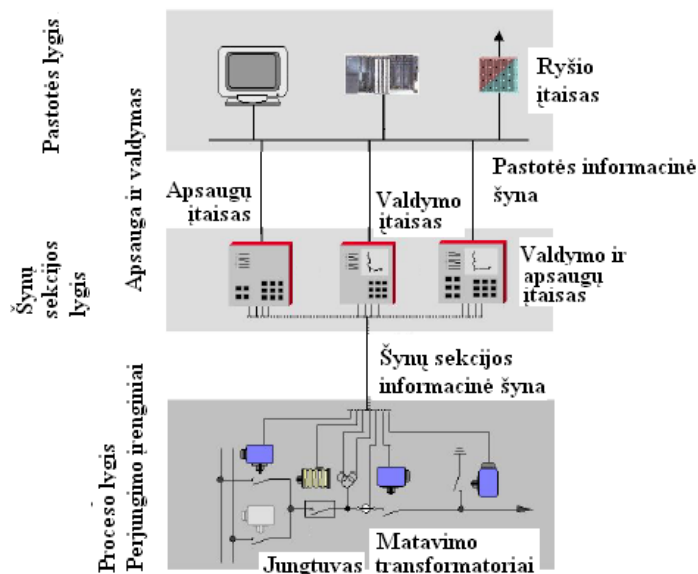
Technikos komitetas (TC) – 57 išleido IEC 61850 standartą pavadinimu „Pastočių ryšių tinklai ir sistemos“ 2003 metais. Šis standartas apima ne vien tik bendravimą tarp pastotės įrenginių, bet ir nurodo ryšių parametrus. IEC 61850 galimybės aiškiai viršijo tokius bendravimo standartus, kaip IEC 60870 – 5 – 103, DNP 3.0, MODBUS ir daug kitų protokolų, kurie buvo pasiūlyti. IEC 61850 protokolas, ryšių protokolui suteikia specialų duomenų formatą ir konfigūravimo kalbą. Taipogi, šis standartas apibrėžiamas OSI – 7 sluoksniu, kuris paremtas „Ethernet“ ryšių sistemos veikimu. „Ethernet“ užtikrina aukštą ryšių architektūros lankstumą, taip pat gali įtraukti naujas, sparčiai vystančias, ryšių technologijas. Dabartinės „Ethernet“ technologijos aukštas greitis, vietiniame tinkle (angl. LAN – *local area network*) tapo tinkamu ryšiu pastočių automatizavimui. Elektrinėje pastotėje tarp valdymo ir procesų lygmens pasiūlytas IEC 61850 - 8 ir 9 protokolo dalies „Ethernet“ ryšys.

Nauji atradimai ryšių ir tinklo technologijose, pasiūlė daug naujų galimybių pagerinti elektros sistemos operacijas ir procesų automatizavimą. Vienas iš pagrindinių iššūkių, pastotės sistemos automatizavime yra IED įrenginių, skirtingų gamintojų sąveika. Ši užduotis buvo išspręsta sukūrus IEC 61850 protokolą, kuris tapo universaliu standartu, pastočių automatizavimo sistemoms. IEC 61850 protokolas apibrėžia šiuos punktus:

1. Skirtingų gamintojų įrenginių sąveika.
2. Vienodos struktūros duomenų perdavimas.
3. Bendra konfigūravimo kalba.
4. Parametrų suvienodinimas skirtingiems įrenginiams.
5. Įrenginių savidiagnostika.[3]

## 1.2. IEC 61850 veikimo struktūra

Pagrindiniai IEC 61850 struktūros lygiai yra pavaizduoti 1.1 pav.



1.1 pav. Pagrindinė trijų lygmenų ryšių struktūra

Pirmasis stoties lygmuo (angl. *station level*) dažniausiai yra pastotės ribose. Iš esmės, tai dispečerinė valdymo sistema (DVS). Joje įrengta pagrindinė nuotolinė valdymo sistema (angl. HMI – *Human Machine Interface*). Valdymo centras yra izoliuotas nuo kenksmingų ar pavojingų veiksmų, pavyzdžiui elektromagnetinių bangų, kurias skleidžia skirstyklos įrenginiai. Visa svarbiausia techninė įranga koncentruojama stoties lygmenyje. Visa šita įranga turi būti tinkamai eksploatuojama. Pavyzdžiui: vėdinama arba maitinama nuo nepertraukiamos kintamosios srovės šaltinių (angl. UPS – *uninterruptible power supply*). Visa kita pastotės įranga veikia nuo 110 ar 220V nuolatinės srovės šaltinių. Taigi visos pastotės funkcijos kaip trikdžių registratorius ar istorijos duomenų bazė yra stoties lygmenyje.

Antrasis lygmuo (angl. *Bay level*) yra apsaugos terminalų, valdymo kontrolių relių ir kitų IED (angl. *intelligent electronic device*) valdymo pulto (VP) pastatas. VP fiziškai yra arti skirstyklos įrenginių. Joje statomos relinės spintos (t.y. apsaugų terminalai, valdikliai), telematavimo signalų perdavimo įrenginys - TSPĮ ir pan. Iš VP pulto įrenginių galima sąlyginai valdyti visus skirstyklos aparatus, peržiūrėti įrenginių būsenos informaciją ir atlikti panašias funkcijas.

Trečiąjį – procesų lygmenį (angl. *Process bus*) sudaro dažniausiai aukštos ar vidutinės įtampos aparatai. Šiame lygmenyje vyksta pagrindiniai procesai: indukuojamos įrenginių pozicijos, nustatoma įrenginių būsenos informacija, matuojamos srovės, įtampos. Procesų lygmuo per informacijos perdavimo sąsają privalo būti sujungta su VP lygmeniu. Įprastai tą sąsają sudarydavo begalė varinių laidų, tarpiniai gnybtynai ir t.t., kurie analoginiais signalais perduodavo informaciją į valdymo pultą. Tačiau tobulėjant technologijoms, buvo sukurti nauji reikalavimai pagal kuriuos išvystytas IEC 61850 standartas. Šis standartas leidžia pakeisti tradicinius varinius kabelius į „Ethernet“ jungtis apjungiant juos LAN (angl. *Local area network*) tinkle, kurios sujungtos per komutatorius ir kitus įrenginius su VP ir DVS .[4]

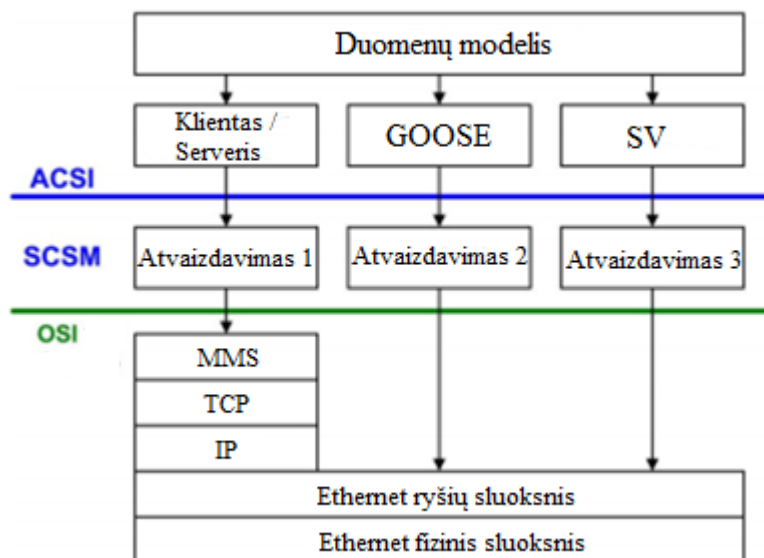
### 1.3. IEC 61850 protokolo pastočių automatika

Vienas IEC 61850 standarto punktų nurodo, kad visi IED įrenginiai turi būti laisvai suderinami, t.y. laisvai keistis informacijos duomenų srautais ir ją tinkamai operuoti, nepriklausomai nuo gamintojo tipo. Kitas šio standarto reikalavimas, kad IED įrenginiai būtų laisvai konfigūruojami. Vadinasi, visi įrenginiai turi palaikyti bendrą XML pagrindu paremtą pastotės konfigūravimo kalbą SCL (angl. *SCL - substation configuration language*), kurie sujungiami į vieną sistemą. [13]

IEC 61850 standartas nusako, kad įranga turi palaikyti „ilgalaikiškumo“ sąvoką, t.y. prisitaikyti ir tinkamai operuoti keičiantis technologijoms. Vadinasi, šiame standarte pritaikytas naujas įrenginių bendravimo ryšys 1 pav. MMS/TCP/IP/Ethernet su optiniu fiziniu sluoksniu. Pastebėtina, kad nukreipimas į visus sluoksnius vyksta tik klientas - serveris (angl. *Client.Server*) sąsajoje. Kritinio laiko ryšiuose t.y. matuotosios vertės ar GOOSE, blokuotės, indikaciniai signalai, išjungimo įjungimo žinutės yra nukreipiamos tiesiai į „Ethernet“ ryšio sluoksnį.

IEC 61850-9-2 standartas apibūdinamas kaip matuotų verčių protokolai, kuris turi būti suprojektuotas ir nukreiptas į „Ethernet“ tinklą. Išskiriami trys pagrindiniai ryšių perdavimo tipai (1.2 pav). Antras ir trečias yra kritinio laiko tipai, kurie naudojami apsaugų ir valdymo grandinėse. SV ir GOOSE yra nukreipiami tiesiai į duomenų perdavimo kanalo lygmenį, taip sumažindami protokolų kiekį ir pagreitindami veikimą. Išpildymui, MU veikia kaip analoginis-skaitmeninis konverteris, kuris sugeneruoja skaitmeninius SV paketus ir išsiunčia juos į apsaugos terminalus ir valdiklius. Šie IED įrenginiai priima informaciją, ją išanalizuoja nustatydami jos turinį, kokia informacija buvo pernešta.

Jeigu išėjimas siunčia teigiamą signalą, apsaugos terminalas išduoda komandą į atitinkamą aparatą t.y. įjungti ar išjungti.[5]



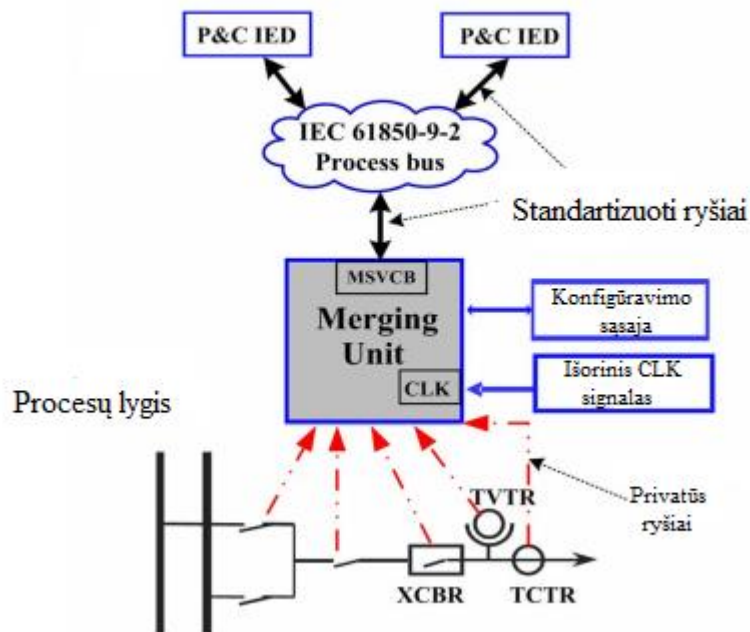
1.2 pav. Ryšių sluoksniai

#### 1.4. IEC 61850-9-2 (išmatuotų verčių) protokolas

Tam, kad sumažinti varinių laidų kiekį ir montavimo darbų kainą tarp aukštos įtampos skirstyklos ir valdymo centro, buvo pasiūlyta naudoti IEC 61850-9-2 protokolą. Tai „Ethernet“ sąsaja paremtas ryšių tinklas. Šį tinklą naudoja tarp procesų lygio skirstyklos įrenginių ir antrojo lygio apsaugos ir valdymo IED įrenginių. Tam, kad matavimus būtų galima perduoti „Ethernet“ tinklu, matavimų signalai yra paverčiami į skaitmeninius. Tokiu būdu galima daugelį skaitmeninių signalų perduoti per vieną „Ethernet“ liniją.

Norint įgyvendinti matuotų verčių įdiegimą į pastotės sistemą, neužtenka tik žinoti programavimo logiką. Standarto integravimą į pastotės sistemą turi papildyti keli IED įrenginiai. Vienas svarbiausių įrenginių yra matavimo įrenginys (angl. MU – *Merging Unit*). Šis įrenginys surenka informaciją, pvz., fazių įtampos ar srovės iš matavimo transformatorių 1.3 pav. (angl. TCTR – srovės transformatorius, TVTR – įtampos transformatorius) ar aparatų būsenos informaciją (angl. XCBR) – jungtuvo padėtys ir pan.

### Valdymo ir apsaugų lygis



1.3 pav. IEC 61850-9-2 procesų sluoksnio schema

Matavimo įrenginys turi turėti galimybę priimti išorinį sinchronizavimo signalą (angl. CLK – *clock*), kad būtų galima suderinti laiko žymę tarp MU ir kitų IED įtaisų. Pagal IEC 60044-8 standarto specifikaciją, sinchronizavimo signalas įėjime turi būti 1 PPS (angl. PPS – *Pulse per second*). Pagal kitus standartus gali būti optinis arba šviesolaidis. PPS pulso kitimo laikas gali turėti įtakos vidiniam MU laiko sinchronizavimui. Tačiau jis gali būti nepaisomas, jei veikimo laikas ne didesnis nei  $\pm 10\%$ . Taip išorinis GPS įrenginys, suteikia laiko žymę kiekvienai siunčiamai paketo žinutei. Toks matuotų verčių paketas yra perduodamas LAN tinklu į pastotės IED įrenginius.

Pagal IEC 61850-9-2 standartą, didžiausias leistinas ryšio vėlinimas kritinio laiko (*time-critical*) momentu žinutėms yra 3 ir 4 ms. Šis punktas turi būti įvykdomas visoms kritinio laiko žinutėms, nepriklausomai nuo tinklo apkrovos procesų lygmenyje. SV žinutės struktūra patalpinta prieduose. TCP/IP (angl. *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) informacijos perdavimo sluoksnis sukelia papildomą laiko vėlinimą, todėl GOOSE ir matuotos vertės vietoj TCP/IP, savo žinutes tiesiogiai nukreipia į „Ethernet“ ryšio sluoksnį. Tačiau TCP/IP sluoksnio eliminavimas sumažina ryšio paketų patikimumą. Norint išlaikyti patikimumą matuotų verčių metodu, žinutė yra laiko suveikdinama ir perduodama tam tikru dažnio momentu. Matuotų verčių žinutė nėra kartojama, kaip



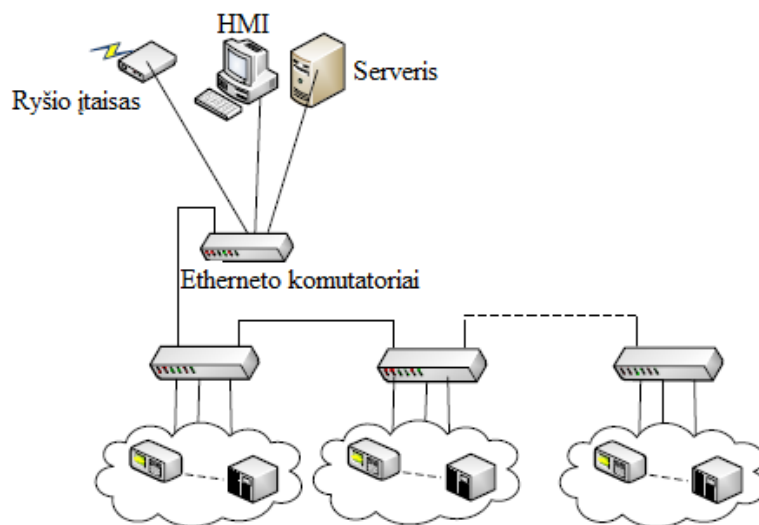
tai daro GOOSE sistema, o duomenys siunčiami pastoviai. Taip pat šio protokolo patikimumas priklauso ir nuo „Ethernet“ tinklo jungimo topologijų. [6]

## 1.5. „Ethernet“ tinklų ryšių topologijos

Esant daug tinklo įrenginių ar norint padidinti „Ethernet“ tinklo patikimumą, „Ethernet“ tinklo komutatoriai jungiami į topologijas. „Ethernet“ komutatorių topologijos yra: nuoseklios, žiedinės, žvaigždinės ir dubliuotos. Praktinės SAS topologijos gali būti sudarytos iš šių tipų topologijų, jas jungiant mišriai.

### 1.5.1. Nuoseklioji topologija

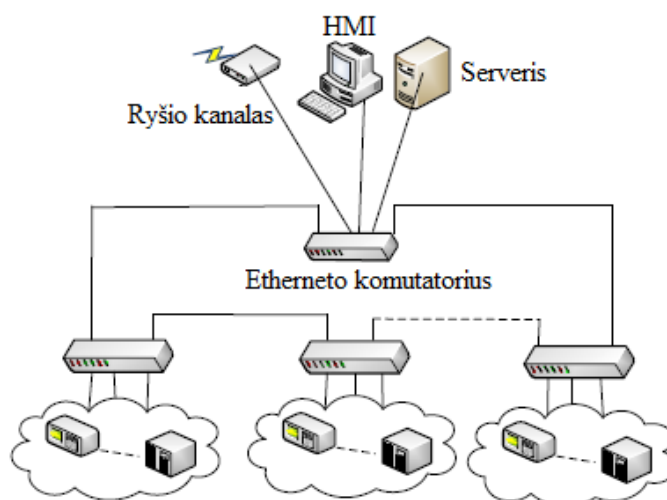
Įprasta nuosekliosios topologijos schema pavaizduota 1.4 pav. Visi „Ethernet“ tinklo komutatoriai yra sujungti nuosekliai be jokio uždaro ciklo. Ši topologija yra paprasta ir pigi. Vis dėlto, šios topologijos laiko vėlinimas palyginti yra didžiausias.



1.4 pav. Nuoseklioji topologija

## 1.5.2. Žiedinė topologija

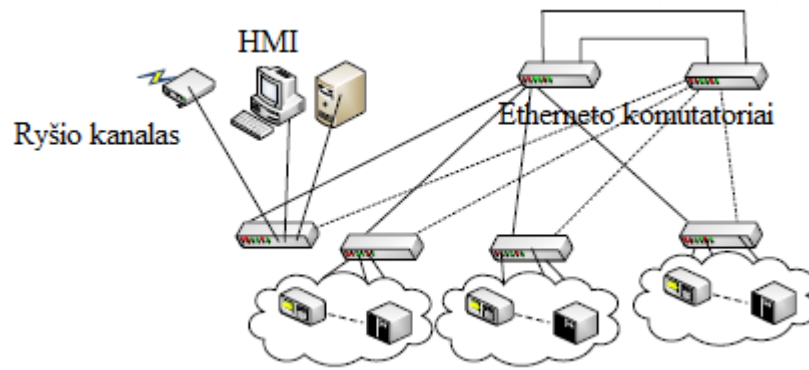
Kaip pavaizduota 1.5 pav., žiedinė topologija yra panaši į nuosekliają topologiją, tačiau jungimo grandinė yra uždara tarp pirmo ir paskutinio tinklo komutatorių. „Ethernet“ paprastieji komutatoriai nepalaiko uždarų ciklų jungimų. Dėl to reikalaujama naudoti valdomus komutatorius (t.y. komutatoriai su valdymo procesoriumi) su sparčiuoju protokolu (RSTP – *Rapid speed tree protocol*) (IEEE 802.1w). Šis protokolas komutatoriams leidžia aptikti ciklus ir iš vidaus blokuoti žinutes, tam, kad jos nebūtų siunčiamos kilpomis ir įvykus ryšių tinklo gedimui, leistų konfigūruoti tinklą greičiau nei per sekundę. Ši topologija yra patikimesnė, nes IED prietaisai gali toliau komunikuoti, net jei kuris nors „Ethernet“ tinklo komutatorius sugenda. Tačiau ši topologija yra brangesnė bei sudėtingesnė ir ji nepagerina laiko vėlinimo.



1.5 pav. Žiedinė topologija

## 1.5.3. Žvaigždinė – žiedinė topologija

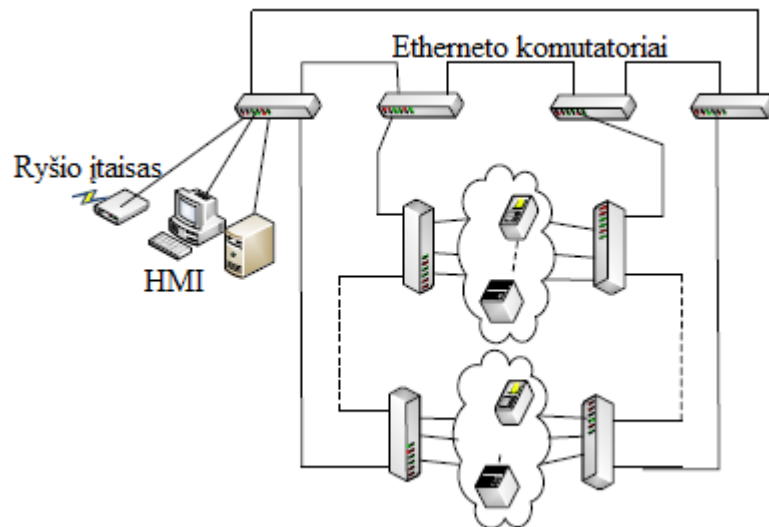
Žvaigždinėje – žiedinėje topologijoje, kuri pavaizduota 1.6 pav., kaip ir žiedinėje topologijoje naudojami „Ethernet“ komutatoriai su vidiniu programuojamu procesoriumi. Visi antrajame lygyje esantys „Ethernet“ komutatoriai yra tiesiogiai sujungti su dviem dubliavimo „Ethernet“ komutatoriais. Abu šie pagrindiniai komutatoriai sujungti žiedu. Šis sudubliavimas leidžia mažesnę laiko vėlinimą. Vis dėlto šiai topologijai reikalingi du papildomi komutatoriai, kad sudarytų žvaigždinę – žiedinę konfigūraciją.



1.6 pav. Žvaigždinė – žiedinė topologija

#### 1.5.4. Dubliuota - žiedinė topologija

Dubliuota topologija pavaizduota 1.7 pav., kurią sudaro dar du žiedai, kurie dar kartą sujungti į žiedą su keturiais „Ethernet“ tinklo komutatoriais. Tokia topologija suteikia visiškai dubliuotą žiedinį tinklą su vidutiniu laiko vėlinimu. Vis dėlto šiai topologijai reikia nemažai valdomų „Ethernet“ komutatorių, kurie palaikytų spartųjį protokolą (RSTP) (IEEE 802.1w). Taip pat visi IED įrenginiai turi turėti „Ethernet“ jungtis, kas dar labiau padidintų jų kainą. Tai gi toks tinklas yra patikimiausias, tačiau itin brangus ir sudėtingas.[7]

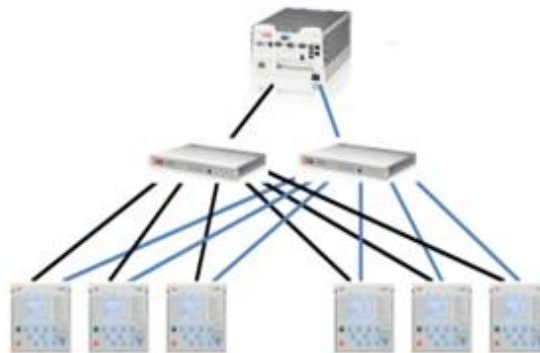


1.7 pav. Dubliuota žiedinė topologija

### 1.5.5. HSR ir PRP topologijos

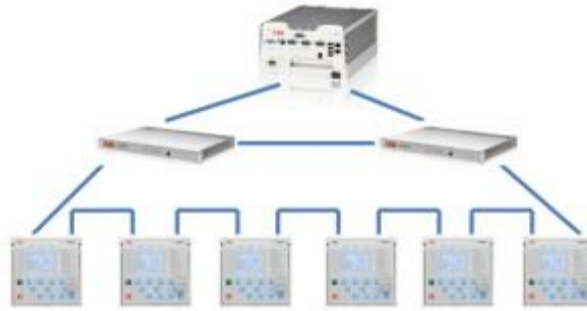
IEC 61850 protokolas nurodo tinklo dubliavimo struktūra, kuri pagerina pastotės komunikacijos patikimumą. Tai paremta dviem, vienas kitą papildančiais protokolais, apibrėžtais IEC 62439 – 3 standartu: lygiagrečiai dubliuotas protokolas (PRP) ir didelio patikimumo nepertraukiamo dubliavimo protokolas (HSR). Toks IED įrenginių dubliavimas remiasi perduodama informacija, kuri dubliuojama per du „Ethernet“ prievadus, kurie yra sujungti į tą patį loginį tinklo ryšį. Taigi, abiem atvejais, įvykus tinklo klaidai ar trikdžiui, sistema vienu ar kitu keliu perduos informaciją, išpildydama realaus laiko reikalavimą.

PRP modelis pavaizduotas 1.8 pav. Kiekvienas IED mazgas prijungtas prie atskirų dvejų „Ethernet“ tinklo komutatorių. Tinklo komutatoriai ir IED dirba lygiagrečiai. Kadangi abu tinklai sujungti lygiagrečiai, vienas kito atžvilgiu, bet koks ryšio nutraukimas vienoje iš linijų neturės įtakos tolimesniam veikimui.



1.8 pav. PRP jungimo topologija

HSR jungimo topologija pavaizduota 1.9 pav. Visi IED įrenginiai yra sujungti į žiedo topologiją. Pirmutinis ir paskutinis IED įrenginys yra jungiamas prie „Ethernet“ tinklo komutatorių. Kiekvienu ciklu IED išsiunčia po dvi žinutes į abi žiedo puses. Sistema nuskaityto pirmąją gautą žinutę, o kitą anuliuoja. Tačiau toks jungimas pasižymi laiko vėlinimu. Kuo daugiau sistemoje žiedu sujungtų IED prietaisų, tuo gaunamas didesnis informacijos laiko vėlinimas. Pvz: jei topologijoje yra sujungta 20 IED prietaisų, laiko vėlinimas išauga 2 ms. [8]



1.9 pav. HSR jungimo topologija

## 1.6. IEC 61850-9-2 protokolo patikimumo skaičiavimas

Patikimumas yra tikimybė, kad objektas funkcionuos (veiks) be gedimo tam tikrą laiką. Tipiniai patikimumo dydžiai, bendrai sistemai:

1. Darbo iki gedimo vidutinė trukmė (MTTF);
2. Vidutinis laikas tarp sustojimų, dėl remonto (MTBF);
3. Procentinis tinkamumas;
4. Vidutinės prastovos;
5. Gedimai įvykstantys per tam tikrą operacijų skaičių.

Sistemos patikimumas gali būti skaičiuojamas naudojant integralą, kurio plotas yra po tikimybės tankio funkcijos kreivė. Darant prielaidą, kad pagrindinis gedimo (neveikimo) pasiskirstymas yra eksponentinis, tada veikimo lygtis yra:

$$R(t) = e^{-\lambda t}; \quad (1);$$

čia,

$\lambda$  – gedimų intensyvumas (1/MTBF);

t – laikas;

R(t) – veikimo (negedimo) tikimybė;

MTBF - vidutinis laikas tarp sustojimų, dėl remonto. (dėl gedimų).[1]

Sistemos tinkamumas gali būti apskaičiuojamas, remiantis komponentų sujungimu nuosekliai arba lygiagrečiai. Skaičiavimai priklauso nuo komponentų jungimų, ar jie sujungti nuosekliai ar lygiagrečiai. Nagrinėjamos šios dvi sąlygos:

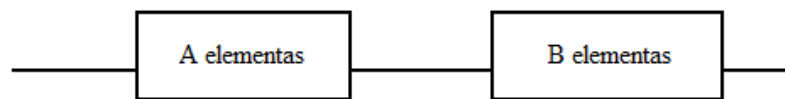
1. Jeigu vienos dalies gedimas, paskatina kitų dalių gedimą arba operacijos neveikimą, tada tos dalys yra sujungtos nuosekliai (1.10 pav.).
2. Jei sugedus daliai, jos funkcija bus perduodama per kitą komponentą, tai šie komponentai sujungti lygiagrečiai (1.11 pav.).

Pilnai funkcionuojant tinkamumas gali siekti 100%, tai reiškia, kad neveikimas lygus 0%. Pavyzdžiui, komponento veikimo tikimybė yra 80%, tai jo neveikimo tikimybė 20%. Veikimo tikimybė gali būti apskaičiuojama naudojant vidutinio laiko tarp sustojimų ir vidutinio remontavimo laiko parametrus.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}; \quad (2)$$

Veikimo tikimybei apskaičiuoti naudojama (2) formulė. Komponentai X ir Y yra sujungti nuosekliai, o tai reiškia jog vienos dalies gedimas lemia ir kitos dalies neveikimą. Taigi bendras patikimumas gali būti skaičiuojamas:

$$A = A_A \cdot A_B; \quad (3)$$

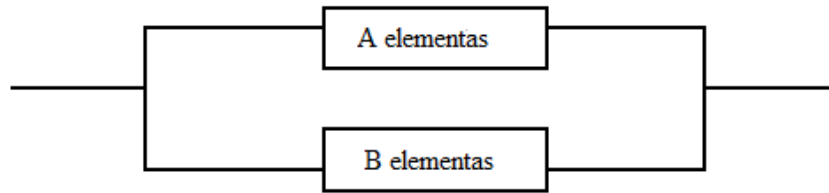


1.10 pav. Nuoseklusis jungimas

Pavyzdžiui, esant nuosekliajam jungimui, kurio komponentas A=99%, o B=99,99%, tai bendras patikimumas yra 98,99%. Tai laukiamosios prastovos A elementui yra 3,65 dienos per metus, o B elementui 52 minutės per metus. Manoma, jog bendra sistemos prastova turi būti 3,69 dienos per metus.

Kada komponentai sujungti lygiagrečiai, veikimo tikimybė yra apibrėžiama, kad sistema veikia jei nors vienas iš elementų yra sugedęs. Bendrai sujungtų komponentų veikimo tikimybė:

$$A = 1 - ((1 - A_A)(1 - A_B)); \quad (4)$$



1.11 pav. Lygiagretusis jungimas

Pavyzdžiui, esant lygiagrečiam jungimui, kurio komponentai  $A=99\%$ , o  $B=99\%$ , tai bendras patikimumas yra  $99,99\%$ . Tai laukiamosios prastovos A ir B elementui yra 3,65 dienos per metus. Sujungus juos lygiagrečiai, bendra sistemos prastova sumažės 52 minučių per metus. Tai parodo jog lygiagrečiai sujungtų komponentų veikimo tikimybė yra žymiai didesnė, nei komponentų sujungtų nuosekliai.[9][10]

### 1.6.1. Patikimumo skaičiavimas, taikant Markovo grandines

Kompiuterinių tinklų, telekomunikacinių sistemų patikimumo skaičiavimams yra plačiai naudojamas Markovo modelis. Sudarant Markovo grandines yra naudojami gedimo ( $\lambda$ ) ir atkūrimo ( $\mu$ ) intensyvumo parametrai. Išsprendus Markovo procesus gaunamos atskiros tikimybės kiekvienai būsenai. Atsižvelgiant į tai, ar būseną yra veikianti, ar neveikianti, galiausiai surandamos veikimo ( $R_s$ ) ir gedimo ( $Q_s$ ) tikimybės.

Gedimo ir atkūrimo intensyvumai gaunami:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}; \quad (5)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR}; \quad (6)$$

čia,

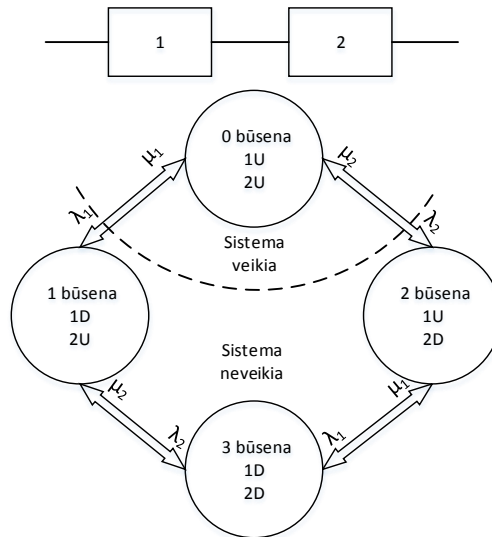
MTTF – vidutinis laikas iki gedimo;

MTTR – vidutinis laikas iki atkūrimo.

Nuoseklios sistemos struktūra ir Markovo modelis atkuriamai sistemai pavaizduotas 1.12 pav., kuriame:

„U“ reikšmė „Up“, kuri reiškia, kad elementas veikia tinkamai.

„D“ reikšmė „Down“, kuri reiškia, kad elementas neveikia.



1.12 pav. Markovo modelis atkuriamai nuosekliai sistemai

Nuoseklios sistemos patikimumas išreiškiamas:

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}; \quad (7)$$

Gedimų intensyvumas ir MTTF yra gaunamas:

$$MTTF_s = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}; \quad (8)$$

Jungiant du elementus nuosekliai, gedimų intensyvumas ir atkūrimo intensyvumas yra lygus:

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2; \quad (9)$$

$$\mu_s = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 \mu_2)}{\lambda_1 \lambda_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}; \quad (10)$$

Pagal 1.12 pav. pavaizduotą schemą galima apskaičiuoti atskirų būsenų tikimybes. Tam, kad jas surasti reikia sudaryti tiesinių lygčių sistemą. Kad gautume tiesines lygtis reikia sudaryti intensyvumų perėjimo matrica A:



$$A = \begin{bmatrix} -(\lambda_a + \lambda_b) & \lambda_a & \lambda_b & 0 \\ \mu_a & -(\lambda_b + \mu_a) & 0 & \lambda_b \\ \mu_b & 0 & -(\lambda_a + \mu_b) & \lambda_a \\ 0 & \mu_b & \mu_a & -(\mu_a + \mu_b) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Iš intensyvumų matricos  $A$  sudaromos tiesinės lygtys ir prilyginamos nuliui. Kadangi visos lygtys lygios nuliui, tai vieną lygtį reikia pakeisti reikšmine:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1 \quad (11)$$

Čia,

$P_0, P_1, P_2, P_3$  – atskirų būsenų tikimybės.

Gaunami būsenų sprendiniai:

$$P_0 = \frac{\mu_a \mu_b}{D}; \quad (12) \quad P_1 = \frac{\lambda_a \mu_b}{D}; \quad (13) \quad P_2 = \frac{\lambda_b \mu_a}{D}; \quad (14) \quad P_3 = \frac{\lambda_b \lambda_a}{D}; \quad (15)$$

$$D = (\lambda_a + \mu_a)(\lambda_b + \mu_b); \quad (16)$$

Šiuo atveju veikimo tikimybė:

$$R_s = P_0; \quad (17)$$

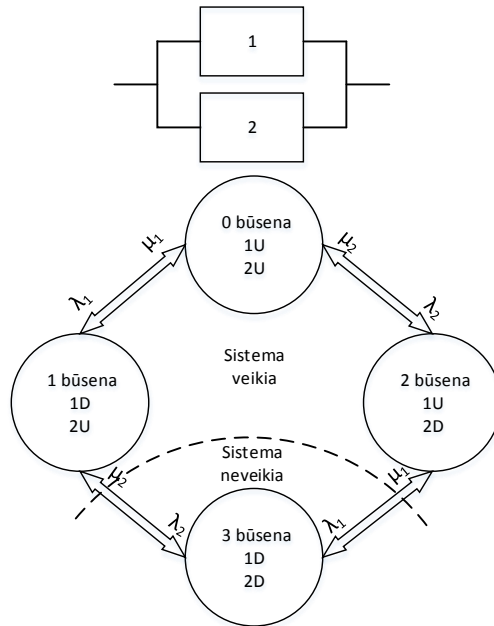
Gedimo tikimybė:

$$Q_s = P_1 + P_2 + P_3; \quad (18)$$

Lygiagrečios sistemos struktūra ir Markovo modelis atkuriamai sistemai pavaizduotas 1.13 pav., kuriame:

„U“ reikšmė „Up“, kuri reiškia, kad elementas veikia tinkamai.

„D“ reikšmė „Down“, kuri reiškia, kad elementas yra sugedęs.



1.13 pav. Markovo modelis atkuriamai lygiagrečiai sistemai

Lygiagrečios sistemos patikimumas išreiškiamas:

$$R_p(t) = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t)R_2(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}; \quad (11)$$

Gedimų intensyvumas ir MTTF yra gaunamas:

$$MTTF_p = \int_0^{\infty} R_p(t) dt = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}; \quad (12)$$

Jungiant du elementus lygiagrečiai, gedimų intensyvumas ir atkūrimo intensyvumas yra lygus:

$$\mu_p = \mu_1 + \mu_2; \quad (13)$$

$$\lambda_p = \frac{(\lambda_1 \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}; \quad (14)$$

Lygiagretaus Markovo modelis sprendžiamas, pagal nuoseklųjį Markovo modelį. Iš gautų būsenų tikimybių randamos veikimo ir gedimo tikimybės:

Šiuo atveju veikimo tikimybė:

$$R_s = P_0 + P_1 + P_2; \quad (17)$$

Gedimo tikimybė:

$$Q_s = P_3; \quad (18) \quad [1][11]$$

Apžvelgus nemažai literatūros šaltinių, rasta daug įvairių patikimumo skaičiavimų. Taip pat patikimumams skaičiuoti naudojamos labai plataus diapazono gedimų intensyvumų ir atkūrimų intensyvumų reikšmės. Tinklo topologijų gauti patikimumui, priklausomai nuo literatūros šaltinių taip pat skiriasi. 1.6.1 lentelėje surašyti vieno šaltinio topologijų patikimumai.

1.6.1 Lentelė. Ryšių tinklo topologijų patikimumai. [9]

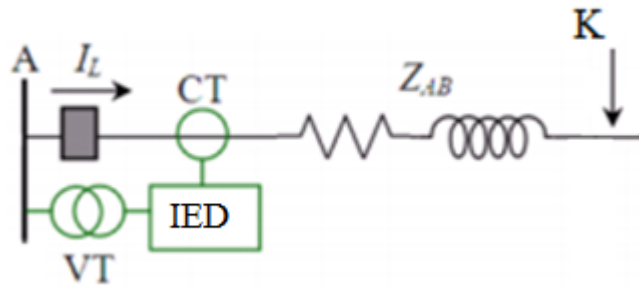
Pastotės tinklo topologija	Patikimumas
Nuosekli topologija	0,999829543984911
Žiedinė topologija	0,999920852619063
Dubliuota topologija	0,999957382410279

## 1.7. Skaitmeninė distancinė apsauga

Distancinės apaugos naudojamos nustatyti atstumą iki trumpojo jungimo gedimo vietos ir pagal trumpąjį jungimą parinkti apsaugos suveikimo laiką. Ši apsauga nustato linijos pilnutinę varžą ( $Z_L$ ) pagal įtampos ir srovės santykį:

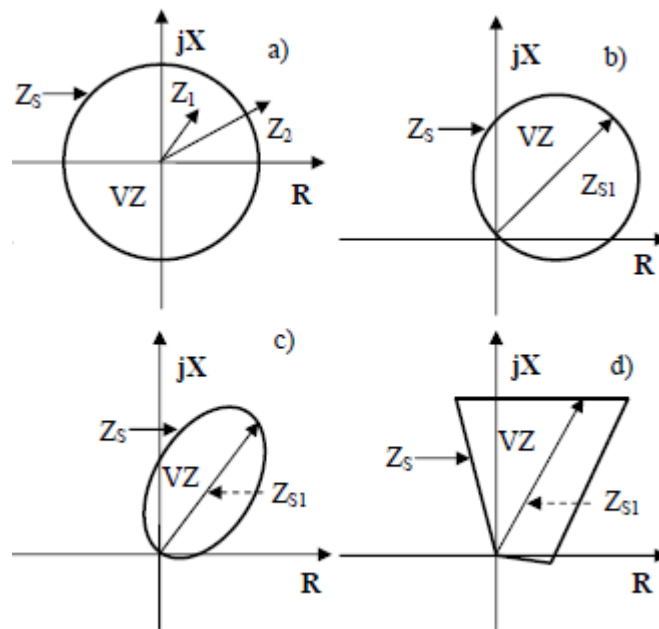
$$\underline{Z}_L = \frac{U}{I} = R_L + jX_L; \quad (15)$$

Distancinė relė gali būti naudojama kaip pagrindinė ar antrinė apsauga. Ji gali būti naudojama kaip perdavimo linijos ar galios transformatoriaus apsauga. Šiomis dienomis skaitmeninės distancinės relės yra plačiai naudojamos pakeičiant senąsias elektromechanines ir bekontaktes relės. Suprasti distancinės relės veikimą yra pakankamai sudėtinga lyginant su kitomis apsaugos relėmis, nes jų veikimas aprašomas sudėtinga teorija. 1.14 pav. pavaizduota paprasta perdavimo linijos distancinės apsaugos schema. Trijų fazių srovių ir įtampų pilnutinės varžos matavimo reikšmės yra gaunamos iš srovės ir įtampos transformatorių. Trijų fazių įtampos ir srovės signalai turi būti nufiltruoti, kad išvengtume pašalinių signalo harmonikų, kurios reikštų trumpąjį jungimą. Kad relė priimtų filtruotus signalus, signalai turi būti diskretizuojami tam tikru dažniu. Tada relė palygina užduotąją pilnutinę varžą su matuota pilnutine varža, kad nustatytų ar klaida yra vidinėje ar išorinėje apsaugos zonoje. Apsauga staigiai išsiunčia atjungimo signalą, kada pilnutinės varžos reikšmė patenka į distancinės relės vidinę apsaugos zoną.



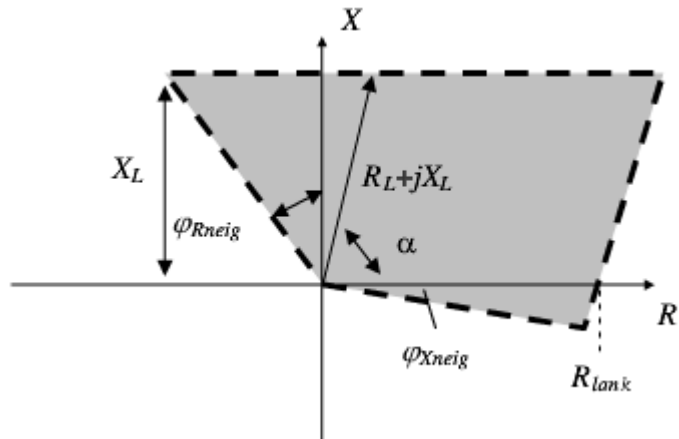
1.14 pav. Distancinės apsaugos bendroji schema

Yra daug distancinių relių charakteristikų tipų (1.15 pav.): apskritimas centre, apskritimas paslinktas iš centro, ovalas, kampuota figūra. Kiekviena charakteristika turi skirtingas numatytas funkcijas ir teorijas. Pilnutinės varžos matavimų algoritmas priklauso nuo gedimo rūšies.



1.15 pav. Distancinių relių charakteristikų tipai

Daugiakampė charakteristika palyginus su kitomis charakteristikomis yra tinkamiausia perdavimo linijų apsaugai. Relės su daugiakampe charakteristika, turi lankstesnę apsaugą nuo trumpųjų jungimų. Daugiakampė charakteristika pavaizduota 1.16 pav.



1.16 pav. Daugiakampė distancinės relės charakteristika

Šios apsaugos charakteristika susideda iš dviejų ašių, koordinačių plokštumoje, tai R – aktyviosios varžos, X – reaktyviosios varžos.

$R_L + jX_L$  – linijos kompleksinė varža.

$R_{lank}$  – elektros lanko varža.

$\varphi_{Rneig}$  – neigiamos varžos kampas apie  $25^\circ$ .

$\varphi_{Xneig}$  – talpinės varžos kampas apie  $15^\circ$ .

$\alpha$  – kampas tarp aktyvios varžos ašies ir laidininko kompleksinės varžos vektoriaus. [2]

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (16)$$

Šiuolaikinėse RAA apsaugose dažniausiai naudojamos daugiakampės charakteristikos. Daugiakampės charakteristikos pagerina dvifazio trumpojo jungimo apsaugos suveikimą. Taip pat pagerina apsaugą esant nepastoviam elektros lanko išlydžiui, kurio varža kinta, nėra pastovaus dydžio. Apsauga naudojama ir esant dvipusėms maitinimo linijoms. [23]

### 1.7.1. Distancinės relės kompleksinės varžos skaičiavimas

Distancinės relės kompleksinės varžos matavimai turi būti lygus perdavimo linijos kompleksinei varžai. Tai skaičiuojama, dalinant įtampos reikšmes iš srovės reikšmių, distancinėje relėje ( $V_R/I_R$ ). Įtampos ir srovės reikšmės, distancinėje relėje taps skirtingomis, priklausomai nuo trumpųjų jungimų, kurie surašyti 1.7.1. lentelėje.

1.7.1 lentelė. Įtampos ir srovės reikšmės distancinėje relėje.

	Trumpojo jungimo tipas	$V_R$	$I_R$
$K^1$	AG	$V_{an}$	$I_a + KI_0$
	BG	$V_{bn}$	$I_b + KI_0$
	CG	$V_{cn}$	$I_c + KI_0$
$K^{1,1}, K^2$	AB/ABG	$V_{an} - V_{bn}$	$I_a - I_b$
	AC/ACG	$V_{an} - V_{cn}$	$I_a - I_c$
	BC/BCG	$V_{bn} - V_{cn}$	$I_b - I_c$
$K^3$	ABC/ABCG	$V_{an} = V_{bn} = V_{cn}$	$I_a = I_b = I_c$

Čia:

A, B, C – pažeistos linijos fazės, G – žemė.

$I_a, I_b, I_c$  – fazinės srovės.

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  – fazinės įtampos.

$$K = \frac{(Z_0 - Z_1)}{Z_1}; \quad (16)$$

K – atsargos faktorius.

$$I_0 = \frac{(I_a + I_b + I_c)}{3}; \quad (17)$$

$I_0$  – nulinės sekos srovė.

$Z_0, Z_1$  – nulinės sekos ir tiesioginės sekos kompleksinės varžos.

Trijų fazių trumpajam jungimui, fazinė įtampa ir fazinė srovė turi būti tos pačios fazės. Jei  $V_R$  lygi  $V_{an}$ , tai  $I_R$  lygi  $I_a$ . [20]

Pilnutinės varžos kampinis dažnis lygus įtampos ir srovės kampinių dažnių skirtumui:

$$\varphi_Z = \varphi_U - \varphi_I \quad (18)$$

Pilnutinė varža  $\underline{Z}$  yra lygi:

$$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi_Z} = Z \cdot (\cos \varphi_Z + j \cdot \sin \varphi_Z) = R + j \cdot X \quad (19)$$

Pilnutinę varžą galime išreikšti ir taip:

$$\underline{Z} = \frac{U}{I} = \frac{U \cdot e^{j\varphi_U}}{I \cdot e^{j\varphi_I}} = \frac{U}{I} \cdot e^{j(\varphi_U - \varphi_I)} = \underbrace{\frac{U}{I} \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I)}_R + j \underbrace{\frac{U}{I} \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I)}_X \quad (20)$$

## Literatūros analizės išvados

1. Išaiškintas išmatuotų verčių protokolo veikimo principas. Nustatyta, jog laiko vėlinimas tarp išsiunčiamų išmatuotų verčių paketų, neturi viršyti 3 – 4 ms.
2. Išanalizuotos visos pagrindinės elektros pastotės ryšių tinklo topologijos. Išsiaiškinta, kad yra keturios pagrindinės ryšių topologijos, tai nuosekloji, žiedinė, žvaigždinė ir dubliuotoji. „Ethernet“ tinklo patikimumas priklauso, nuo tinklo komutatorių jungimo topologijų.
3. Patikimui skaičiuoti ryšių tinklo sistemoms geriausiai tinka Markovo procesai. Markovo procesais galima apskaičiuoti tikimybes, atskiroms tinklo sistemos būsenoms, iš kurių galima išskaičiuoti bendrą sistemos patikimumą.
4. Išanalizuotas distancinės apsaugos veikimo principas. Distancinės apsaugos veikimas yra paremtas kompleksinės varžos skaičiavimais, iš išmatuotų įtampų ir srovių. Šiuolaikinių skaitmeninių distancinių apsaugų veikimas paremtas daugiakampe charakteristika, kuri artimiausiai sutampa su trumpojo jungimo charakteristika.



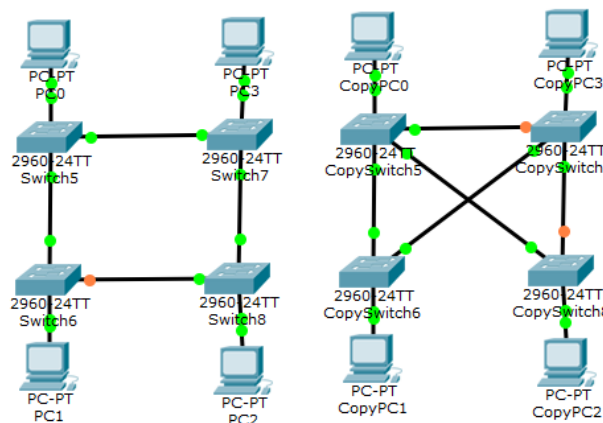
## 2. TYRIMAS

### 2.1. Matuotų verčių paketų, siuntimo trukmių tyrimas

Bandymai buvo atlikti kompiuterinėje laboratorijoje, elektronikos ir telekomunikacijos fakultete. Eksperimento metu buvo naudojami keturi „Cisco Catalyst 3560G“ konfigūruojami tinklo komutatoriai (2.1 pav.), kurie buvo sujungiami dvejomis topologijomis: žiedine ir dubliuota, kaip parodyta 2.2 pav. Tam, kad sujungti tinklo komutatorius įvairiomis topologijomis, reikėjo juos sukongfigūruoti „Cisco“ konfigūravimo kalba. Norint, kad tinklo komutatoriai veiktų sparčiausiu režimu, buvo sukongfigūruotas RSTP protokolas. Šis protokolas suteikia mažiausią laiko vėlinimą ir trumpiausią tinklo komutatorių atsistatymo laiką po gedimo. Tai yra, tinklo komutatoriai dirba sparčiausiu režimu.

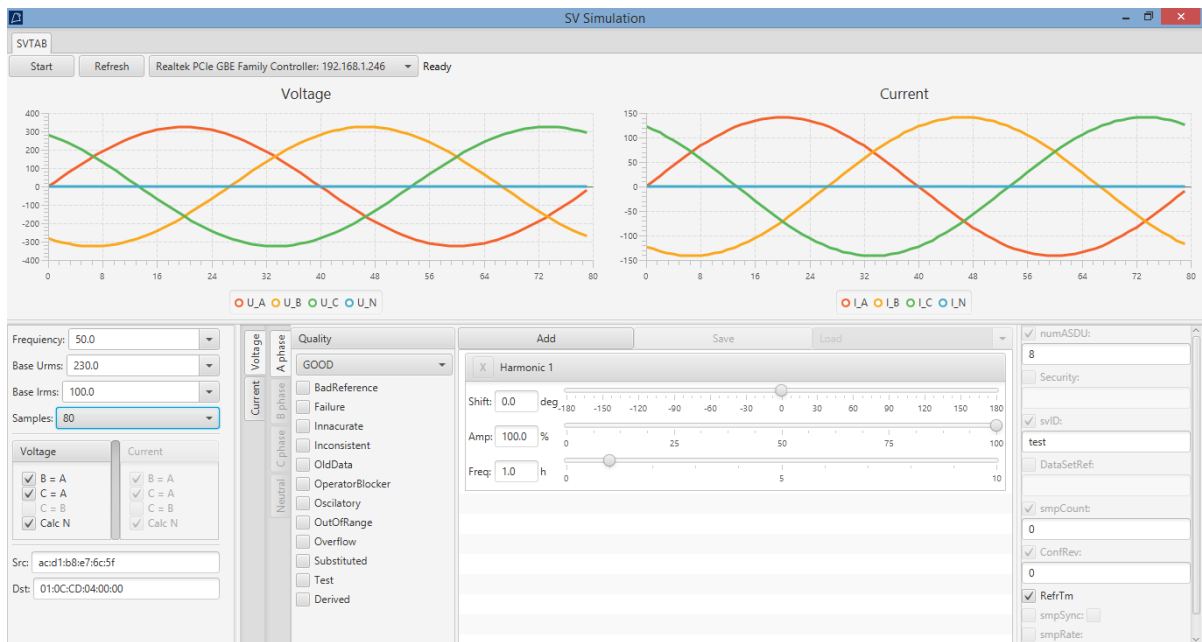


2.1 pav. „Ethernet“ komutatorius „Cisco Catalyst 3560G“



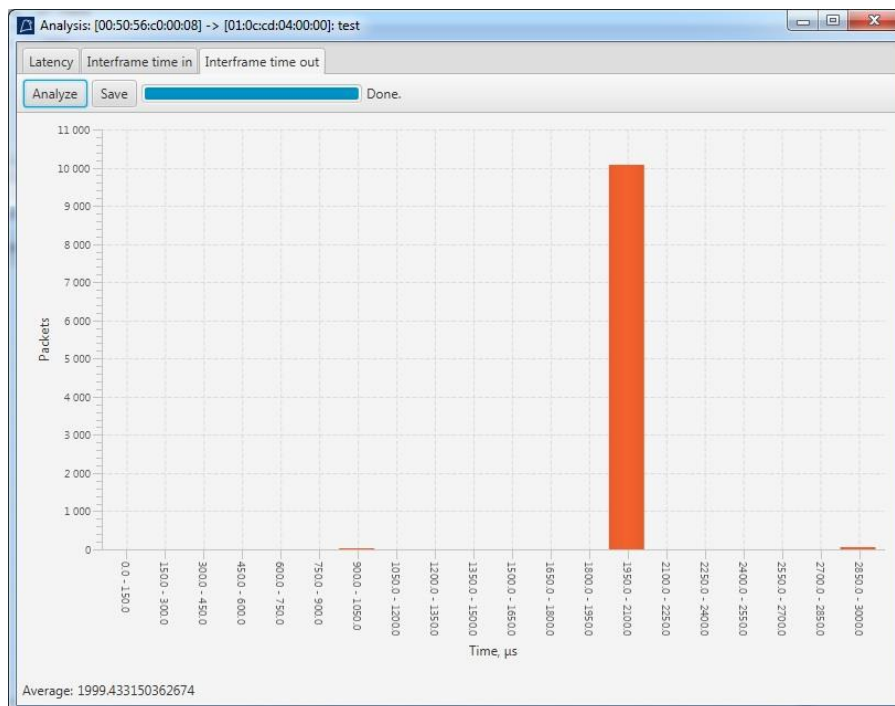
2.2 pav. Žiedinės ir dubliuotos topologijos jungimai

Prie tinklo komutatorių buvo prijungti kompiuteriai, kuriuose buvo įdiegta „61850 Eagle“ programa, kuri simuliuo momentinių verčių siuntimą bei priėmimą. Įtampos ir srovės matavimų simuliacija, naudojant „61850 Eagle“ programą pavaizduota 2.3 pav.



2.3 pav. Simuliuojami įtampos ir srovės signalai

Gaunami rezultatai „61850 Eagle“ programoje, tarp matuotų verčių paketų, pavaizduoti 2.4 pav.



2.4 pav. Gauti rezultatai tarp matuotų verčių paketų

Bandymai buvo atliekami keliais būdais. Normaliu režimu, kada visa sistema veikia be sutrikimų ir antruoju būdu, sukuriant dirbtinį sutrikimą, atjungiant „Ethernet“ liniją tarp tinklo komutatorių. Tada išmatuotosios vertės buvo siunčiamos per rezervinius tinklo komutatorius ir linijas. Žemiau išvardinti, kokie buvo atlikti tyrimo metu eksperimentai:

S1 – vienas kompiuteris siunčia, kitas priima;

S1 nutraukiamas – vienas kompiuteris siunčia, kitas priima, nutraukiant ryšį;

S2 – du kompiuteriai siunčia ir vienas priima;

S2 nutraukiamas – du kompiuteriai siunčia ir vienas priima, nutraukiant ryšį;

S3 – trys kompiuteriai siunčia ir vienas priima;

S3 nutraukiamas – trys kompiuteriai siunčia ir vienas priima, nutraukiant ryšį.

Šie atvejai atlikti tiek žiedinei, tiek dubliuotai topologijai.

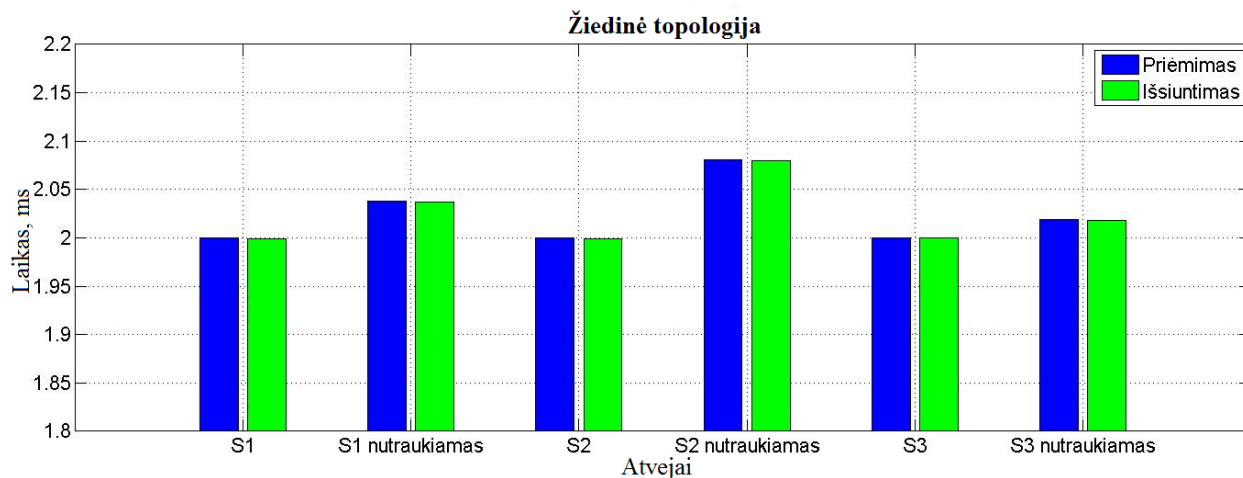
Gauti rezultatai:

1. Žiedinės topologijos bandymų rezultatai:

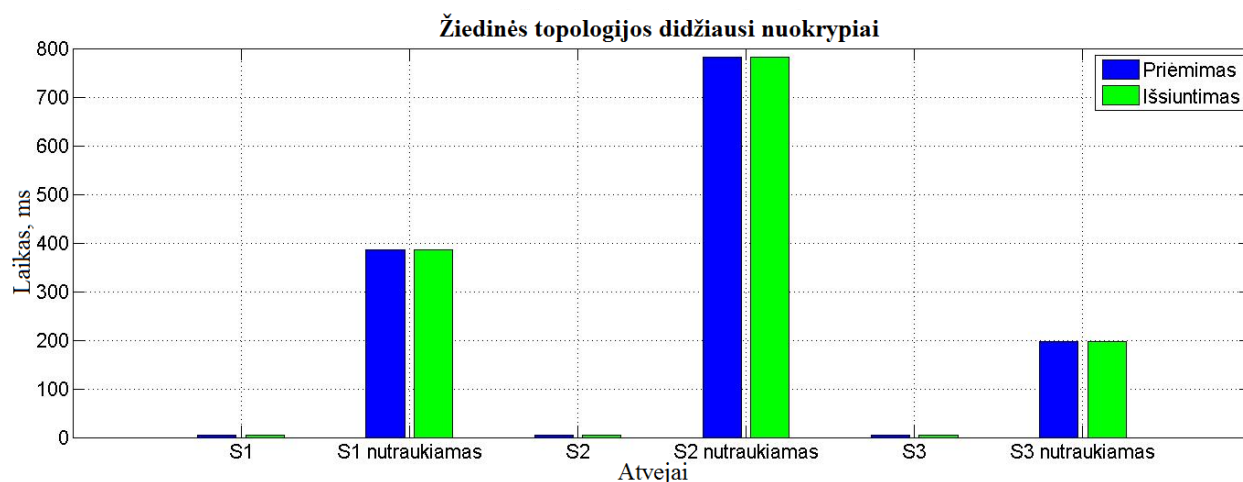
2.1.1 lentelė. Žiedinės topologijos rezultatai.

<b>Bandymai</b>	<b>Priėmimo laikas, ms</b>	<b>Max. Nuokrypis, ms</b>	<b>Išsiuntimo laikas, ms</b>	<b>Max. Nuokrypis, ms</b>
<b>S1</b>	1,999	5,538	1,999	4,749
<b>S1 nutraukiamas</b>	2,037	386,020	2,037	386,199
<b>S2</b>	1,999	5,005	1,999	3,874
<b>S2 nutraukiamas</b>	2,080	781,453	2,080	781,332
<b>S3</b>	1,999	5,311	1,999	4,147
<b>S3 nutraukiamas</b>	2,019	196,746	2,018	196,664

Žemiau pavaizduoti gautų rezultatų grafikai. Pirmame grafike pavaizduoti matuotų verčių laikai tarp išsiunčiamų ir priimamų paketų (2.5 pav.). Antrajame grafike pavaizduoti matuotų verčių paketų didžiausi standartiniai nuokrypiai (2.6 pav.), visiems galimiems bandymo atvejams.



2.5 pav. Žiedinės topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikai



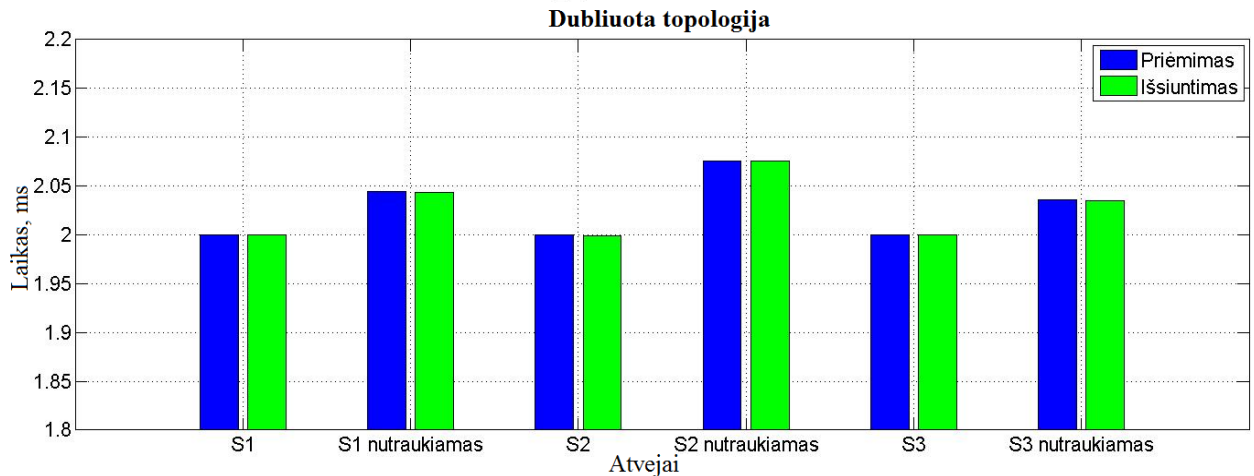
2.6 pav. Žiedinės topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikų didžiausios dispersijos

## 2. Dubliuotos topologijos bandymų rezultatai:

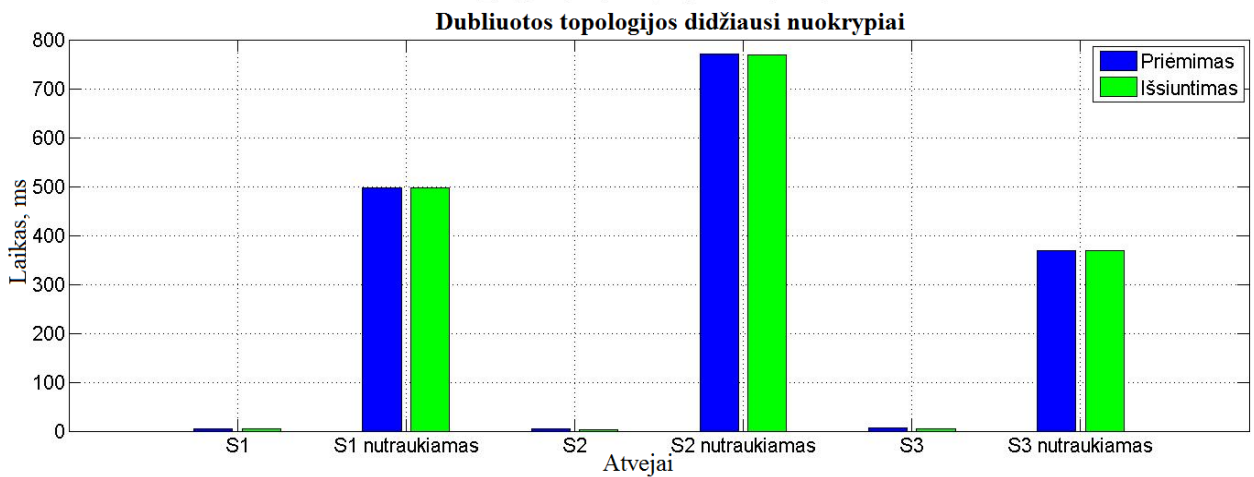
### 2.1.2 lentelė. Dubliuotos topologijos rezultatai.

Bandymai	Priėmimo laikas, ms	Max. Nuokrypis, ms	Išsiuntimo laikas, ms	Max. Nuokrypis, ms
<b>S1</b>	2,000	5,310	1,999	4,000
<b>S1 nutraukiamas</b>	2,044	496,336	2,043	496,285
<b>S2</b>	1,999	4,999	1,999	3,500
<b>S2 nutraukiamas</b>	2,075	769,873	2,075	769,749
<b>S3</b>	2,000	6,389	1,999	5,166
<b>S3 nutraukiamas</b>	2,035	368,411	2,035	368,666

Žemiau pavaizduoti dubliuotos topologijos rezultatų grafikai. Pirmajame grafike pavaizduoti matuotų verčių laikai tarp išsiunčiamų ir priimamų paketų (2.7 pav.). Antrajame grafike pavaizduoti matuotų verčių paketų didžiausi standartiniai nuokrypiai (2.8 pav.), visiems galimiems bandymo atvejams.



2.7 pav. Dubliuotos topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikai



2.8 pav. Dubliuotos topologijos išsiuntimo ir priėmimo laikų didžiausios dispersijos

## 2.2. Patikimumo skaičiavimas

Patikimumo tyrimo metu buvo tiriamos trys skirtingos topologijos, tam kad išsiaiškinti, kuri tinklo topologija turi didžiausią patikimumą. Patikimumo skaičiavimams buvo pritaikyta Markovo grandinių teorija, su kuria galima apskaičiuoti tikimybę kiekvienai atskirai būsenai. Būsenų tikimybės skaičiuoti naudojami gedimo ir atkūrimo intensyvumai. Šie dydžiai surašyti lentelėje, kurie buvo surasti iš įvairių literatūros šaltinių. Veikimo tikimybės skaičiuotos šioms topologijoms: nuosekliai, žiediniai ir dubliuotai.

2.2.1 lentelė. Gedimų ir atkūrimų intensyvumai.[21]

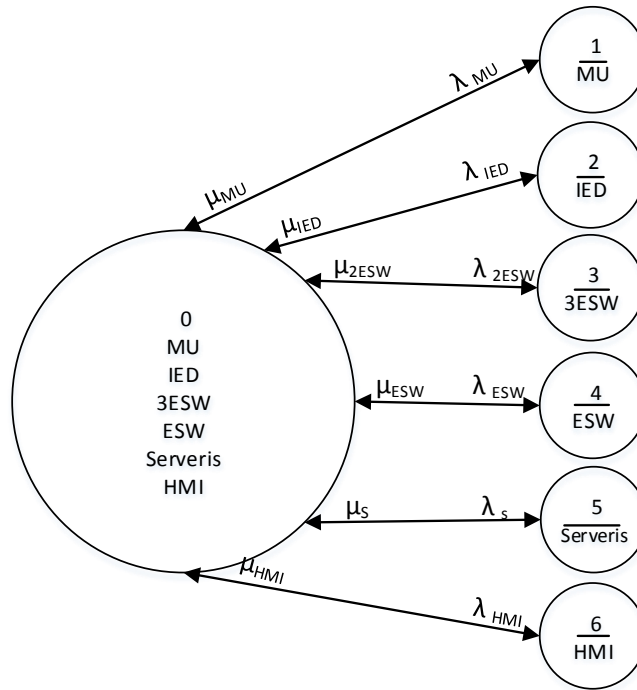
<b>Komponentas</b>	<b>Gedimų intensyvumas (kartai per metus)</b>	<b>Atkūrimo intensyvumas (kartai per metus)</b>
<b>MU</b>	0,00667	1095
<b>IED</b>	0,00667	1095
<b>Komutatorius</b>	0,02	1095
<b>Pagrindinis komutatorius</b>	0,02	1095
<b>Serveris</b>	0,02	1095
<b>HMI</b>	0,05	1095

### 2.2.1. Nuoseklios topologijos patikimumo skaičiavimas

2.9 pav. pavaizduota nuosekliosios topologijos schema. Sudaryta schema, kuri susideda iš matavimo įrenginio (MU), IED, trijų nuosekliai sujungtų komutatorių, pagrindinio komutatoriaus, serverio, ir HMI.

Trijų nuosekliai sujungtų tinklo komutatorių gedimo intensyvumas apskaičiuojamas pagal (9) formulę:

$$\lambda_{3ESW} = \lambda_{ESW1} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW3} = 0,06 \text{ kartai per metus}$$



2.9 pav. Nuoseklios topologijos struktūrinė ir Markovo schemas

Sistema veikia esant 0 būsenai. Sistema neveikia esant 1, 2, 3, 4, 5, 6 būsenoms. Norint išspręsti šią sistemą reikia sudaryti perėjimų intensyvumo matricą.

Sudaroma perėjimų intensyvumo matrica A:

$$A = \begin{bmatrix} -(\lambda_{MU} + \lambda_{IED} + \lambda_{3ESW} + \lambda_{ESW} + \lambda_s + \lambda_{HMI}) & \lambda_{MU} & \lambda_{IED} & \lambda_{3ESW} & \lambda_{ESW} & \lambda_s & \lambda_{HMI} \\ \mu_{MU} & -\mu_{MU} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{IED} & 0 & -\mu_{IED} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{3ESW} & 0 & 0 & -\mu_{3ESW} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{ESW} & 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW} & 0 & 0 \\ \mu_s & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_s & 0 \\ \mu_{HMI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{HMI} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix}$$

Sudauginant kiekvieną matricos stulpelį su vektoriumi P, gaunama tiesinė lygčių sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\lambda_{MU} + \lambda_{IED} + \lambda_{3ESW} + \lambda_{ESW} + \lambda_S + \lambda_{HMI})P_0 + \mu_{MU}P_1 + \mu_{IED}P_2 + \mu_{3ESW}P_3 + \mu_{ESW}P_4 + \mu_S P_5 + \mu_{HMI}P_6 = 0; \\ \lambda_{MU}P_0 - \mu_{MU}P_1 = 0; \\ \lambda_{IED}P_0 - \mu_{IED}P_2 = 0; \\ \lambda_{3ESW}P_0 - \mu_{3ESW}P_3 = 0; \\ \lambda_{ESW}P_0 - \mu_{ESW}P_4 = 0; \\ \lambda_S P_0 - \mu_S P_5 = 0; \\ \lambda_{HMI}P_0 - \mu_{HMI}P_6 = 0; \end{array} \right.$$

Tam, kad galėtume išspręsti lygčių sistemą, vieną lygtį padarome reikšmine:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 1.$$

Lygčių sistema išsprendžiama, naudojant „Matlab“ programinę įrangą. Programos algoritmas patalpintas priede (1).

Gauti rezultatai:

$$R_s = P_0 = 0,9998508532$$

$$Q_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = 0,0001491467$$

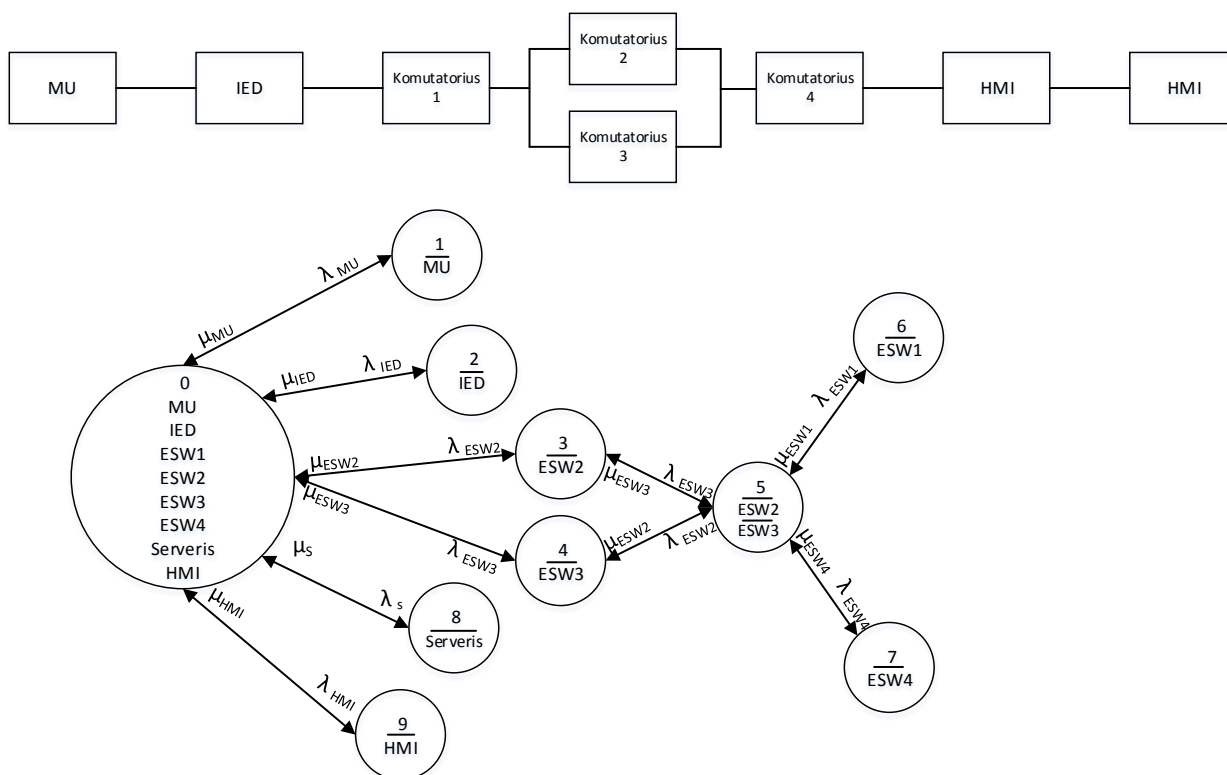
Apskaičiuojama nuoseklios topologijos prastova per metus:

$$\text{Prastova} = Q_s \cdot 8760 \text{ h} = 1,3065 \text{ h} \approx 1 \text{ h } 18 \text{ min}$$



## 2.2.2. Žiedinės topologijos patikimumo skaičiavimas

Žiedinės topologijos patikimumo schema pavaizduota 2.10 pav. Sistema sudaryta iš matavimo įrenginio, relės, komutatoriaus, dvejų lygiagrečiai sujungtų komutatorių, serverio ir HMI.



2.10 pav. Žvaigždinės topologijos struktūrinė ir Markovo schemas

Sistema veikia esant 0, 3 ir 4 būsenoms. Sistema neveikia esant 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9 būsenoms. Norint išspręsti šią sistemą reikia sudaryti perėjimų intensyvumo matricą.

Sudaroma perėjimų intensyvumo matrica A:

$$A = \begin{bmatrix} -(\lambda_{MU} + \lambda_{IED} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW3} + \lambda_s + \lambda_{HMI}) & \lambda_{MU} & \lambda_{IED} & \lambda_{ESW2} & \lambda_{ESW3} & \dots \\ \mu_{MU} & -\mu_{MU} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_{IED} & 0 & -\mu_{IED} & 0 & 0 & \dots \\ \mu_{ESW2} & 0 & 0 & -(\mu_{ESW2} + \lambda_{ESW3}) & 0 & \dots \\ \mu_{ESW3} & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{ESW2} + \lambda_{ESW3}) & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW3} & \mu_{ESW2} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_s & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_{HMI} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_s & \lambda_{HMI} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(\mu_{ESW3} + \mu_{ESW2} + \lambda_{ESW1} + \lambda_{ESW4}) & \lambda_{ESW1} & \lambda_{ESW4} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{ESW3} & -\mu_{ESW3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{ESW4} & 0 & -\mu_{ESW4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mu_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{HMI} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \end{bmatrix}$$

Sudauginant kiekvieną matricos stulpelį su vektoriumi P, gaunama tiesinė lygčių sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\lambda_{MU} + \lambda_{IED} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW3} + \lambda_s + \lambda_{HMI})P_0 + \mu_{MU}P_1 + \mu_{IED}P_2 + \mu_{ESW2}P_3 + \mu_{ESW3}P_4 + \mu_sP_8 + \mu_{HMI}P_9 = 0; \\ \lambda_{MU}P_0 - \mu_{MU}P_1 = 0; \\ \lambda_{IED}P_0 - \mu_{IED}P_2 = 0; \\ \lambda_{ESW2}P_0 - (\mu_{ESW2} + \lambda_{ESW3})P_3 + \mu_{ESW3}P_5 = 0; \\ \lambda_{ESW3}P_0 - (\mu_{ESW3} + \lambda_{ESW2})P_4 + \mu_{ESW2}P_5 = 0; \\ \lambda_{ESW3}P_3 + \lambda_{ESW2}P_4 - (\mu_{ESW3} + \mu_{ESW2} + \lambda_{ESW1} + \lambda_{ESW4})P_5 + \mu_{ESW1}P_6 + \mu_{ESW4}P_7 = 0; \\ \lambda_{ESW1}P_5 - \mu_{ESW1}P_6 = 0; \\ \lambda_{ESW4}P_5 - \mu_{ESW4}P_7 = 0; \\ \lambda_sP_0 - \mu_sP_8 = 0; \\ \lambda_{HMI}P_0 - \mu_{HMI}P_9 = 0; \end{array} \right.$$

Tam, kad galėtume išspręsti lygčių sistemą, vieną lygtį padarome reikšmine:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 = 1.$$

Lygčių sistema išsprendžiama, naudojant „Matlab“ programinę įrangą. Programos algoritmas patalpintas priede (2).

Gauti rezultatai:

$$R_s = 0,9999238986$$

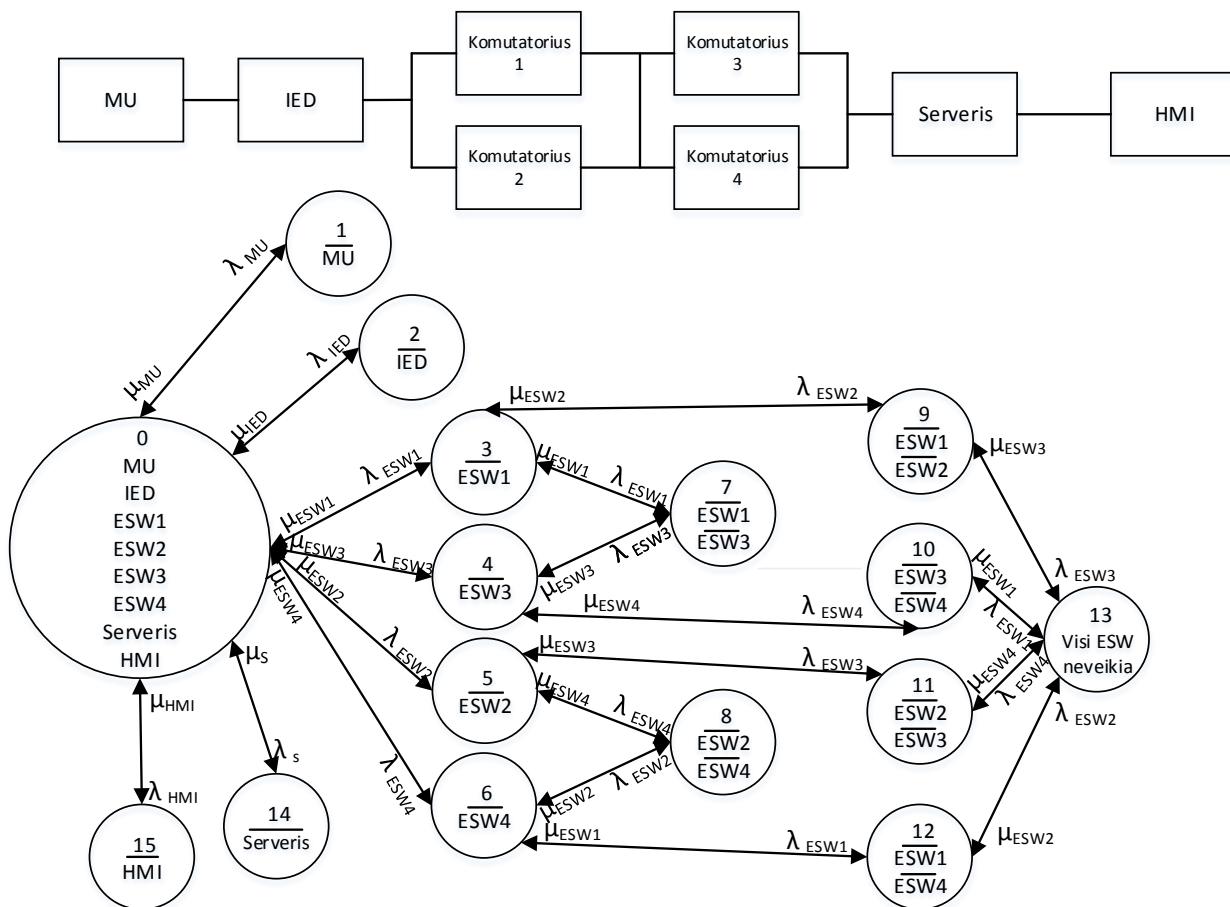
$$Q_s = 0,0000761013$$

Apskaičiuojama žiedinės topologijos prastova per metus:

$$\text{Prastova} = Q_s \cdot 8760h = 0,6666 h \approx 40 \text{ min}$$

### 2.2.3. Dubliuotos topologijos patikimumo skaičiavimas

Dubliuotos topologijos patikimumo schema pavaizduota 2.11 pav. Sistema sudaryta iš keturių tinklo komutatorių. Prie pirmo ir antro komutatorių prijungtas matavimo įtaisas ir IED. Pirmas ir antras komutatorius yra prijungtas prie papildomo trečio ir ketvirto komutatorių žiedo. Toliau nuosekliai prie tinklo komutatorių žiedo prijungtas serveris ir HMI.



2.11 pav. Dubliuotos topologijos struktūrinė ir Markovo schemas

Sistema veikia esant 0, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11 ir 12 būsenoms. Sistema neveikia esant 1, 2, 7, 8, 13, 14 ir 15 būsenoms. Norint išspręsti šią sistemą reikia sudaryti perėjimų intensyvumo matricią.

Sudaroma perėjimų intensyvumo matrica A, priedas (4).

Sudauginant kiekvieną matricos stulpelį su vektoriumi P, gaunama tiesinė lygčių sistema:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(\lambda_{MU} + \lambda_{IED} + \lambda_{ESW1} + \lambda_{ESW3} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW4})P_0 + \mu_{MU}P_1 + \mu_{IED}P_2 + \mu_{ESW1}P_3 + \mu_{ESW3}P_4 + \mu_{ESW2}P_5 + \mu_{ESW4}P_6 + \mu_S P_{14} + \mu_{HMI}P_{15} = 0; \\ \lambda_{MU}P_0 - \mu_{MU}P_1 = 0; \\ \lambda_{IED}P_0 - \mu_{IED}P_2 = 0; \\ \lambda_{ESW1}P_0 - (\mu_{ESW1} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW3})P_3 + \mu_{ESW3}P_7 + \mu_{ESW2}P_9 = 0; \\ \lambda_{ESW3}P_0 - (\mu_{ESW3} + \lambda_{ESW1} + \lambda_{ESW4})P_4 + \mu_{ESW1}P_7 + \mu_{ESW4}P_{10} = 0; \\ \lambda_{ESW2}P_0 - (\mu_{ESW2} + \lambda_{ESW3} + \lambda_{ESW4})P_5 + \mu_{ESW4}P_8 + \mu_{ESW3}P_{11} = 0; \\ \lambda_{ESW4}P_0 - (\mu_{ESW4} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW1})P_6 + \lambda_{ESW2}P_8 + \mu_{ESW1}P_{12} = 0; \\ \lambda_{ESW3}P_3 + \lambda_{ESW1}P_4 - (\mu_{ESW3} + \mu_{ESW1})P_7 = 0; \\ \lambda_{ESW4}P_5 + \lambda_{ESW2}P_6 - (\mu_{ESW4} + \mu_{ESW2})P_8 = 0; \\ \lambda_{ESW2}P_3 - (\mu_{ESW2} + \lambda_{ESW3})P_9 + \mu_{ESW3}P_{13} = 0; \\ \lambda_{ESW4}P_4 - (\mu_{ESW4} + \lambda_{ESW1})P_{10} + \mu_{ESW1}P_{13} = 0; \\ \lambda_{ESW3}P_5 - (\mu_{ESW3} + \lambda_{ESW4})P_{11} + \mu_{ESW4}P_{13} = 0; \\ \lambda_{ESW1}P_6 - (\mu_{ESW1} + \lambda_{ESW2})P_{12} + \mu_{ESW2}P_{13} = 0; \\ \lambda_{ESW3}P_9 + \lambda_{ESW1}P_{10} + \lambda_{ESW4}P_{11} + \lambda_{ESW2}P_{12} - (\mu_{ESW3} + \mu_{ESW1} + \mu_{ESW4} + \mu_{ESW2})P_{13} = 0; \\ \lambda_S P_0 - \mu_S P_{14} = 0; \\ \lambda_{HMI}P_0 - \mu_{HMI}P_{15} = 0; \end{array} \right.$$

Tam, kad galėtume išspręsti lygčių sistemą, vieną lygtį padarome reikšmine:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} + P_{15} = 1.$$

Lygčių sistema išsprendžiama, naudojant „Matlab“ programinę įrangą. Programos algoritmas patalpintas priede (3).

Gauti rezultatai:

$$R_S = P_0 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} = 0,9999512929$$

$$Q_S = P_1 + P_2 + P_7 + P_8 + P_{13} + P_{14} + P_{15} = 0,0000487071$$

Apskaičiuojama dubliuotos topologijos prastova per metus:

$$\text{Prastova} = Q_S \cdot 8760 \text{ h} = 0,4267 \text{ h} \approx 18 \text{ min}$$

Gautų rezultatų apibendrinimas:

Apskaičiuoti trijų skirtingų ryšio tinklų topologijų patikimumai:

- 1) Nuoseklios topologijos;
- 2) Žiedinės topologijos;
- 3) Dubliuotos topologijos.

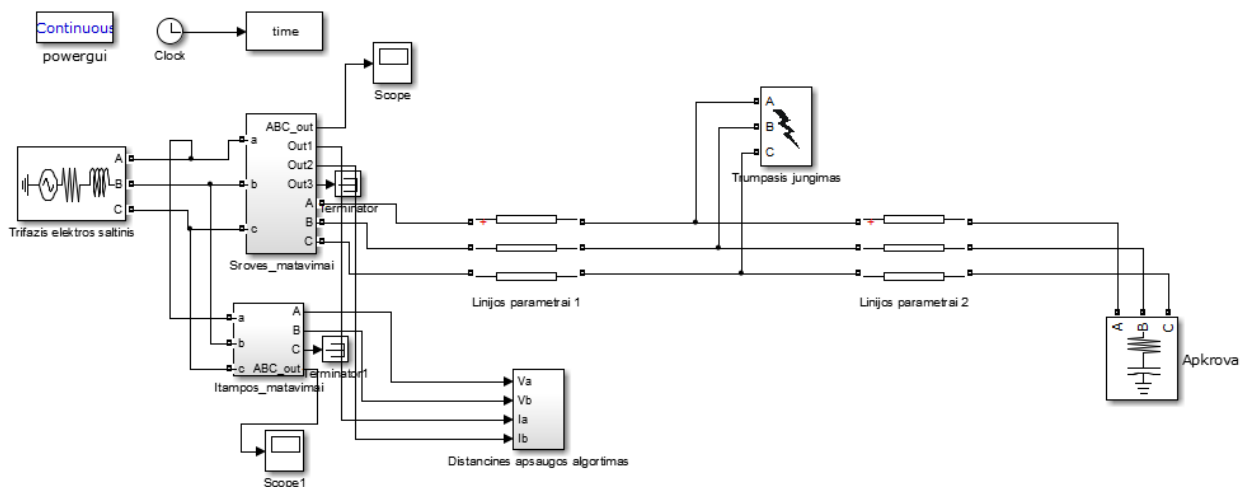
Gauti rezultatai surašyti į lentelę.

2.2.3 lentelė. Apskaičiuoti topologijų patikimumai.

Tinklo topologija	Patikimumas	Prastovos per metus
Nuosekli topologija	0,9998508533	1h 18 min
Žiedinė topologija	0,9999238986	40 min
Dubliuota topologija	0,9999512929	18 min

### 2.3. Distancinės apsaugos naudojančios išmatuotas vertes modeliavimas

Distancinės apsaugos, naudojančios išmatuotas vertes, veikimas modeliuojamas „Matlab“ programiniu paketu, „Simulink“ aplinkoje. Šis modelis modeliuojamas, tam kad sužinoti, kaip elgiasi distancinė apsauga, kai yra netenkama vieno ar kelių išmatuotų verčių paketų. Pirmiausia buvo sudarytas visos sistemos modelis, kuris pavaizduotas 2.12 pav.



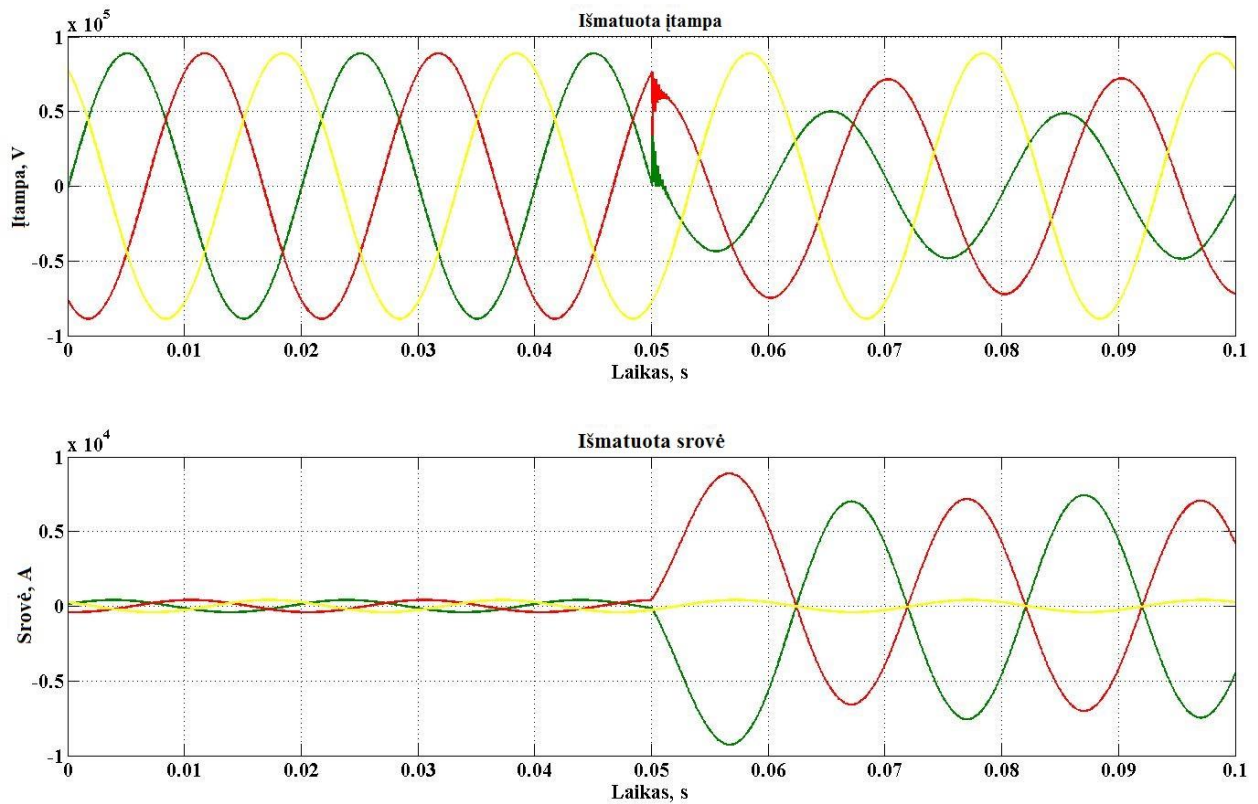
2.12 pav. Distancinės apsaugos modelis

Modelis sudarytas iš šių blokų: trifazio elektros šaltinio, dviejų linijų, apkrovos, trumpojo jungimo bloko, distancinės apsaugos algoritmo bloko, srovės ir įtampos matavimo blokų. Pagrindiniai blokų parametrai surašyti 2.3.1 lentelėje.

2.3.1 lentelė. Distancinės apsaugos modelio blokų parametrai.

<b>Blokų pavadinimai ir parametrai</b>	<b>Dydžiai</b>
<b>Elektros šaltinis</b>	
<b>Įtampa</b>	110 kV
<b>Dažnis</b>	50 Hz
<b>Linijos parametrai</b>	
<b>R<sub>1</sub></b>	0,01273 Ω/km
<b>R<sub>0</sub></b>	0,3864 Ω/km
<b>L<sub>1</sub></b>	0,0009337 H/km
<b>L<sub>0</sub></b>	0,0041264 H/km
<b>C<sub>1</sub></b>	12,74 nF/km
<b>C<sub>0</sub></b>	7,751 nF/km
<b>Linijos ilgis, l</b>	20 km
<b>Apkrova</b>	
<b>Aktyvioji galia P</b>	50 MW
<b>Reaktyvioji galia Q</b>	20 MVar

Šiuo modeliu simuliuojamas distancinės apsaugos veikimas įvykstant trumpajam jungimui. Simuliuojant buvo pasirinktas dvifazis trumpasis jungimas, kuris sukuriamas trumpojo jungimo bloke. Trumpasis jungimas sukonfigūruotas taip, kad pradėtų veikti nuo 0,05 s ir baigtųsi ties 0,1 s. Visas distancinės apsaugos modelio simuliacijos užtrukimas užtrunka 0,1 sekundės. Žemiau pavaizduoti gauti įtampos ir srovės grafikai, įvykstant dvifaziui trumpajam jungimui (2.13 pav.).



2.13 pav. Įtampos ir srovės grafikai esant dvifaziam trumpajam jungimui

Pagrindinis modelio blokas, tai aktyvios ir reaktyvios varžos išskaičiavimo blokas pavaizduotas 2.14 pav.



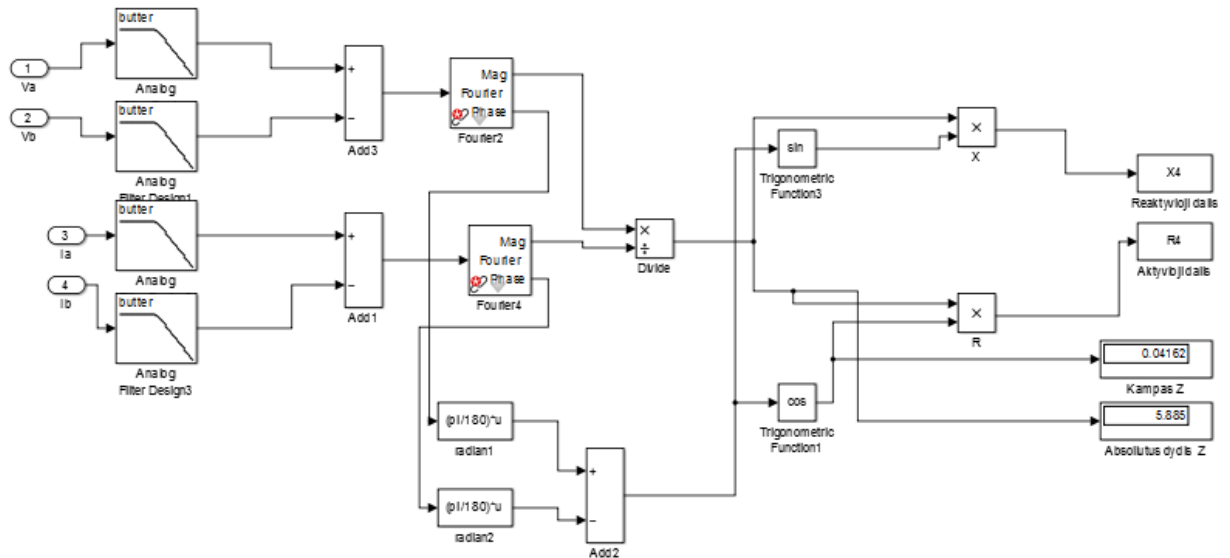
2.14 pav. Aktyvios ir reaktyvios varžos išskaičiavimo blokas

Šiame, bloke, pagrindiniai vykstantys procesai:

1. Kompleksinis jėgimo signalas konvertuojamas į absoliutųjį dydį ir fazinį kampą.
2. Naudojamas kompleksinės varžos algoritmas.
3. Konvertuojama skaičiuota kompleksinė varža iš absoliutaus dydžio ir fazinio kampo į realiąją (perdavimo linijos aktyviąją) ir menamąją (perdavimo linijos reaktyviąją) varžas.

4. Gautos realiosios ir menamosios varžos dalys, siunčiamos į „Matlab“ programos darbo langą, kad galėtų atvaizduoti kompleksinę varžą koordinacių plokštumoje.

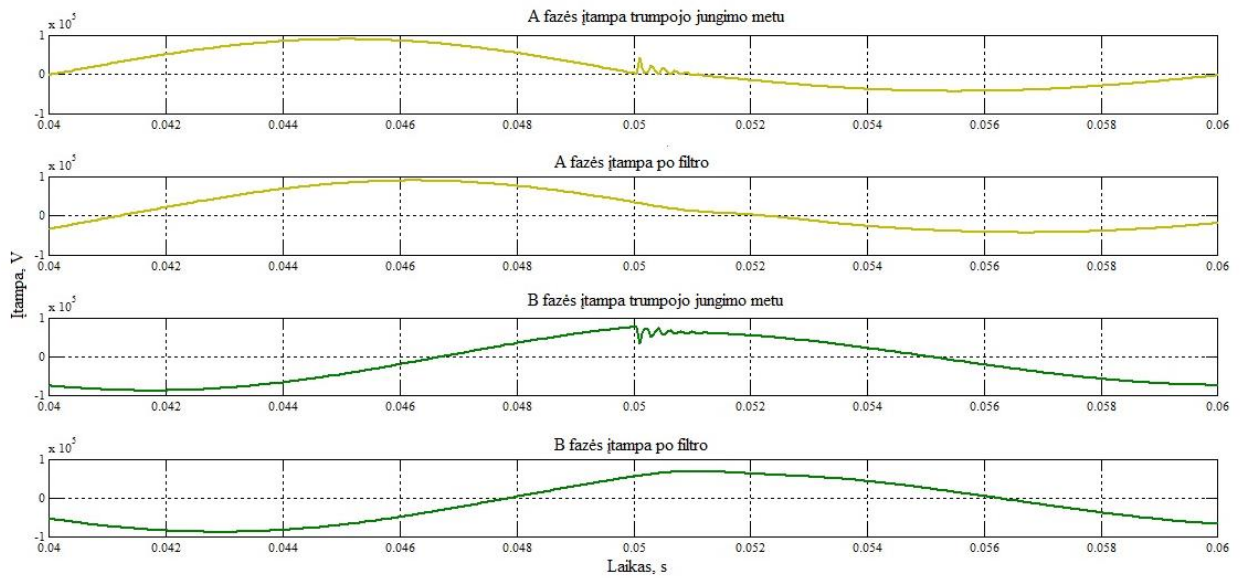
Aktyvios ir reaktyvios varžos išskaičiavimo išskleistas blokas pavaizduotas 2.15 pav.



2.15 pav. Aktyvios ir reaktyvios varžų skaičiavimo algoritmo modelis

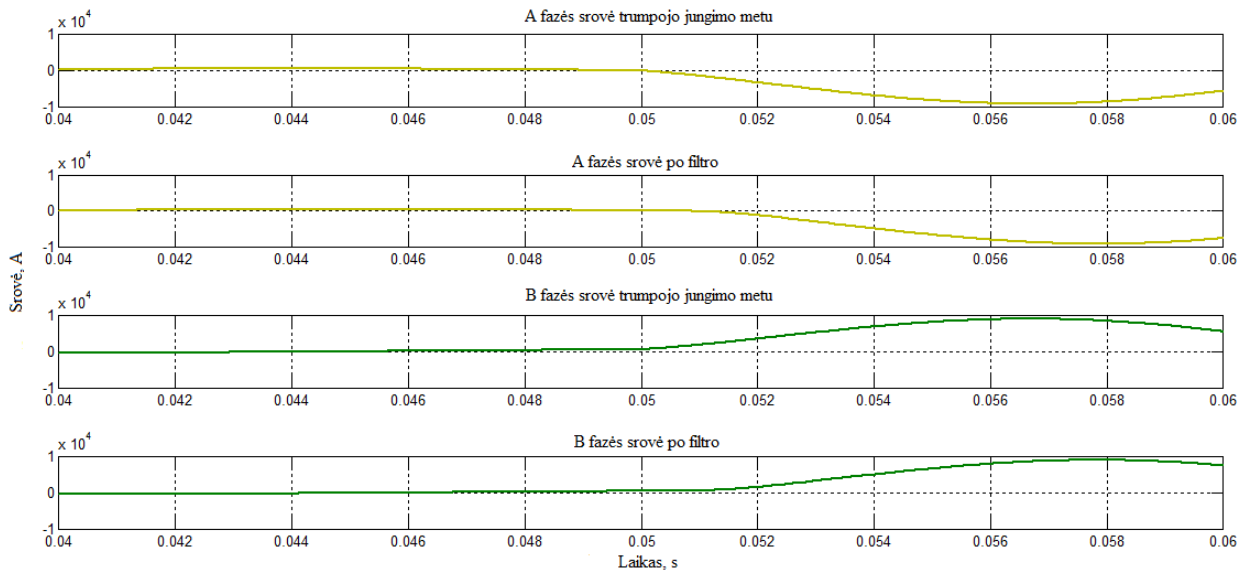
Kompleksinės varžos skaičiavimo bloke išskaičiuojama aktyvioji ir reaktyvioji varža. Pirmiausia gauti įtampos ir srovės matavimų signalai yra nufiltruojami žemųjų dažnių filtru, kadangi trumpojo jungimo metu atsiranda daug triukšmų įtampos ir srovės signaluose. Žemųjų dažnių filtras parinktas „Butterworth“ ketvirtos eilės, 360 Hz dažnio. Filtras naudojamas signalo netolygumams ir aukštų dažnių komponentių nufiltravimui. Gautos įtampos A ir B fazių signalai prieš filtrą ir po filtro pavaizduoti 2.16 pav.





2.16 pav. Įtampos A ir B fazių signalai prieš filtrą ir po filtro

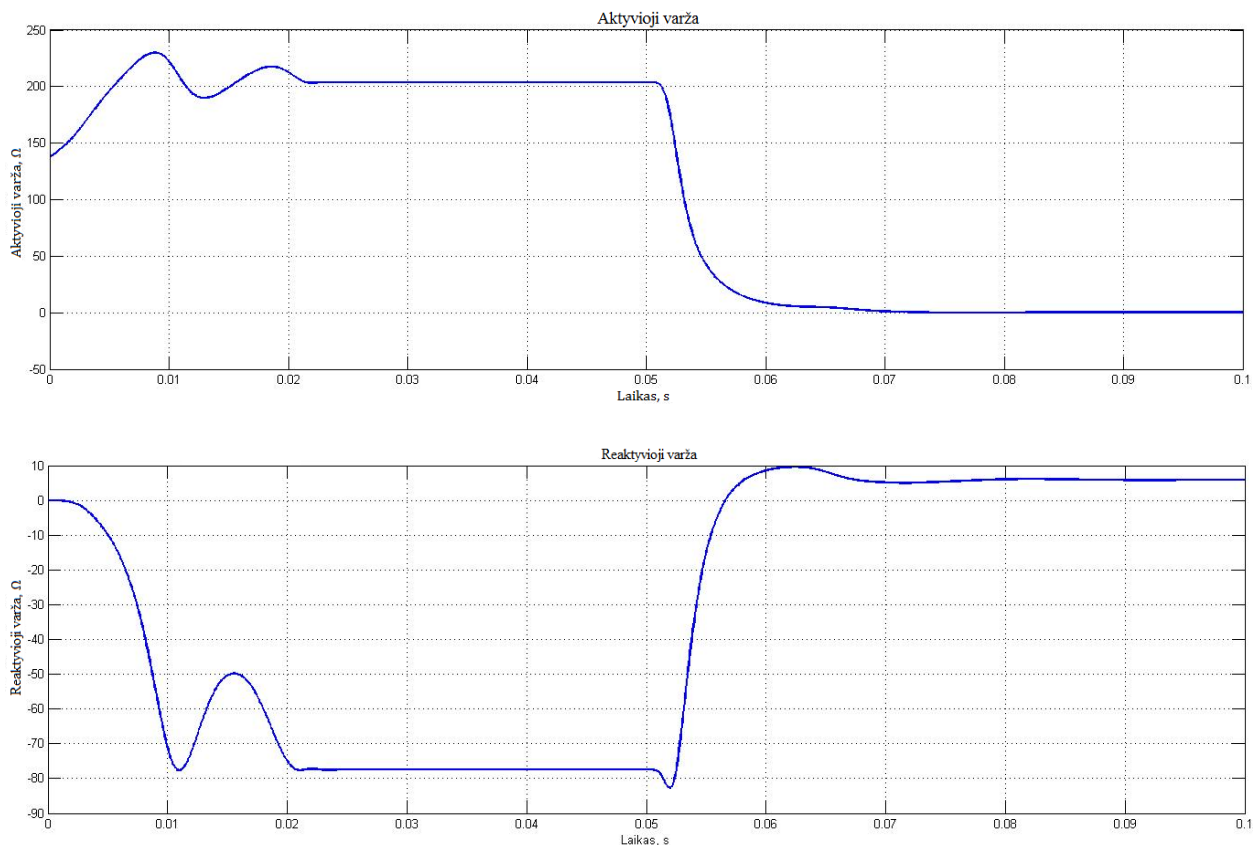
Srovės A ir B fazių signalai pavaizduoti 2.17 pav.



2.17 pav. Srovės A ir B fazių signalai prieš filtrą ir po filtro

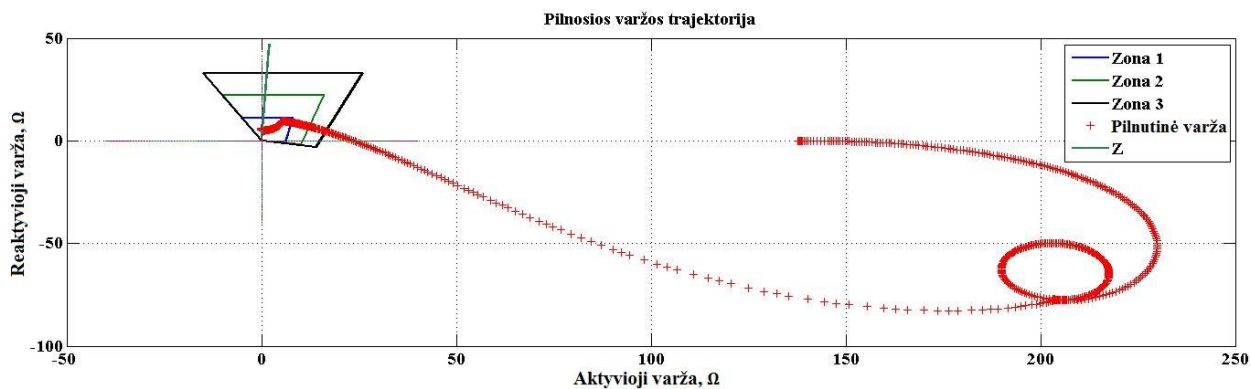
Iš nufiltruotų įtampos ir srovės signalų išskaičiuojami įtampų ir srovių skirtumai, pagal dvifazio jungimo formulę. Toliau išskaičiuoti įtampos ir srovės signalai perduodami į „Fourier“ bloką.

„Fourier“ bloke yra nufiltruojamos įtampų ir srovių aukštesniosios bei nuolatinės harmonikos. „Fourier“ blokas išskiria įtampų ir srovių absoliučiuosius dydžius bei kampus. Iš absoliučiujų dydžių imamas įtampos ir srovės santykis, tam kad būtų išskaičiuojama varža, iš gautų kampų išskaičiuojami įtampos ir srovės kampai pagal (18) formulę. Kad gauti realiąją varžą, gautas varžos dydis sudauginamas su fazių kampo kosinusu, o reaktyviajai varžai gauti, absoliutus varžos dydis dauginamas su fazių kampo sinusiu pagal (19) formulę. Gauti aktyvios ir reaktyvios varžos grafikai pavaizduoti 2.18 pav.



2.18 pav. Aktyvios ir reaktyvios varžos grafikai

Gauti aktyviosios ir reaktyviosios varžos dydžiai siunčiami į „Matlab“ programos darbo langą, kad būtų išbrėžtas pilnosios varžos grafikas, kuris pavaizduotas 2.19 pav. „Matlab“ programos algoritmas patalpintas darbo priede (5).

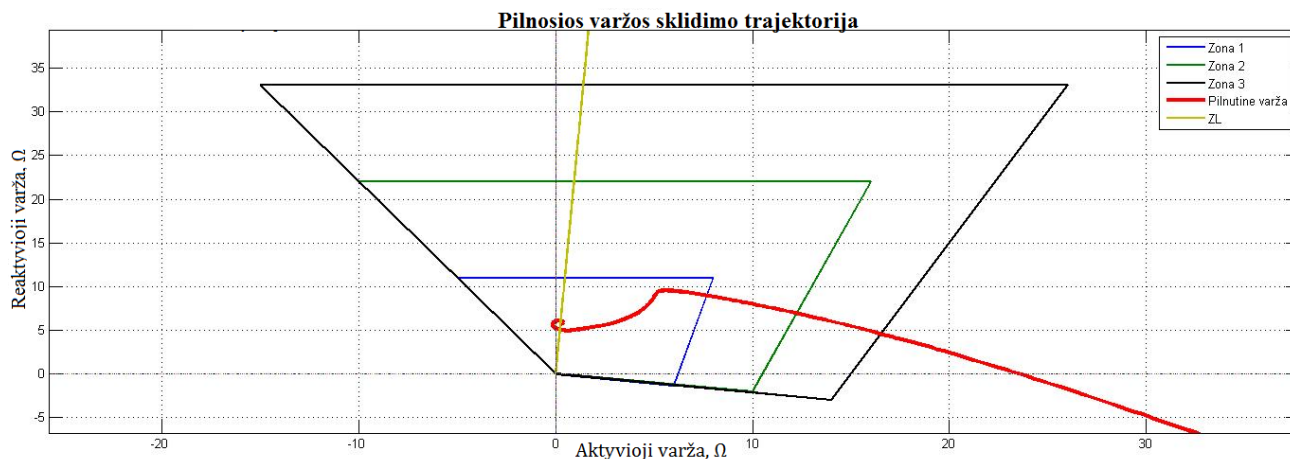


2.19 pav. Pilnosios varžos sklidimo trajektorija

Gautąją reaktyviąją varžą dvifazio trumpojo jungimo metu galima patikrinti pagal reaktyviosios varžos formulę.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0009337 \cdot 20 = 5,87 \Omega$$

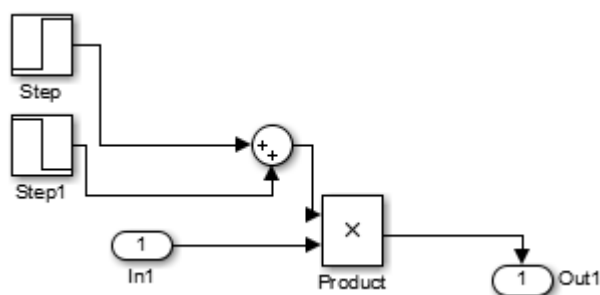
Apskaičiuotą reaktyviąją varžą galime palyginti su varža, kurią gavome simuliacijos metu. Simuliacijos metu gauta pilnutinė varža pavaizduota 2.20 pav.



2.20 pav. Pilnutinės varžos sklidimo trajektorija į pirmąją zoną

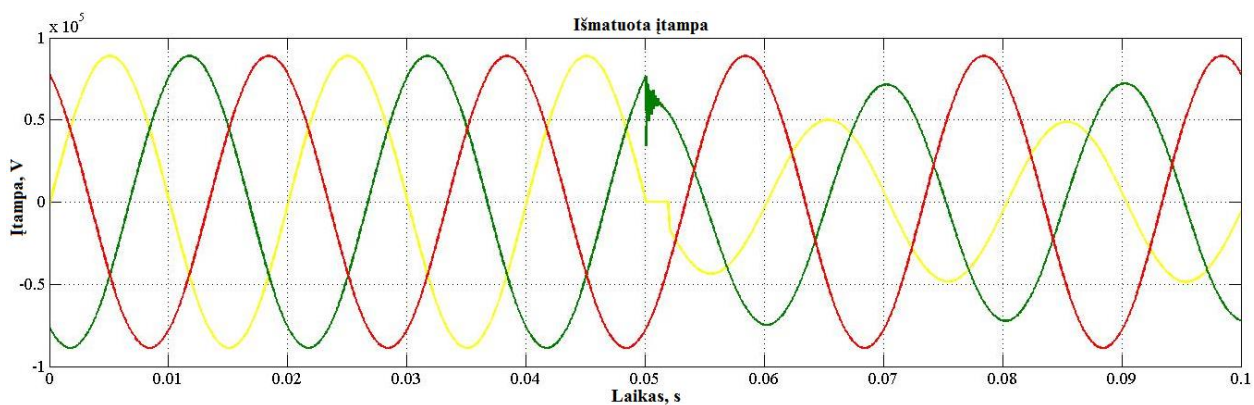
Iš apskaičiuotos reaktyviosios varžos ir gautos simuliacijos metu, galime teigti, kad distancinės apsaugos susimuliuotas modelis veikia tinkamai.

Sumodeliuotas distancinės apsaugos modelio veikimas bandomas su išmatuotų verčių protokolu. Įtampos ir srovės išmatuotų paketų praradimui buvo sumodeliuotas naujas blokas, kuris pavaizduotas 2.21 pav.

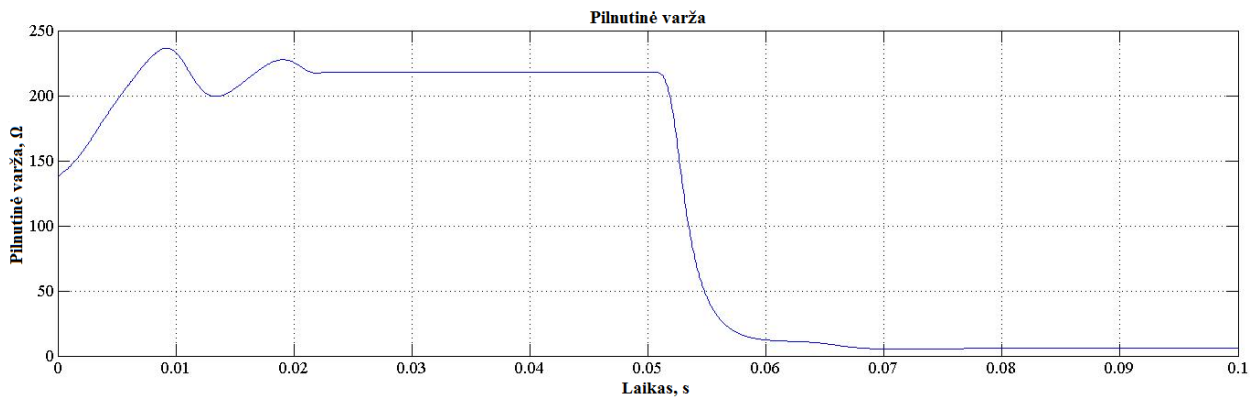


2.21 pav. Signalų praradimo blokas

Panaudojus šį bloką buvo sukeliama dirbtinis įtampos ir srovės matavimų paketų netekimas. Šiuo bandymu norima parodyti kokią įtaką turi išmatuotų verčių paketų netekimas, distancinės apsaugos suveikimui. Įtampos paketo dingimas pavaizduotas 2.22 pav. Bandymo metu buvo stebima, kaip keisis pilnosios varžos sklaidimo laikas iki distancinės apsaugos pirmosios zonos. Pilnosios varžos sklaidimo laikas surandamas iš pilnosios varžos grafiko (2.23 pav.).



2.22 pav. Įtampos dingimas A fazėje



2.23 pav. Pilnutinės varžos grafikas esant dvifaziam trumpajam jungimui ir dingus įtampos matavimui 2 ms

Bandymo metu buvo atlikti šie bandymai:

1. Įtampos matavimų dingimas, prasidedant dvifaziam trumpajam jungimui ties 0,05 s. Pasirinkti įtampos signalo dingimo laiko intervalai: 0, 2, 4, 6 ms. Gauti rezultatai pateikti 2.3.1 lentelėje.

2.3.1 lentelė. Dingę įtampos matavimai, prasidedant dvifaziam trumpajam jungimui.

Dingę įtampos matavimai	Pilnosios varžos sklidimo laikas iki 1 zonos
<b>0 ms</b>	10,57 ms
<b>2 ms</b>	10,54 ms
<b>4 ms</b>	10,40 ms
<b>6 ms</b>	9,980 ms

2. Srovės matavimų dingimas, prasidedant dvifaziam trumpajam jungimui ties 0,05 s.

Pasirinkti srovės signalo dingimo laiko intervalai: 0, 2, 4, 6 ms. Gauti rezultatai pateikti 2.3.2 lentelėje.

2.3.2 lentelė. Dingę srovės matavimai, prasidedant dvifaziam trumpajam jungimui.

Dingę srovės matavimai	Pilnosios varžos sklidimo laikas iki 1 zonos
<b>0 ms</b>	10,57 ms
<b>2 ms</b>	10,85 ms
<b>4 ms</b>	11,32 ms
<b>6 ms</b>	12,84 ms

3. Įtampos matavimų dingimas, kai įtampos matavimai dingsta, pilnutinei varžai, pasiekus distancinės apsaugos pirmosios zonos kraštą 10,55 ms laiko momentu. Pasirinkti srovės signalo dingimo laiko intervalai: 0, 2, 4, 6 ms. Gauti rezultatai pateikti 2.3.3 lentelėje.

2.3.3 lentelė. Dingę įtampos matavimai, 10,55 ms laiko momentu.

<b>Dingę įtampos matavimai</b>	<b>Pilnosios varžos sklidimo laikas iki 1 zonos</b>
<b>0 ms</b>	10,57 ms
<b>2 ms</b>	10,57 ms
<b>4 ms</b>	10,57 ms
<b>6 ms</b>	10,58 ms

4. Srovės matavimų dingimas, kai srovės matavimai dingsta, pilnutinei varžai, pasiekus distancinės apsaugos pirmosios zonos kraštą 10,55 ms laiko momentu. Pasirinkti srovės signalo dingimo laiko intervalai: 0, 2, 4, 6 ms. Gauti rezultatai pateikti 2.3.4 lentelėje.

2.3.4 lentelė. Dingę srovės matavimai, 10,55 ms laiko momentu.

<b>Dingę srovės matavimai</b>	<b>Pilnosios varžos sklidimo laikas iki 1 zonos</b>
<b>0 ms</b>	10,57 ms
<b>2 ms</b>	10,57 ms
<b>4 ms</b>	10,58 ms
<b>6 ms</b>	10,57 ms

## IŠVADOS

1. Literatūros analizėje išanalizuota išmatuotų verčių paketų struktūra ir jų veikimas. Išsiaiškinta, kad trukmės tarp išsiųstų paketų negali viršyti 3 – 4 ms. Apžvelgtos visos pagrindinės „Ethernet“ tinklų topologijos. Nustatyta, kad dubliuota topologija turi didžiausią patikimumą, tačiau yra ir brangiausia. „Ethernet“ tinklo patikimumui skaičiuoti geriausiai tinka Markovo procesai. Skaitmeninei distancinei apsaugai geriausia naudoti daugiakampę charakteristiką.
2. Laboratorijoje buvo atlikti matuotų verčių bandymai su realia įranga ir patikrinti laikai tarp siunčiamų ir gaunamų matuotų verčių paketų, esant skirtingoms tinklo komutatorių jungimo topologijoms.
3. Suvidurkinus atskirų bandymų rezultatus ir juos apdorojant iš gautų rezultatų pastebėta, kad teoriniai laikai tarp matuotų verčių paketų atitinka eksperimentiniu tyrimu ištirtus laikus. Laikas tarp matuotų verčių paketų siuntimo, kai tinklo komutatoriai dirba be sutrikimų yra 2 ms.
4. Dirbant tinklo komutatoriams normaliu režimu gauti ir laiko siuntimo nuokrypiai. Laiko nuokrypiai tarp siunčiamų paketų susidaro dėl to, kad matuotoms vertėms siųsti naudojamas kompiuteris, kuriame veikia ir kiti kompiuteriniai procesai, todėl jie stabdo išsiunčiamų matuotų verčių paketų greitį.
5. Tinklo topologijoje sukuriant sutrikimą, atjungiant „Ethernet“ liniją tarp komutatorių, matuotų verčių paketai pradedami siųsti per rezervines linijas ir komutatorius. Esant matuotų verčių sutrikimui laikai tarp paketų išauga 80  $\mu$ s. Todėl laikai tarp siunčiamų išmatuotų verčių paketų telpa į teorinius laikus. Teoriniai ribiniai laikai 3 – 4 ms.
6. Tinklo topologijų patikimumo tyrimo dalyje, buvo ištirtos trys topologijos: nuoseklioji, žiedinė ir dubliuotoji. Iš gautųjų rezultatų matome, kad didžiausią patikimumą turi dubliuotoji topologija, kurios patikimumas yra lygus 0,9999512929. Mažiausias patikimumas gautas naudojant nuosekliją topologiją 0,9998508533. Atitinkamai apskaičiuotiems patikimumams išskaičiuotos sistemos prastovos per metus. Gauta, kad didžiausia prastova yra nuosekliosios topologijos 1 valanda 18 minučių, mažiausia dubliuotosios topologijos 18 minučių, žiedinės 40 minučių per metus.
7. Sumodeliavus ir ištyrus distancinės apsaugos veikimą, gauta, kad įvykus dvifaziam trumpajam jungimui, pilnutinė varža pasiekia distancinės apsaugos suveikimo pirmąją zoną per 10,57 ms.

8. Ištirtas distancinės apsaugos veikimas, prasidedant dvifaziam trumpajam jungimui, dingstant įtampos ir srovės matuotų verčių paketams. Gauti rezultatai parodė, jog dingstant srovės matavimams, pilnutinė varža artėja į begalybę, o dingus įtampos matavimams pilnutinė varža artėja į nulį. Kadangi distancinė relė turi savidiagnostiką, dingstant atskiriems įtampos matuojamų verčių paketams, relėje tai bus tik įtampos klaida, t.y. nebus išsiųstas trumpojo jungimo signalas. Trumpojo jungimo signalas bus išsiųstas tik tuo atveju, jei kartu dings įtampos ir srovės išmatuotų verčių signalai.
9. Ištirtas distancinės apsaugos veikimas, įvykstant dvifaziam trumpajam jungimui, kada pilnutinė varža yra prie pat distancinės apsaugos pirmosios zonos 10,55 ms laiko momentu. Pastebėta, kad dingus įtampos ir srovės matuotojų verčių paketams 10,55 ms laiko momentu, pilnutinės varžos sklidimo laikas iki apsaugos zonos nepadidėja.



## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. NAVICKAS, A. Elektros energetikos sistemų patikimumas. Kauno technologijos universitetas, 2013 m., p. 7 – 88.
2. SVINKŪNAS, G., Navickas, A. Elektros energetikos pagrindai. Kauno technologijos universitetas, 2011 m., p. 161 – 163.
3. David Dolezilek, David Whitehead, and Veselin Skendzic, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Integration of IEC 61850 GSE and Sampled Value Services to Reduce Substation Wiring. Prieiga per internetą: <http://www.cce.umn.edu/documents/cpe-conferences/mipsycon-papers/2011/integrationofiec61850gseandsampledvalueservicestoreducesubstationwiring.pdf>
4. Veselin Skendzic, Ian Ender, and Greg Zweigle, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. IEC 61850-9-2 Process Bus and Its Impact on Power System Protection and Control Reliability. Prieiga per internet: [https://cdn.selinc.com//assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6275\\_Process%20Bus\\_VS\\_20070226\\_Web.pdf?v=20150812-084500](https://cdn.selinc.com//assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6275_Process%20Bus_VS_20070226_Web.pdf?v=20150812-084500)
5. S. Mohagheghi, Member, IEEE, J. Stoupis, Member, IEEE, and Z. Wang, Member, IEEE. Communication Protocols and Networks for Power Systems Current Status and Future Trends. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4840174>
6. Surya Santoso, Aristotle Arapostathis, University of Texas at Austin. Investigating Performance and Reliability of Process Bus Networks for Digital Protective Relaying. Prieiga per internetą: <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1335&context=etd>
7. Mitalkumar Kanabar, University of Western Ontario. Investigating Performance and Reliability of Process Bus Networks for Digital Protective Relaying. Prieiga per internetą: <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1335&context=etd>
8. Janne STARCK, Dr. Wolfgang WIMMER, Karol MAJER. SWITCHGEAR OPTIMIZATION USING IEC 61850-9-2. Prieiga per internetą: [http://www.cired.net/publications/cired2013/pdfs/CIRED2013\\_0225\\_final.pdf](http://www.cired.net/publications/cired2013/pdfs/CIRED2013_0225_final.pdf)
9. Mike Mekkanen, Reino Virrankoski, Mohammed Elmusrati, Erkki Antila. Department of Computer Science, Communications and Systems Engineering Group, University of Vaasa. Reliability and Availability Investigation for Next-Generation Substation Function Based on IEC 61850. Prieiga per internet: [http://lipas.uwasa.fi/~rvir/IEC61850\\_WOWCA2012.pdf](http://lipas.uwasa.fi/~rvir/IEC61850_WOWCA2012.pdf)

10. B. Yunus\*, A. Musa\*\*, H.S. Ong\*\*\*, A.R. Khalid\*\*\*\*, H. Hashim\*\*\*\*\*. Reliability and Availability Study on Substation Automation System based on IEC 61850.
11. ZHANG, YAN. AN INTEGRATIVE APPROACH TO RELIABILITY ANALYSIS OF AN IEC 61850 DIGITAL SUBSTATION. 2012.
12. Andersson, Lars, et al. "Reliability investigations for SA communication architectures based on IEC 61850". June 27-30, 2005.
13. Kasztenny, Bogdan, et al. "IEC 61850 - A Practical Application Primer for Protection Engineers". Prieiga per internetą: [http://www.gegridsolutions.com/multilin/pr/GaTech/2006/IEC61850\\_Practical\\_Application\\_Primer\\_Protection\\_Eng.pdf](http://www.gegridsolutions.com/multilin/pr/GaTech/2006/IEC61850_Practical_Application_Primer_Protection_Eng.pdf)
14. Flores, Victor Manuel, et al. "Case Study: Design and Implementation of IEC 61850 From Multiple Vendors at CFE La Venta II". 2007.
15. Mitalkumar G. Kanabar, Student Member, IEEE, Tarlochan S. Sidhu, Fellow, IEEE. Reliability and Availability Analysis of IEC 61850 Based Substation Communication Architectures. Prieiga per internetą: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5276001&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5276001&tag=1)
16. Hamze Hajian-Hoseinabadi and Mohamad Esmail Hamedani Golshan. Availability, Reliability, and Component Importance Evaluation of Various Repairable Substation Automation Systems. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6175975>
17. Veselin Skendzic, Ian Ender, and Greg Zweigle, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. IEC 61850-9-2 Process Bus and Its Impact on Power System Protection and Control Reliability. Prieiga per internet: [https://cdn.selinc.com//assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6275\\_Process%20Bus\\_VS\\_20070226\\_Web.pdf?v=20150812-084500](https://cdn.selinc.com//assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6275_Process%20Bus_VS_20070226_Web.pdf?v=20150812-084500)
18. Mitalkumar G. Kanabar, *Student Member, IEEE*, and Tarlochan S. Sidhu, *Fellow, IEEE*. Performance of IEC 61850-9-2 Process Bus and Corrective Measure for Digital Relaying. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org>
19. HAMID BENTARZI, ABDERRAHMANE OUADI, and ABDELKADER ZITOUNI. Distance Protective System Performance Enhancement Using Optimized Digital Filter.
20. Ahmed Kareem Lafta Al-Behadili, Western Michigan University. Performance Analysis of Distance Relay on Shunt/ Series Facts-Compensated Transmission Line.

21. Ikbali Ali, Mini S. Thomas, Sunil Gupta & S. M. Suhail Hussain. IEC 61850 Substation Communication Network Architecture for Efficient Energy System Automation. Prieiga per internetą: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23317000.2015.1043475>
22. Vishvadeep J.Dhawale, Vishal Dake and Prafulla A.Desale. Blocking the Distance Relay 3rd Zone Operation during Power Swings by DTLR Enhancement in MATLAB/Simulink.
23. P Lakshmi Narayana U J shenoy M Suresh. Performance Improvement of Digital Distance Relaying Scheme Based on Fuzzy Logic.
24. Kinan Wannous. THE DEVELOPMENT OF THE IMPEDANCE MEASURED BYDISTANCE RELAY.

## PRIEDAI

### Priedas 1. Nuoseklios topologijos patikimumo skaičiavimo algoritmas.

```
clc
clear all
close all

syms P0 P1 P2 P3 P4 P5 P6

l1=0.00667;
l2=0.00667;
l3=0.06;
l4=0.02;
l5=0.02;
l6=0.05;

u1=1095;
u2=1095;
u3=1095;
u4=1095;
u5=1095;
u6=1095;

eq1=-(l1+l2+l3+l4+l5+l6)*P0+u1*P1+u2*P2+u3*P3+u4*P4+u5*P5+u6*P6==0;
eq2=l1*P0-u1*P1==0;
eq3=l2*P0-u2*P2==0;
eq4=l3*P0-u3*P3==0;
eq5=l4*P0-u4*P4==0;
eq6=l5*P0-u5*P5==0;
eq7=l6*P0-u6*P6==0;
eq8=P0+P1+P2+P3+P4+P5+P6==1;

[A,B] = equationsToMatrix([eq1,eq2,eq3,eq4,eq5,eq6,eq7,eq8], [P0, P1, P2,
P3, P4,P5,P6])
X = vpa(linsolve(A,B))

a=X(1);
b=X(2);
c=X(3);
d=X(4);
e=X(5);
f=X(6);
g=X(7);

Pavail2=a
Punavai2l=b+c+d+e+f+g
```

## Priedas 2. Žiedinės topologijos patikimumo skaičiavimo algoritmas.

```
clc
clear all
close all

syms P0 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9

l1=0.00667;
l2=0.00667;
l3=0.02;
l4=0.02;
l5=0.02;
l6=0.02;
l7=0.02;
l8=0.05;

u1=1095;
u2=1095;
u3=1095;
u4=1095;
u5=1095;
u6=1095;
u7=1095;
u8=1095;

eq1=- (l1+l2+l3+l5+l7+l8) *P0+u1*P1+u2*P2+u4*P3+u5*P4+u7*P8+u8*P9==0;
eq2=l1*P0-u1*P1==0;
eq3=l2*P0-u2*P2==0;
eq4=l4*P0- (u4+l5) *P3+u5*P5==0;
eq5=l5*P0- (u5+l4) *P4+u4*P5==0;
eq6=l5*P3+l4*P4- (u5+u4+l3+l6) *P5+u3*P6+u6*P7==0;
eq7=l3*P5-u3*P6==0;
eq8=l6*P5-u6*P7==0;
eq9=l7*P0-u7*P8==0;
eq10=l8*P0-u8*P9==0;
eq11=P0+P1+P2+P3+P4+P5+P6+P7+P8+P9==1;

[A,B] = equationsToMatrix([eq1,eq2,eq3,eq4,eq5,eq6,eq7,eq8,eq9,eq10,eq11],
[P0, P1, P2, P3, P4,P5,P6,P7,P8,P9])
X = vpa(linsolve(A,B))

a1=X(1);
a2=X(2);
a3=X(3);
a4=X(4);
a5=X(5);
a6=X(6);
a7=X(7);
a8=X(8);
a9=X(9);
a10=X(10);
```

```

Pavail2=a1+a4+a5
Punavai21=a2+a3+a6+a7+a8+a9+a10
P=Pavail2+Punavai21

```

### Priedas 3. Dubliuotos topologijos patikimumo skaičiavimo algoritmas.

```

clc
clear all
close all

syms P0 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 P10 P11 P12 P13 P14 P15

l1=0.00667;
l2=0.00667;
l3=0.02;
l4=0.02;
l5=0.02;
l6=0.02;
l7=0.02;
l8=0.02;

u1=1095;
u2=1095;
u3=1095;
u4=1095;
u5=1095;
u6=1095;
u7=1095;
u8=1095;

eq1=-
(11+l2+l3+l5+l4+l6+l7+l8)*P0+u1*P1+u2*P2+u3*P3+u5*P4+u4*P5+u6*P6+u7*P14+u8*P
15==0;
eq2=11*P0-u1*P1==0;
eq3=12*P0-u2*P2==0;
eq4=13*P0-(u3+l4+l5)*P3+u5*P7+u4*P9==0;
eq5=15*P0-(u5+l3+l6)*P4+u3*P7+u6*P10==0;
eq6=14*P0-(u4+l5+l6)*P5+u6*P8+u5*P11==0;
eq7=16*P0-(u6+l4+l3)*P6+u4*P8+u3*P12==0;
eq8=15*P3+l3*P4-(u5+u3)*P7==0;
eq9=16*P5+l4*P6-(u6+u4)*P8==0;
eq10=14*P3-(u4+l5)*P9+u5*P13==0;
eq11=16*P4-(u6+l3)*P10+u3*P13==0;
eq12=15*P5-(u5+l6)*P11+u6*P13==0;
eq13=13*P6-(u3+l4)*P12+u4*P13==0;
eq14=15*P9+l3*P10+l6*P11+l4*P12-(u5+u3+u6+u4)*P13==0;
eq15=17*P0-u7*P14==0;
eq16=18*P0-u8*P15==0;
eq17=P0+P1+P2+P3+P4+P5+P6+P7+P8+P9+P10+P11+P12+P13+P14+P15==1;

```

```
[A,B] =  
equationsToMatrix([eq1,eq2,eq3,eq4,eq5,eq6,eq7,eq8,eq9,eq10,eq11,eq12,eq13,e  
q14,eq15,eq16,eq17],[P0, P1, P2, P3,  
P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11,P12,P13,P14,P15])  
X = vpa(linsolve(A,B))
```

```
a1=X(1);  
a2=X(2);  
a3=X(3);  
a4=X(4);  
a5=X(5);  
a6=X(6);  
a7=X(7);  
a8=X(8);  
a9=X(9);  
a10=X(10);  
a11=X(11);  
a12=X(12);  
a13=X(13);  
a14=X(14);  
a15=X(15);  
a16=X(16);
```

```
Pavail2=a1+a4+a5+a6+a7+a10+a11+a12+a13  
Punavai21=a2+a3+a8+a9+a14+a15+a16  
P=Pavail2+Punavai21
```

Priedas 4. Dubliuotos topologijos intensyvumų matrica.

$$A = \begin{bmatrix} -(\lambda_{MU} + \lambda_{IED} + \lambda_{ESW1} + \lambda_{ESW3} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW4} + \lambda_S + \lambda_{HMI}) & \lambda_{MU} & \lambda_{IED} & \lambda_{ESW1} & \lambda_{ESW3} & \lambda_{ESW2} & \lambda_{ESW4} & 0 & \dots \\ \mu_{MU} & -\mu_{MU} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_{IED} & 0 & -\mu_{IED} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_{ESW1} & 0 & 0 & -(\mu_{ESW1} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW3}) & 0 & 0 & 0 & \lambda_{ESW3} & \dots \\ \mu_{ESW3} & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{ESW3} + \lambda_{ESW1} + \lambda_{ESW4}) & 0 & 0 & \lambda_{ESW1} & \dots \\ \mu_{ESW2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{ESW2} + \lambda_{ESW3} + \lambda_{ESW4}) & 0 & 0 & \dots \\ \mu_{ESW4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{ESW4} + \lambda_{ESW2} + \lambda_{ESW1}) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW3} & \mu_{ESW1} & 0 & 0 & -(\mu_{ESW3} + \mu_{ESW1}) & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW4} & \mu_{ESW2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW4} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW3} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{ESW1} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \mu_{HMI} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_S & \lambda_{HMI} \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & \lambda_{ESW2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & \lambda_{ESW4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \lambda_{ESW4} & 0 & 0 & \lambda_{ESW3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \lambda_{ESW2} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{ESW1} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & -(\mu_{ESW4} + \mu_{ESW2}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & 0 & -(\mu_{ESW2} + \lambda_{ESW3}) & 0 & 0 & 0 & \lambda_{ESW3} & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & -(\mu_{ESW4} + \lambda_{ESW1}) & 0 & 0 & \lambda_{ESW1} & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{ESW3} + \lambda_{ESW4}) & 0 & \lambda_{ESW4} & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{ESW1} + \lambda_{ESW2}) & \lambda_{ESW2} & 0 & 0 \\ \dots & 0 & \mu_{ESW3} & \mu_{ESW1} & \mu_{ESW4} & \mu_{ESW2} & -(\mu_{ESW1} + \mu_{ESW2} + \mu_{ESW3} + \mu_{ESW4}) & 0 & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_S & 0 \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{HMI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ P_{14} \\ P_{15} \end{bmatrix}$$



## Priedas 5. Distancinės apsaugos pilnutinės varžos skaičiavimas.

```
% Koordinaciu plokstuma
p=0;
q=-40:0.1:40;
r=-40:0.1:40;
s=0;
%%%%%%%%%%%%%% Linijos parametrai
f = 50;
R1 = 0.0125531917;
L1 = 0.0009337;
%Linijos pilnoji varža
t=0:0.01:2;
%u=t*(b/a);
u=23.46*t;

% 1 zona
x=[-5 0 6 8 -5];
y=[11 0 -1.3 11 11];
% 2 zona
x1=[-10 0 10 16 -10];
y1=[22 0 -2 22 22];
% 3 zona
x2=[-15 0 14 26 -15];
y2=[33 0 -3 33 33];

figure (1)
plot(x,y,x1,y1,x2,y2,'k',R4,X4,'r',t,u,p,q,r,s);
axis([-30 40 -10 40]);
title ('Pilnosios varžos trajektorija');
xlabel('Aktyvioji varža (R)');
ylabel('Reaktyvioji varža (X)');
legend('Zona 1', 'Zona 2', 'Zona 3', 'Pilnutin? varža','ZL');

figure (2)
plot(time,X4)
title ('Reaktyvioji varža');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Reaktyvioji varža ');

figure (3)
plot (time,R4)
title ('Aktyvioji varža');
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Aktyvioji varža');

figure (4)
plot(gr)
title ('Matuota ?tampa')
xlabel('Laikas, s');
ylabel('?tampa, V');
grid on;

figure (5)
```

```

plot(sr)
title ('Matuota srov?')
xlabel('Laikas, s');
ylabel('Srove, A');
grid on;

figure (6)
subplot (4,1,1)
plot (v1)
axis([0.04,0.06,-1e5,1e5])
subplot (4,1,2)
plot (vf)
axis([0.04,0.06,-1e5,1e5])
subplot (4,1,3)
plot (v)
axis([0.04,0.06,-1e5,1e5])
subplot (4,1,4)
plot (v2)
axis([0.04,0.06,-1e5,1e5])

figure (7)
subplot (4,1,1)
plot (a1)
axis([0.04,0.06,-1e4,1e4])
subplot (4,1,2)
plot (af)
axis([0.04,0.06,-1e4,1e4])
subplot (4,1,3)
plot (a3)
axis([0.04,0.06,-1e4,1e4])
subplot (4,1,4)
plot (a2)
axis([0.04,0.06,-1e4,1e4])
%}
ZZ= R4+X4*i;
ZZZ=abs(ZZ);
figure (10)
plot (time,ZZZ)
title ('Pilnutin? varža')
xlabel('Laikas (s)');
ylabel('Pilnutin? varža (Z)');
grid on;

```

Priedas 5. SV žinutės struktūra.

