

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

GINTVILĖ ŠIMKONIENĖ

ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO
PATIKIMUMO MODELIŲ PRITAIKOMUMO
TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija (T 006)

2023, Kaunas

Disertacija rengta 2012–2022 metais Kauno technologijos universiteto Elektros ir elektronikos fakultete, Elektros energetikos sistemų katedroje.

Mokslinis vadovas:

doc. dr. Audrius JONAITIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija, T 006).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Aurelija Gražina Rukšaitė (leidykla „Technologija“)

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	5
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	6
SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS	9
TERMINAI	11
IVADAS.....	14
1. ELEKTROS SISTEMŲ PATIKIMUMO VERTINIMAS.....	18
1.1. Elektros skirstomojo tinklo struktūra, funkcijos, valdymas ir kontrolė.....	18
1.1.1. Vartotojų kategorijos ir patikimumo lygiai	20
1.2. Patikimumo sąvokos samprata ir reikšmė elektros energijos tiekimui.....	21
1.3. Elektros tiekimo nutrūkimų ir gedimų analizė	23
1.3.1. Gedimų dažnis ir intensyvumas.....	27
1.4. Elektros skirstomojo tinklo patikimumo rodiklių analizė.....	30
1.5. Elektros skirstomojo tinklo patikimumą vertinantys metodai	34
1.5.1. Pasiskirstymo dėsniai	36
1.5.2. Analitinių ir statistinių metodų elektros skirstomojo tinklo patikimumui vertinti apžvalga	38
1.5.3. Metodų privalumų ir trūkumų analizė: svarbiausi kriterijai ir jų taikymas tyrimuose	39
1.6. Pirmo skyriaus apibendrinimas	48
1.7. Autorės indėlis į nagrinėjamąją problematiką	49
2. ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO PATIKIMUMO TYRIMO METODIKA	51
2.1. Tyrimų metodikos sudarymas	51
2.2. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo patikimumo lygiai ir reguliavimas	52
2.3. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo gedimų analizė: statistinė duomenų analizė ir patikimumo vertinimas	53
2.4. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimas	61
2.5. Elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimas.....	68
2.5.1. Veikimo ir atkūrimo laiko įtaka elektros skirstomojo tinklo patikimumui ...	70
2.5.2. Maksimalaus srauto metodas patikimumui vertinti	74
2.5.3. Monte Karlo metodo pritaikomumas vertinant elektros tinklo patikimumą..	76
2.5.4. Žaidimų teorijos metodas patikimumo vertinimo kontekste	78
2.5.5. Elektros tinklo modernizavimo priemonių techninis įvertinimas	84
2.6. Metodinės dalies išvados ir apibendrinimas	87
3. ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO PATIKIMUMO TECHNINIŲ SPRENDIMŲ OPTIMIZAVIMAS.....	89
3.1. Elektros skirstomojo tinklo patikimumo įvertinimas naudojant lyginamąją analizę.....	89
3.2. Elektros energijos tiekimo patikimumo užtikrinimo analizė taikant skirtingus scenarijus	95
3.3. Elektros skirstomojo tinklo tiekimo patikimumo didinimo scenarijai.....	100

3.4. Žaidimų teorijos taikymo rezultatai taikant žaidimų teorijos metodą	109
3.5. Skyriaus apibendrinimas	115
IŠVADOS	117
LITERATŪROS SĄRAŠAS	118
PRIEDAI	128
CURRICULUM VITAE	151
STRAIPSNIŲ IR MOKSLINIŲ KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS.....	153
PADĖKA	155

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Elektros energijos persiuntimo patikimumo rodiklių vykdymas.....	20
1.2 lentelė. Pagrindiniai patikimumą apibrėžiantys rodikliai.....	22
1.3 lentelė. ES šalių reglamentuotų ilgalaikių ir trumpalaikių nutraukimų vertinimas	24
1.4 lentelė. Atskiro elektros energijos vartotojo neplanuoto ilgo nutraukimo trukmei taikomi normatyvai ir kompensacijos.....	25
1.5 lentelė. ES šalių neplanuotų nutraukimų reguliavimo sistemos požymiai ES šalyse	26
1.6 lentelė. Pagrindiniai patikimumą vertinantys rodikliai	31
1.7 lentelė. Papildomų patikimumo rodiklių formulės.....	33
1.8 lentelė. Apkrovos mazgo ir sistemos lygių patikimumo skaičiavimo rodikliai	33
1.9 lentelė. Pasiskirstymo dėsnų analizė.....	37
1.10 lentelė. Analitinio ir statistinio metodų palyginimas	38
1.11 lentelė. Analitiniai kiekybiniai ir kokybiniai patikimumą vertinantys metodai..	39
1.12 lentelė. Statistiniai kiekybiniai patikimumo skaičiavimo ir vertinimo metodai..	42
1.13 lentelė. Skaitmeniniai kiekybiniai ir kokybiniai patikimumo skaičiavimo ir vertinimo metodai.....	44
2.1 lentelė. Vartotojų elektros energijos suvartojimas pagal metus.....	54
2.2. lentelė. Oro ir kabelinių linijų tipai ir jų pralaidumas	56
2.3 lentelė. Papildomų patikimumo rodiklių analizė 2012–2018 m.	62
2.4 lentelė. Gedimų intensyvumo dydžiai ir atkūrimo laikas.....	64
2.5 lentelė. Gedimų šalinimo laikas	74
3.1 lentelė. Analizuojamo tinklo vartotojų grupės ir vartotojų mazgai.....	91
3.2 lentelė. Vartotojų grupių elektros tiekimo patikimumo rodikliai.....	93
3.3 lentelė. Charakteringi vartotojų grupių mazgai.....	100
3.4 lentelė. A grupės vartotojų mazgų: 128, 164 ir 132 patikimumo rodikliai	101
3.5 lentelė. B grupės vartotojų mazgų 61 ir 75 patikimumo rodikliai	103
3.6 lentelė. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų patikimumo rodikliai.....	105
3.7 lentelė. G grupės mazgo 215 patikimumo rodikliai	108
3.8 lentelė. STO ir elektros vartotojų vertinimo sritys.....	109
3.9 lentelė. Tikimybinės tinklo būsenos.....	110
3.10 lentelė. Žaidimų teorijos metodo taikymas skirtingų jungimo tipų EST	111
3.11 lentelė. Atjungimų, perjungimų ir atkūrimo preliminaros kainos, Eur	112
3.12 lentelė. Elektros energijos nutraukimo, atkūrimo laiko vertinimas taikant žaidimų teorijos metodo 1 scenarijų.....	113
3.13 lentelė. Elektros energijos nutraukimo, atkūrimo laiko vertinimas taikant žaidimų teorijos metodo 2 scenarijų.....	114
3.14 lentelė. Elektros energijos nutraukimo, atkūrimo laiko vertinimas taikant žaidimų teorijos metodo 3 scenarijų.....	115

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav.	Elektros energetikos sistemos hierarchinė struktūrinė schema	18
1.2 pav.	Patikimumo sudedamosios dalys	22
1.3 pav.	Patikimumo vertinimas pagal objekto ir eksploatacijos sąlygas	23
1.4 pav.	Elektros energijos nutraukimų klasifikacija	24
1.5 pav.	Gedimų intensyvumo ir tarnavimo laiko priklausomybės grafikas	28
1.6 pav.	„Vonios“ tipo gedimų intensyvumo kitimo kreivė	29
1.7 pav.	Papildomų patikimumo rodiklių skirstymas	32
1.8 pav.	Patikimumą vertinančių metodų sisteminė analizė	35
1.9 pav.	Pagrindiniai patikimumą vertinantys kriterijai	36
1.10 pav.	Tikimybių pasiskirstymas vertinant EST patikimumą	36
1.11 pav.	Dažnio pasiskirstymas vertinant EST patikimumą	37
2.1 pav.	Tyrimų metodikos schema EST patikimumui vertinti	52
2.2 pav.	Naujų elektros vartotojų prijungimas prie elektros skirstomojo tinklo	54
2.3 pav.	Elektros skirstomojo tinklo dalis	55
2.4 pav.	Oro ir kabelinių linijų tipai Lietuvos elektros skirstomajame tinkle	56
2.5 pav.	Lietuvos elektros skirstomajame tinkle (0,4–10 kV) įvykusių gedimų pasiskirstymas	57
2.6 pav.	Lietuvos elektros skirstomojo tinklo gedimų ir nutrūkimų priežastys	58
2.7 pav.	Gedimų skaičiaus pasiskirstymas EST per 2012–2018 m.	58
2.8 pav.	Gedimų skaičius EST skirstymo sistemos įrenginiuose per 2012–2018 m., vnt.	59
2.9 pav.	Bendras oro ir kabelinių linijų gedimų skaičius	59
2.10 pav.	Elektros tinklo gedimų ir veikimo, patikimumo vertinimo algoritmas	60
2.11 pav.	Lietuvos EST SAIDI rodiklio palyginimas	63
2.12 pav.	Tinklo nutrūkimų trukmės ir ilgio pasiskirstymas	63
2.13 pav.	Gedimų intensyvumo pasiskirstymas pagal EST linijų ilgį	64
2.14 pav.	Gedimų intensyvumo pasiskirstymas	65
2.15 pav.	Analizuojamo tinklo SAIDI rodiklių palyginimas	65
2.16 pav.	(a) gedimų intensyvumo pasiskirstymas atitinkamai pagal linijų ilgį, (b) gedimų intensyvumo pasiskirstymas elektros tinklo apkrovos mazguose	66
2.17 pav.	Neplanuoti SAIDI rodikliai, įskaitant išimtinius įvykius (min. / vartotojui)	66
2.18 pav.	Elektros tiekimo tikimybinių rodiklių skaičiavimo algoritmas	68
2.19 pav.	Monte Karlo metodo paklaidos (a) –SAIDI, (b) – SAIFI, (c) – nepatiekta energija viso tinklo vartotojams ir skaičiavimo trukmė (d)	69
2.20 pav.	Atjungimų būsenų modeliai su taisomu įrenginiu	71
2.21 pav.	Gedimo šalinimo ir atkūrimo laiko procesas EST	73
2.22 pav.	Grafo su keletu šaltinių ir imtuvų pakeitimas grafu su vienu virtualiu šaltiniu ir vienu virtualiu imtuvu (a), elektros tinklo schema (b) ir ją atitinkantis grafas (c)	76
2.23 pav.	Žaidimų teorijos metodo taikymo algoritmas	81

2.24 pav. 1-oji analizuojama schema taikant žaidimų teorijos skaičiavimo metodiką	82
2.25 pav. 2-oji analizuojama schema taikant žaidimų teorijos skaičiavimo metodiką	82
2.26 pav. 3-ioji analizuojama schema taikant žaidimų teorijos skaičiavimo metodiką	83
2.27 pav. Elektros tiekimo ir nutrūkimo kainos	85
2.28 pav. Išlaidų palyginimas su elektros sistemos patikimumu	85
2.29 pav. Nutraukimo laiko ir kainos priklausomybė	87
3.1 pav. Analizuojamasis elektros tinklo grafo medis	90
3.2 pav. Elektros tinklo schema su pažymėtomis iš skirtingų pastočių maitinamomis linijomis	92
3.3 pav. Tikėtinas vartotojų atjungimo dažnis, kartais per metus	93
3.4 pav. Tikėtinas atjungimo laikas kiekvienam vartotojui, val.....	94
4.5 pav. Tikėtina nepatiekta energija kiekvienam vartotojui, kWh per metus	94
3.6 pav. Vartotojų atjungimo dažnio sumažėjimas, priklausomai nuo kabeliuojamos linijos ilgio	96
3.7 pav. Vartotojų atjungimo dažnio pokytis (a) ir vartotojų atjungimo trukmės pokytis (b), pakeitus oro linijas kabelinėmis	96
3.8 pav. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, pakeitus oro linijas kabelinėmis	97
3.9 pav. Vartotojų atjungimo dažnio pokytis (a) ir atjungimo trukmės pokytis (b), įrengus nuotoliniu būdu valdomus linijų skyriklius	97
3.10 pav. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, įrengus nuotoliniu būdu valdomus linijų skyriklius	98
3.11 pav. Vartotojų atjungimo dažnio pokytis (a) ir vartotojų atjungimo trukmės pokytis (b), įrengus oro linijų jungtuvus	99
3.12 pav. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, įrengus oro linijų jungtuvus	99
3.13 pav. A grupės vartotojų 128, 132, 164 mazgų elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui	101
3.14 pav. A grupės vartotojų 128, 132, 164 mazgų elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui	102
3.15 pav. A grupės vartotojų 128, 132, 164 mazgų elementų pakeitimo įtaka nepateiktai galiai.....	102
3.16 pav. B grupės vartotojų 75 ir 61 mazgų elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui	103
3.17 pav. B grupės vartotojų 61 ir 75 mazgų elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui	104
3.18 pav. B grupės vartotojų 61 ir 75 mazgų elementų pakeitimo įtaka nepateiktai galiai	104
3.19 pav. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui	106

3.20 pav. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui	106
3.21 pav. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų elementų pakeitimo įtaka nepatiekta galiai.....	107
3.22 pav. G grupės vartotojų 215 mazgo elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui	108
3.23 pav. G grupės vartotojų 215 mazgo elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui.	108
3.24 pav. G grupės vartotojams 215 mazgo nepatiekta galia.....	109
3.25 pav. Gedimų intensyvumo tikimybinis pasiskirstymas skirtingose elektros schemose	112
3.26 pav. Žaidimo strategijos vertė taikant 1-ąjį scenarijų	113
3.27 pav. Žaidimo strategijos vertė taikant 2-ą scenarijų.....	114

SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS

ACER – (angl. *Agency of the Cooperation of Energy Regulators*) Energetikos reguliavimo institucijų bendradarbiavimo agentūra;

AENS – (angl. *Average Energy not Supplied*) vidutinė nepatiekta energija;

AIT – (angl. *Average Interruption Time*) vidutinis nutraukimo laikas;

ASAI – (angl. *Average Service Availability Index*) vidutinis patikimumo (nepatikimo) elektros tiekimo rodiklis (tikimybė);

ASUI – (angl. *Average Service Unavailability Index*) vidutinis paslaugų netiekimo rodiklis;

CAIDI – (angl. *Customer Average Interruption Duration Index*) vidutinės nutraukimo trukmės vartotojams rodiklis;

CAIFI – (angl. *Customer Average Interruption Frequency Index*) – vidutinis elektros tiekimo nutraukimo vartotojams dažnio rodiklis;

CEER – (angl. *Council of European Energy Regulators*) Europos energetikos reguliuotojų taryba;

EEĮ – Elektros energetikos įstatymas;

EK – Europos komisija;

EM – (angl. *Electricity Market*) Elektros energijos rinka;

END – (angl. *Energy not Delivered*) nepatiekta elektros energija;

ENS – (angl. *Energy not Supplied*) vidutinis nepateiktos elektros energijos kiekis;

ES – Europos Sąjunga;

ESO – energijos skirstymo operatorius;

EST – elektros skirstomasis tinklas;

FCA – (angl. *Fault Consequence Analysis*) gedimų pasekmių įvertinimo metodas;

FMEA – (angl. *Failure Mode and Effect Analysis*) gedimų režimų ir poveikio analizė;

FTA – (angl. *Fault Tree Analysis*) gedimų medžio analizė;

HL – hierarchinis lygis;

KL – kabelių linija;

LEES – Lietuvos elektros energetikos sistema;

LOE_{si} – vidutiniai energijos nuostoliai per metus (kWh / m.);

LOLE – (angl. *Loss of Load Expectation*) apkrovos nuostoliai;

LOLP – (angl. *Loss of Load Probability*) apkrovos praradimo tikimybė;

MAIFET_x – (angl. *Momentary Average Interruption Frequency Exceeding Threshold*) trumpalaikis vidutinis nutraukimų dažnis, viršijantis nustatytą ribą;

MAIFI – (angl. *Momentary Average Interruption Frequency Index*) momentinis vidutinis neplanuotų ilgalaikių nutraukimų dažnio rodiklis;

MAIFI_E – (angl. *Momentary Event Average Interruption Frequency Index*) trumpalaikis vidutinis trumpų nutraukimų dažnio rodiklis;

MCA – (angl. *Multi-Criteria Analysis*) daugiakriterinė analizė, vertinimas;

MST – (angl. *Minimum Spanning Tree*) minimaliųjų kelių išdėstymo metodas;

MTTF – (angl. *Mean Time to Fault*) statistinis rodiklis, apibūdinantis veikimo laiką tarp dviejų gedimų;

MTTR – (angl. *Mean Time to Repair*) – statistinis veiklos rodiklis, vidutinis atkūrimo laikas;

NRAS – (angl. *National Regulatory Authorities*) nacionalinės reguliavimo institucijos;

OL – oro linija;

RAM – (angl. *Reliability, Availability, Maintainability*) – patikimumas, prieinamumas, priežiūra;

RBD – (angl. *Reliability Block Diagram*) patikimumo blokinė diagrama paremtas grafinis metodas;

RCA – (angl. *Root Cause Analysis*) pagrindinių priežasčių analizės metodas;

SAIDI – (angl. *System Average Interruption Duration Index*) sistemos vidutinis nutraukimų trukmės rodiklis;

SAIFI – (angl. *System Average Interruption Frequency Index*) sistemos vidutinis nutraukimų dažnio rodiklis;

STO – elektros skirstomųjų tinklų operatorius;

t – momentinė laiko vertė;

T – periodinė laiko vertė;

VERT – Valstybinė energetikos reguliavimo taryba;

VKEKK – Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija.

TERMINAI

0,4–10 kV įtampos elektros tinklai – 0,4–10 kV įtampos oro bei oro kabelių linijos, 6–10 / 0,4 kV įtampos transformatorinės, 10 kV įtampos skirstomųjų punktų 0,4 kV elektros įrenginiai, 10 kV įtampos elektros oro linijų sekcijiniai jungtuvai (sekcijiniai galios skyrikliai).

Avarija – visiškas arba laikinas energetikos sistemos normalaus energijos tiekimo sutrikimas (Terminų bankas).

Apkrovos mazgas – elektros tinklo arba grandinės mazgas, prie kurio prijungta apkrova (Terminų bankas).

Buitinis vartotojas – fizinis asmuo, perkantis elektros energiją asmeniniams, šeimos ar namų ūkio poreikiams, nesusijusiems su verslu ar profesija, tenkinti (Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymo (EEĮ) pakeitimo įstatymas. 2004 m. liepos 1 d. Nr. IX-2307).

Defektas – (angl. *fault*) objekto gebėjimo atlikti reikalaujamą funkciją pertrūkis (Terminų Bankas).

Elektros energetikos sistema – tarpusavyje suderintu režimu funkcionuojanti elektros įrenginių, skirtų elektros energijai gaminti, perduoti ir skirstyti, visuma.

Elektros energija – gaminama aktyvinė elektros energija, kuri kaip prekė pateikiama vartotojui (LR elektros energetikos įstatymo pakeitimo įstatymas. Nr. IX-2307).

Elektros energijos persiuntimo atkūrimo laikas – laikas, per kurį vartotojui buvo atkurtas elektros energijos persiuntimas po nutraukimo (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija).

Elektros tiekimo nutraukimas – trumpalaikis arba ilgalaikis elektros perdavimo linijos srovės nutraukimas.

Elektros tinklo avarija – visuma sutrikimų, dėl kurių neplanuotai nutrūksta vartotojų aprūpinimas elektros energija arba kurie kelia grėsmę nenutrūkstamam elektros skirstomųjų tinklų darbui (elektros tinklo avarija) (LR energetikos ministro įsakymas Nr. 1–116).

Gedimas – (angl. *failure*) įvykis, dėl kurio objektas iš dalies arba visiškai netenka darbingumo. Įrenginio savybių praradimas, dėl kurio įrenginys negali atlikti savo funkcijų (Terminų bankas).

Ilgas nutraukimas – nutraukimas, kurio trukmė lygi 3 minutėms arba ilgesnė kaip 3 minutės.

Kokybės rodiklis – paslaugų kokybės reikalavimo matavimo parametras (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2009).

Mazgas – trijų arba daugiau šakų sujungimo vieta (apkrovos vieta, elektros linijų atsišakojimai).

Minimalus kokybės lygis – operatoriams bei nepriklausomiems ir visuomeniniams elektros energijos tiekėjams reikalaujamas užtikrinti jų paslaugos kokybės lygis (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2009).

Neplanuotas nutraukimas – nutraukimas, apie kurį vartotojas nebuvo informuotas arba buvo informuotas vėliau nei teisės aktuose ar sutartyje nustatytu laiku, išskyrus atvejus, kai tai buvo padaryta siekiant užtikrinti visuomenės interesus.

Nutraukimo pabaiga – nutraukimo pabaigos laiko momentas, užfiksuotas automatinio arba rankiniu būdu (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2009).

Nutraukimo pradžia – nutraukimo pradžios laiko momentas, užfiksuotas automatinio arba rankiniu būdu (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2009).

Nutraukimo trukmė – laikas nuo nutraukimo pradžios iki nutraukimo pabaigos (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2009).

Nutrūkimas – gedimas (angl. *failure*), dėl kurio objektas iš dalies arba visiškai netenka darbingumo ir kuris turi įtakos elektros sistemos patikimumui.

Operatorius – perdavimo arba skirstymo tinklų operatorius (Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas. 2000 m. liepos 20 d. Nr. VIII-1881).

Papildomos paslaugos – paslaugos, kurios reikalingos nustatytų ribų įtampai ir dažniui palaikyti, turėti reikiamą galios ir energetinių išteklių rezervą nustatytam elektros energijos tiekimo kokybės ir patikimumo laipsniui užtikrinti (Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas. 2000 m. liepos 20 d. Nr. VIII-1881).

Patikimumas – tikimybinis, bendrinis visos sistemos kokybės ir saugumo rodiklis, nutraukimų ir nesklandumų charakteristika per ilgesnį laikotarpį.

Planuotas nutraukimas – nutraukimas, apie kurį vartotojas buvo informuotas teisės aktuose arba sutartyje nustatytu laiku ir būdu (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2009).

Remontas – visų įtampų elektros tinklų statybos darbų rūšis, kai visiškai arba iš dalies atkuriami oro bei oro kabelių linijų transformatorinių techninė būklė arba gerinamos jų naudojimo sąlygos. Remontai skirstomi į kapitalinį ir paprastąjį.

Skirstymas – vartotojų aprūpinimas elektros energija (elektros energijos persiuntimas) skirstymo tinklais (Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas. 2000 m. liepos 20 d. Nr. VIII-1881).

Skirstymo tinklų operatorius – juridinis asmuo, valdantis skirstymo tinklus savo aptarnaujamoje teritorijoje (Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas. 2000 m. liepos 20 d. Nr. VIII-1881).

Skirstomųjų tinklų operatorius – juridinis asmuo, nuosavybės ar kita teise valdantis, eksploatuojantis, prižiūrintis ir plėtojantis skirstomuosius tinklus, esančius jo veiklos licencijoje nurodytoje teritorijoje, pagal skirstomųjų tinklų naudotojų poreikius.

Šaka – yra elektros grandinės dalis (elektros linijos), kuria teka ta pati elektros srovė.

Techninė priežiūra – prevencinių ir kitokių priemonių kompleksas, kuriuo siekiama, kad elektros tinklai per ekonomiškai ar kitaip pagrįstą naudojimo laikotarpį atitiktų numatytą paskirtį ir būklę.

Tinklų priežiūros darbai – tinklų įrenginių darbo stabilumą, patikimumą ir kokybę užtikrinantys veiksmai.

Trumpas nutraukimas – nutraukimas, kurio trukmė ilgesnė nei elektros energijos persiuntimo atkūrimo nuo tinklų automatikos įsijungimo ir trumpesnė nei 3 minutės (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2009).

Vartotojas – (angl. *consumer*) juridinis ar fizinis asmuo, vartojantis, perkantis arba kaupiantis elektros energiją asmeniniams ar šeimos, namų ūkio poreikiams. Parduodantis paties pagamintą elektros energiją, kuris dalyvauja tiekiant elektros energijos sistemos lankstumo paslaugas (Terminų bankas).

IVADAS

Šiuo metu vykstantys geopolitiniai įvykiai, besikeičianti elektros energetikos sistemos situacija ir struktūra, taip pat socialiniai ir ekonominiai pokyčiai diktuoja būtinybę užtikrinti elektros skirstomojo tinklo patikimumą radikalioms permainingoms atlaikyti. Nuolat tobulėjančios technologijos, įrenginių galingumas, didėjanti elektros energijos paklausa ir vartojimo priklausomybė lemia didesnę elektros tinklų apkrovą. Esant elektros energijos vartojimo priklausomybei, besikeičiančiai elektros energetikos sistemos struktūrai, reikalingas ir būtinas nuoseklus technologinis planavimas, siekiant elektros energijos tiekimo patikimumo, tinklo saugumo ir energetinio stabilumo.

Europos Sąjungoje veikia 2400 elektros skirstomųjų tinklų įmonių, prie elektros skirstomųjų tinklų prijungę 260 milijonų vartotojų, iš kurių 99 % yra buitiniai vartotojai ir mažos įmonės. Lietuvos elektros skirstomųjų tinklų (toliau EST) ilgis siekia daugiau kaip 126 600 km, didžioji (98,5 %) tinklo dalis yra užmiesčiuose ir mažuose miesteliuose. Tinkle vyrauja 94 % 10 kV oro linijos. Tai yra paskutinė elektros sistemos grandis, įrenginių junginys, kuris yra tiesiogiai susijęs su elektros vartotojais ir atlieka pagrindinį vaidmenį užtikrinant bendrą elektros sistemos ir elektros energijos tiekimo patikimumą. Viena iš kurių nors tinklo komponentų ar įrenginių nebuvimas sutrikdytų elektros sistemos darbą. Nutrūkus elektros energijos tiekimui, be elektros energijos kelioms ar net keliasdešimčiai valandų gali likti tūkstančiai vartotojų. Dėl to vartotojai / įmonės patirtų labai didelius komercinius ir pramoninius, finansinius, ekonominius nuostolius, prarastų našumą ir produkciją. Taip pat atsirastų teikiamų paslaugų sutrikimai, galimi įrangos sugadinimai, baudos už įsipareigojimų nevykdymą, prarasti klientai, didėjantis elektros vartotojų nepasitenkinimo lygis. Vertinant elektros sistemą tiekti elektros energiją, labai svarbu tirti ir analizuoti patikimumą kaip efektyvumo, stabilumo faktorių. Sistemingai atlikus patikimumo analizę, galima įvertinti elektros sistemos našumo kriterijų atitiktį, tinklo būklę tiekti nepertraukiamą elektros energiją.

Darbo aktualumas

Šiandien dauguma Lietuvoje eksploatuojamų 0,4–35 kV elektros skirstomojo tinklo ir jo komponentų tarnavimo laikas viršija daugiau kaip 30 metų. Gedimai, elektros tinklo pralaidumo nebuvimas ir perdavimo pajėgumo trūkumas, ilgas elektros energijos remonto ir atkūrimo laikas, dideli energetiniai nuostoliai apsunkina elektros energetikos sistemos darbą. Lietuvoje dalis EST įrenginių yra pasenę ir nusidėvėję, neatitinka eksploatacijai keliamų reikalavimų, netenkina optimaliai tinklo konfigūracijai keliamų reikalavimų. Sena infrastruktūra, ilgos linijos ir per daug nutolę elektros energijos vartotojai, nepakankamas transformatorių pastočių, skirstomųjų punktų ir automatizacijos įrenginių skaičius. Skirstomojo tinklo sistema pasižymi pasyvia charakteristika, o nuolat veikiantys gedimai, turintys įtakos elektros energijos persiuntimo kokybei ir patikimumo rodiklių vertėms, neužtikrina elektros tiekimo kokybės, nepatenkina vartotojų poreikių. Dėl jungties su Europos Sąjungos energetikos sistemomis, nustatytų bendrų energetinių tikslų ir siekių Lietuva taip pat

turi vadovautis ir kartu palaikyti reglamentuotus aukštus faktinius elektros energijos tiekimo patikimumo rodiklius.

Lietuvos EST patikimumui vertinti nuo 2012 m. pateikiami fiksuoti elektros tinklo gedimų ir nutūkimų duomenys nėra tikslūs ir patikimi, dėl to vertinimas ir rezultatai neatspindi realios EST situacijos. Tinklo patikimumas vertinimas abstrakčiai, probleminio segmento sprendimo metodika taikoma visam Lietuvos EST. Šiuo metu taikoma skaičiavimo metodika neišsprendžia silpniausių elektros tinklo sistemos dalių, elektros vartotojų pasitenkinimo lygio ir patikimumo lygio reikalavimų užtikrinimo. Situaciją apsunkina ir ES šalių EST patikimumo vertinimas. Iki šiol Europos Sąjungos šalys neturi bendro sutarimo, kaip skaičiuoti EST patikimumą taikant vienodus rodiklius, kurie būtų vienodo turinio ir būtų palyginami. Nėra bendrų ir konkrečių priemonių, iš esmės sprendžiančių vyraujančias problemas, nutraukimų registravimo taisykles, sukurtų aiškiai apibrėžtų normų, kokybės standartų bendros ir vieningos skaičiavimo metodikos. ES šalys skirtingai identifikuoja elektros tinklo nutraukimus ir gedimus, taiko skirtingas elektros tinklo gedimų ir nutraukimų duomenų kaupimo metodikas, o patikimumo vertinimą apsunkina skirtingi tinklų techniniai parametrai. Šalys taiko savo turimus ir reglamentuotus EST patikimumą vertinančius rodiklius, atsižvelgdamos į techninius parametrus, toje šalyje reglamentuotą nutraukimo ir atkūrimo laiką.

Siekiant EST didesnio patikimumo, elektros energijos nenutrūkstamo tiekimo, reikalingas nuolatinis elektros tinklo stebėjimas ir analizė, identifikuojant elektros tinklo pažeidžiamiausias zonas, gedimų dažnį ir gedimų intensyvumą, nepatiekτος elektros energijos kiekį vartotojams, parinkti tinkamus technologinius sprendimus ir patikimumą vertinančią metodiką.

Darbo tikslas. Sukurti elektros skirstomojo tinklo vertinimo metodiką, leidžiančią įvertinti pažeidžiamiausias tinklo zonas ir jo modernizavimo poreikį, siekiant pagerinti patikimumo rodiklius, esant neapibrėžtiems elektros tinklo gedimų duomenims.

Darbo uždaviniai

1. Sudaryti elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimo metodiką, kurioje parinkti patikimumą vertinantys kriterijai, skaičiavimo algoritmai, leidžiantys įvertinti skirtingų veiksnių įtaką patikimumo rodikliams, ir parinkti optimalius sprendinius elektros tiekimo patikimumui padidinti;
2. Sukurti elektros tinklo patikimumo vertinimo algoritmą, panaudojant maksimalaus srauto metodą elektros tiekimo patikimumui vertinti;
3. Sukurti elektros tinklo modernizavimo tikslingumo įvertinimo algoritmą, leidžiantį įvertinti skirtingus veiksnus, priimant sprendimą modifikuoti elektros tinklą;
4. Pritaikyti sukurta patikimumo vertinimo metodiką priimant optimalius sprendinius, įvertinant elektros skirstomojo tinklo modernizavimo tikslingumą patikimumui padidinti.

Mokslinis darbo naujumas. Sukurta elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimo metodika, paremta Monte Karlo ir maksimalaus srauto algoritmais, išplečia galimybes įvertinti elektros energijos tiekimo patikimumo rodiklius, kai elektros tinklo topologija yra keičiama. Žaidimų teorijos metodas leidžia nustatyti tinkamiausią abipusį žaidėjų strategijos pasirinkimą, įvertinus elektros tiekimo avarijų atvejus. O kompleksinis metodų taikymas suteikia išsamesnį ir patikimesnį elektros tinklo patikimumo rodiklių įvertinimą.

Praktinė darbo vertė. Sukurta elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimo metodika, leidžianti įvertinti elektros tinklo patikimumą, pralaidumą bei elektros energijos tiekimo galimybę vartotojams. Taikant šias skaičiavimo metodikas, galima prognozuoti tinklo gedimus, analizuoti skirtingas tinklo konfigūracijas bei priimti efektyvesnius elektros tinklo planavimo sprendimus, kurių rezultatas – pagerintas elektros tinklo patikimumas ir nepertraukiamas elektros energijos tiekimas vartotojams. Tai gali būti naudinga elektros tinklo operatoriams, siekiant greičiau reaguoti į avarines situacijas, tinkamai planuoti tinklo konfigūracijas ir priimti strateginius sprendimus, kartu užtikrinti patikimą elektros energijos tiekimą vartotojams, mažinti elektros energijos tiekimo sąnaudas.

Ginamieji disertacijos teiginiai:

1. Sudaryta elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimo metodika leidžia techniniu ir ekonominiu aspektais įvertinti elektros tiekimo patikimumo pokyčius, įdiegus skirtingus sprendinius.
2. Elektros tiekimo patikimumui įvertinti gali būti taikomas maksimalaus srauto metodas.
3. Sprendimų modifikuoti elektros tinklą, siekiant padidinti elektros tiekimo patikimumą, priėmimui pagrįsti gali būti naudojama žaidimų teorija.
4. Sukurta patikimumo vertinimo metodika leidžia parinkti optimalius elektros skirstomojo tinklo modernizavimo sprendinius, atsižvelgiant į sprendinių techninę ir ekonominę įtaką elektros tiekimo patikimumo pokyčiams.

Darbe taikomi metodai. Daktaro disertacijoje taikomi metodai buvo parinkti atsižvelgiant į tyrimo tikslus ir turimų duomenų kiekį. Darbe taikomi šie metodai:

1. Teoriniam pagrindimui atlikta sisteminė literatūros ir dokumentų analizė: atlikta detali palyginamoji mokslinės literatūros ir dokumentų analizė, siekiant išanalizuoti patikimumo sampratos reikšmę, patikimumą vertinančius rodiklius ir taikomus metodus.
2. Skaičiavimų metodai: Skaičiavimams naudojamos *MATLAB* ir *Python* modeliavimo programos, kurios leidžia atlikti patikimumo vertinimo skaičiavimus ir simuliacijas.
3. Atliktas duomenų sutvarkymas, jų grupavimas, sisteminimas, analizė ir apdorojimas, naudojant programinę „Microsoft Office“ paketą, „MATLAB Plotting“ biblioteka nubraižyti grafiniai vertinamieji metodai.

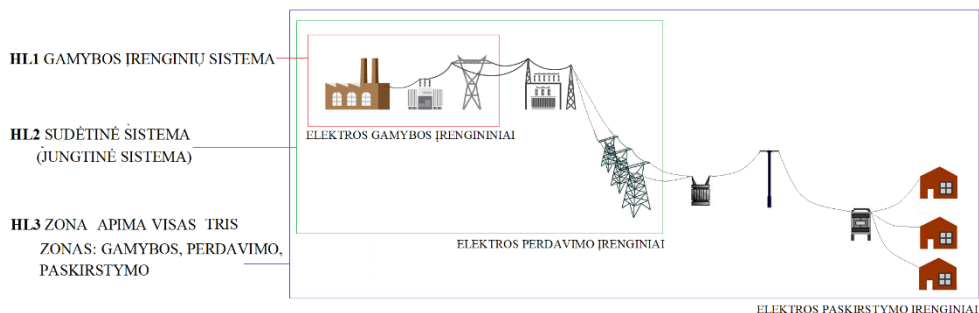
Mokslinė sklaida. Mokslinių tyrimų disertacijos tema rezultatai pristatyti 7-iose tarptautinėse konferencijose (3-iose užsienyje organizuotose tarptautinėse konferencijose), svarbiausi tyrimų rezultatai paskelbti 5-iose moksliniuose straipsniuose, išspausdintuose recenzuojamuose tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose periodiniuose mokslo leidiniuose.

Disertacijos struktūra ir apimtis. Daktaro disertaciją sudaro: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo metodika, tyrimo rezultatai, aptarimo dalys ir išvados, literatūros šaltinių sąrašas, autorės mokslinės ir kūrybinės veiklos aprašymas (*Curriculum vitae*), straipsnių ir mokslinių konferencijų sąrašas, padėka ir priedai. Disertacijos apimtis – 127 puslapiai. Disertacijos pagrindinėje dalyje yra 67 paveikslai, 32 lentelės, 155 cituojamųjų literatūros šaltinių sąrašas, 9 priedai.

1. ELEKTROS SISTEMŲ PATIKIMUMO VERTINIMAS

1.1. Elektros skirstomojo tinklo struktūra, funkcijos, valdymas ir kontrolė

Elektros energetikos sistema (toliau EES) susideda iš daugybės (n) komponentų (elementų), kurie suskirstomi į hierarchinių lygių posistemes (žr. 1.1 pav.) (Billinton, 1996; Billinton, Wenyan, 1994; Xie, Wang, 2004; Tripathi, Sisodia, 2014): gamybos, perdavimo, skirstymo sistemų. Visos sistemos yra susijusios su nepertraukiama elektros energijos gamyba (HL1), perdavimu (HL2), paskirstymu ir vartojimu (HL3).



1.1 pav. Elektros energetikos sistemos hierarchinė struktūrinė schema

Elektros skirstomojo tinklo zona (HL3) apima visas zonas (HL1, HL2, HL3), taip pat įvertinant apkrovos mazgus. Elektra vartotoją per elektros skirstomuosius tinklus (toliau EST) pasiekia tik vienu keliu – perduodama elektros vartotojams iš / per rajonines pastotes. EST yra kompleksinis dinamiškos infrastruktūros elementas. Tai paskutinė elektros sistemos grandis, įrenginių junginys, kuris tiesiogiai susijęs su elektros vartotojais. Elektros tinklas yra bendro naudojimo, prie jo prijungiami aptarnaujamos teritorijos vartotojai, stambios įmonės, jis atlieka pagrindinį vaidmenį užtikrinant bendrą sistemos patikimumą. Todėl visoms posistemėms, kartu ir atskirai, elektros energijos tiekimo patikimumas yra labai svarbus faktorius ir garantas (Su, Cheng, Rong, 2019). Elektros tiekimo patikimumas tiesiogiai priklauso nuo elektros skirstomojo tinklo topologijos, lokacijos ir konstrukcinės sudėties. Viena iš kurių nors tinklo komponentų ar įrenginių nebuvimas sutrikdytų elektros sistemos darbą. Įvykus bet kokiam elektros skirstomojo tinklo gedimui, elektros tiekimas nutrūksta, o vartotojas negauna prekės, kol yra vykdomas tiekimo perjungimas. Jeigu perjungimas vyksta automatiškai, tai užtrunka akimirksnį, jeigu rankiniu būdu – keliolika minučių, gali užtrukti nuo 24 valandų ir siekti 50 dienų (Glowacki, 2018). Todėl projektuojant, remontuojant ir eksploatuojant elektros sistemas yra būtina tirti viso tinklo kokybę (IEEE Std. 1250-2018, 2018), kaip savybių visumą. Elektros energijos tiekimo patikimumo ir skirstymo kokybei (Marnay, 2007; Sucita, Mulyadi, Timotius, 2017) keliama reikalavimai (Cole ir kt., 2010) didina tinklo infrastruktūros ir pokyčių poreikį.

Europos Sąjungoje (toliau ES) elektros energetikos sektorius yra prioritetas, jis turi ne tik užtikrinti viešuosius interesus, bet ir patenkinti, užtikrinti didėjančius elektros vartotojų poreikius (Mohammadi, 2019). ES elektros energijos reguliavimą

apima dvi institucijas: 1) Europos energetikos institucijų reguliavimo taryba (angl. *Council of European Energy Regulators*, [CEER]) ir 2) Energetikos reguliavimo institucijų bendradarbiavimo agentūra (angl. *Agency of the Cooperation of Energy Regulators*, [ACER]). CEER sudaro 32 nacionalinės reguliavimo institucijos (angl. *National regulatory authorities* [NRAS]), turinčios bendrą tikslą – kurti bendrą, konkurencingą, veiksmingą, tvarią ES vidinę energetinę rinką. Organizacijos (ACER ir CEER) turi panašius tikslus, tačiau ACER daugiau dėmesio skiria teisės aktams, rūpinasi, kad tinkamai veiktų bendroji Europos elektros rinką. CEER energetikos reguliavime atlieka visa kita, ko neatlieka ACER, orientuojasi į klientus (vartotojus). CEER veikla apima: tarptautinį bendradarbiavimą, pažangius tinklus, tvarumą, paklausos operatorius ir problemas, kurias patiria klientai. Reguliuojančiųjų institucijų ir dokumentų tikslas – užtikrinti patikimą, saugią elektros energijos gamybą, perdavimą ir skirstymą.

Pagrindinis institucijų ir agentūros reguliavimo tikslas – neleisti, kad tinklų operatorius (ir tiekėjas) sumažintų dėmesį elektros skirstomųjų tinklų (EST) infrastruktūros plėtrai ir priežiūrai, dėl ko pablogėtų aprūpinimo elektra patikimumas. Siekiant elektros energijos gamybos ir energijos vartojimo efektyvumo, vienodo veiksmingo lygio reguliuojamos priežiūros, EST modernizavimo (27 str.), būtina užtikrinti kokybišką paslaugų kokybę galutiniams elektros energijos vartotojams (Europos Parlamento ir Tarybos 2009/72/EB, 2019/944 direktyva).

Atsižvelgiant į ES teisės reikalavimus, Lietuvoje elektros energijos gamybą, perdavimą, skirstymą ir tiekimą, elektros energijos paslaugų tiekėjų ir vartotojų santykių nustatymą, jų sąlygas elektros energetikos sektoriuje konkurencijai plėtoti reguliuoja Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymai (2002, Nr. IX – 884; Nr. XI-1919, 2012-01-17). Veikiančių subjektų veiklą reguliuoja ir valstybinę elektros energetikos priežiūrą atlieka Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija (toliau – Komisija).

Lietuvoje už skirstomuosius elektros tinklus, kuriais perduodama 99 % elektros energijos vartotojams, atsakingas vienas energijos skirstymo operatorius (toliau ESO). Šis operatorius yra visapusiškai atsakingas už 70 % jam priklausančioje teritorijoje esančių tinklų, elektros linijų, elektros energijos paskirstymą bei valdymą (AB „Elektros skirstymo operatorius“, 2018). Skirstomųjų tinklų sistemos operatoriams (toliau STO) yra taikomi elektros energijos persiuntimo patikimumo reikalavimai, nustatyti Elektros energijos tiekimo ir naudojimo taisyklėse (Žin., 2010, Nr. 20-957) (Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymas Nr. 1-116, 2012 birželio 18 d.). Todėl ESO, vadovaudamasis ES ir LR teisės normatyvais, privalo užtikrinti energijos skirstymo sistemų darbą ir tvarią plėtrą, užtikrinti patikimą elektros skirstomojo tinklo darbą.

ES šalyse vidutinės įtampos tinklai traktuojami įvairiai: nėra identifikuojama (Slovakija); nuo 1 kV (Belgija, Bulgarija, Suomija, Prancūzija, Vokietija, Italija, Liuksemburgas, Malta, Norvegija, Lenkija, Portugalija, Ispanija, Švedija, Šveicarija, Nyderlandai), 6 kV (Čekija, Estija, Latvija, Lietuva), 6,6 kV (Graikija) 10 kV (Kroatija, Vengrija, Slovėnija); iki 20 kV (Latvija, Rumunija), 22 kV (Graikija), 35 kV (Belgija, Bulgarija, Čekija, Kroatija, Vengrija, Italija, Lietuva, Slovėnija),

36 kV (Ispanija, Švedija, Šveicarija, Nyderlandai, Liuksemburgas, Austrija, Belgija), 45 kV (Prancūzija, Portugalija), 60 kV (Lenkija), 70 kV (Suomija), 72,5 kV (Vokietija).

1.1.1. Vartotojų kategorijos ir patikimumo lygiai

IEEE Standartas 1366™-2012 vartotoją apibrėžia kaip išmatuojamą aptarnaujamą mazgą, kuris yra aktyvus (veikiantis) ir įrengtas specifiskai tinkamiausioje vietoje. Prie EST prijungti aptarnaujamos teritorijos vartotojai: komerciniai, žemės ūkio, pramoniniai, aukštųjų technologijų įmonės, gyvenamųjų rajonų, miestų, kaimų gyventojai. Vartotojų kategorijos išskirstomos pagal gyvenamąją vietą: kaimo, priemiesčio, miesto. Elektros vartotojų skirstymas yra dėl teikiamų paslaugų kokybės užtikrinimo ir garantijų suteikimo. Visame pasaulyje vartotojai turi unikalų elektros energijos pasiūlymą / planą, kuriam atitinkamai yra numatyti nutraukimo ir elektros energijos paslaugų nebuvimo metiniai valandiniai įkainiai ir patikimumo užtikrinimas, atsižvelgiant į elektros energijos atkūrimo laiką. Todėl elektros energijos vartotojai, atsižvelgiant į paskirstytas kategorijas, skirtingai reaguoja į elektros tinklų nutraukimus (dėl sutartyse nurodytų atkūrimo laiko).

Elektros energijos įrenginių prijungimo prie elektros tinklų įkainių nustatymo metodika (2011 m., Nr. O3-235) bendruose nuostatuose vartotojų grupes pagal numatytą kiekvieną įkainį diferencijuoja: „<...> vadovaujantis vartotojų nediskriminavimo, tinklų plėtros bei elektros energijos vartojimo efektyvumo principais“ (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2012; Elektros skirstomojo tinklo technologinės plėtros standartas; Elektros skirstomojo tinklo technologinės plėtros strategija). Elektros energijos tiekimo ir naudojimo taisyklėse (2010 m., Nr. 1-238, 58 str.) nurodoma, kad įrengiant tinklą pagal atitinkamą kategoriją reikia numatyti ir įgyvendinti „<...> priemonės galimiems nuostoliams dėl elektros energijos persiuntimo ir tiekimo nutraukimo sumažinti ar jų išvengti, įskaitant ir priemones dėl Lietuvos standarte LST EN 50160:2010 nurodytų staigiųjų trumpųjų, ilgųjų įtampos kryžių ir pertrūkių“ (Elektros energijos tiekimo ir naudojimo taisyklės, 2020).

Lietuvoje elektros energijos tiekimo ir naudojimo taisyklėse (2010 m., Nr. 1-238) reglamentuotos trys vartotojų patikimumo kategorijos, kurioms nustatytas elektros energijos persiuntimo patikimumo rodiklių vykdymas 2019 m. (žr. 1.1 lentelę).

1.1 lentelė. Elektros energijos persiuntimo patikimumo rodiklių vykdymas

Aprūpinimo elektra patikimumo kategorija	Nustatytas paslaugos suteikimo vartotojui rodiklis, val.	Elektros energijos aprūpinimas	Vidutinis paslaugos suteikimo vartotojui rodiklis	Paslaugos suteikimo vartotojui nustatytu laiku rodiklis (proc.)
I	Per laiką, ne ilgesnį nei automatinis perjungimas nuo vieno nepriklausomo elektros šaltinio prie kito	Aprūpinant elektros energija iš dviejų arba daugiau nepriklausomų elektros energijos šaltinių atskiromis elektros linijomis	0,01	98,55

Aprūpinimo elektra patikimumo kategorija	Nustatytas paslaugos suteikimo vartotojui rodiklis, val.	Elektros energijos aprūpinimas	Vidutinis paslaugos suteikimo vartotojui rodiklis	Paslaugos suteikimo vartotojui nustatytu laiku rodiklis (proc.)
II	2,5	Aprūpinant elektros energija iš dviejų elektros energijos šaltinių atskiromis elektros linijomis.	0,27	100
III	24	Aprūpinant elektros energija iš vieno elektros energijos šaltinio viena elektros linija	0,88	100

Šaltinis: Valstybinė energetikos reguliavimo taryba, 2020.

III kategorijos vartotojams numatytas atkūrimo laikas turi būti ne ilgesnis kaip 24 val. Tačiau Lietuvos įstatymuose ir nuostatose nėra numatyta jokia atsakomybė STO, neįgyvendinus atkūrimo laiko. Kita situacija yra II ir I kategorijos vartotojams, jiems elektros energijos atkūrimas turi būti vykdomas pagal numatytas sutartis. Norint turėti aukštesnę kategoriją, reikalingas papildomas mokestis, t. y. mokama patikimumo kategorijos dedamoji. Siekiant III kategorijos vartotojų interesų užtikrinimo, reikia pakeisti įstatymuose numatytų atsakomybių išsipareigojimus.

1.2. Patikimumo sąvokos samprata ir reikšmė elektros energijos tiekimui

Elektros energetikos sistemoje patikimumas ir jo užtikrinimas, su juo susiję sprendimai yra vieni iš aktualiausių ir dažniausiai mokslinėje literatūroje tiriamų, analizuojamų sričių (Jianping ir kt., 2008; Liu, 2008; Xu, Wu, 2010; Weiqing, 2014; Višniakas, Slivinskas, 2015; Chernenko, 2018; Biyun ir kt., 2018; Liu, ir kt., 2019; Zhu ir kt., 2019). Patikimumo (angl. *reliability*) sąvokos reikšmė ir jos samprata neturi aiškaus ir konkretaus bendro apibrėžimo, tačiau išreikšta panašia arba ta pačia minties ideologija. Todėl, siekiant tinkamai identifikuoti pasirinkto objekto patikimumą, jį nusakančius kriterijus, reikalingas tinkamas sąvokos apibrėžimas.

Patikimumo teorijos pradžia siejama su Antruoju pasauliniu karu, o jo raida prasidėjo su karinėmis technologijomis, aviacijos pramonės augimu (Billinton, 1996). Elektros energetikos sektoriuje didelė patikimumo reikiamybė pasireiškė nuo 1970 metų. Dėl šio sektoriaus didelės įtakos ekonomikai buvo reikalaujama elektros energiją tiekti be pertrūkių, užtikrinant minimaliausių elektros sistemos gedimų dažnį. Iki šiol yra išlikę, kad patikimumo užtikrinimas yra vienas iš svarbiausių techninių kriterijų, ekonominės priklausomybės rodiklis (Sousa ir kt., 2015).

Mokslinėje literatūroje patikimumas dažniausiai nusakomas kaip kokybės kriterijus (Yuan ir kt., 2006), apibūdinantis matavimų tikslumą ir stabilumą (Visuotinė lietuvių enciklopedija). Tai matematinė statistikos kryptis, nagrinėjanti patikimumui analizuoti techninio objekto (įrenginio arba sistemos) metodus (Visuotinė lietuvių enciklopedija). Patikimumas yra elektros energijos tiekimo paslaugos pagrindinis saugumo (Adil, Khan, Jan, 2015; Gong ir kt., 2008) ir eksploatacijos patvarumo indeksas (toliau – *rodiklis*) (Kutjuns, Krishans, 2007;

Chowdhury, Koval, 2011; Voropai ir kt., 2013), tiekimo sistemos lygio matas (Sucita ir kt., 2017). Sąvoka apima elektros sistemos ar įrangos būklę ir jos tikimybę veikti įprastiniu darbo režimu, nustatytomis darbo, techninio aptarnavimo sąlygomis (Weiqing ir kt., 2014). Tai atsitiktinis dydis, išreiškiamas rodikliu(-iais) (žr. 1.2 lentelę), kuris nusako eksploatacinių savybių tikimybinį patvarumą (Kutjuns, Krishans, 2007; Voropai ir kt., 2013; Chowdhury, Koval, 2011; Kornatka, 2017.).

1.2 lentelė. Pagrindiniai patikimumą apibrėžiantys rodikliai

Rodiklių žymėjimas	Rodiklio reikšmė
λ_{si}	Gedimų intensyvumas i -tajame tinklo mazge;
λ_p	Trumpojo jungimo gedimų intensyvumas;
λ_T	Trumpalaikis trumpojo jungimo gedimų intensyvumas;
λ_{oc}	Grandinės nutraukimo gedimų intensyvumas;
λ_M	Planuojamas priežiūros intensyvumas;
U_{si}	Metinis apkrovos i -tojo mazgo nepasiekiamumas;
IM_i	Trumpalaikis elektros energijos nutraukimų skaičius;
$MTTF$	Darbo iki gedimo vidutinė trukmė;
$MTTR$	Vidutinis laikas iki atkūrimo;
$MTTM$	Vidutinis eksploatavimo laikas;
N_i	Vartotojų, patyrusių elektros energijos nutraukimus, skaičius mazge i kiekvieno ilgalaikio nutraukimo metu per ataskaitinį laikotarpį;
N_{mi}	Vartotojų, patyrusių trumpalaikius elektros energijos nutraukimus, skaičius mazge i per ataskaitinį laikotarpį;
N_T	Vartotojų skaičius tiriamojo tinklo dalyje.

Patikimumas apibūdina įrenginių, sistemų patikimą darbą be gedimų, esant tam tikroms (arba nustatytoms) darbo sąlygoms (aptarnavimo, sandėliavimo ir transportavimo) (Gečys, 2011) per tam tikrą nustatytą laiką, nepakeičiant techninių charakteristikų (Višniakas, Slivinskas, 2005; Navickas, 2007; Billinton, 2013; Višniakas, 2015; H. Liu, 2019). Taigi, patikimumas yra tam tikro objekto kokybę nusakantis rodiklis, kuris parodo jo funkcionalumo lygį ir galimybę išlaikyti reglamentuotas eksploatacines rodiklių leistinas vertes, įvertinus techninį aptarnavimą, taisyumą ir kitas išorines bei vidines tinklą veikiančias sąlygas (žr. 1.2 pav.).

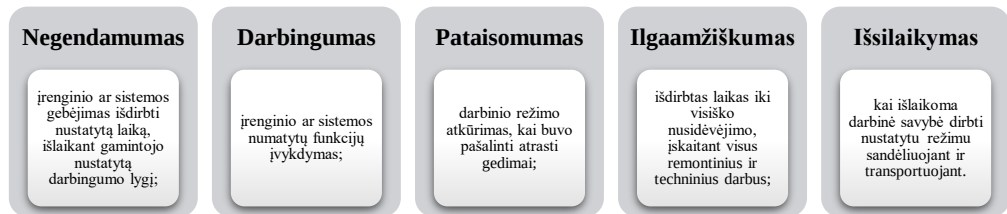


1.2 pav. Patikimumo sudedamosios dalys

Patikimumo sąvokos reikšmė yra labai plati, ji gali apibūdinti ne tik elektros tinklo būklę, bet ir elektros energijos tiekimo paslaugų kokybę (Jianping ir kt., 2008), elektros energijos tiekimo lygio matą, prieinamumą, tiekimo užtikrintumą (Sucita, Mulyadi, Tomotius, 2017; Zuliani ir kt., 2017), įrenginių funkcionalumą. Tai bendra aprūpinimo, nutraukimų ir / ar nesklaidumų pašalinimo charakteristika. Patikimumas aprėpia: planavimą, projektavimą, eksploatavimą, priežiūrą, valdymą ir kt. (Jianping

ir kt., 2008). Apima daugybę techninių procesų ir būsenų, kurių įvertinimas ir tarpusavio sąsaja gali nusakyti objekto darbinį efektyvumą, veikimo užtikrintumą ir tarnavimo laiko galimybę.

Elektros tinklo kontekste patikimumo sąvokos reikšmei turi įtakos veiksniai (išoriniai, vidiniai), sąlygojantys rodiklių vertes ir paties patikimumo įvertinimą. Tokiu atveju patikimumas gali būti įvardijamas ir kaip bendrinė charakteristika: nutraukimų, gedimų, atkūrimo kompleksinė savybių visuma (žr. 1.2 pav.) (Gono ir kt., 2007; Navickas, 2007; Gono ir kt., 2011; Gečys, 2011; Višniakas, 2015; Billinton, 2013; Liu, 2019).



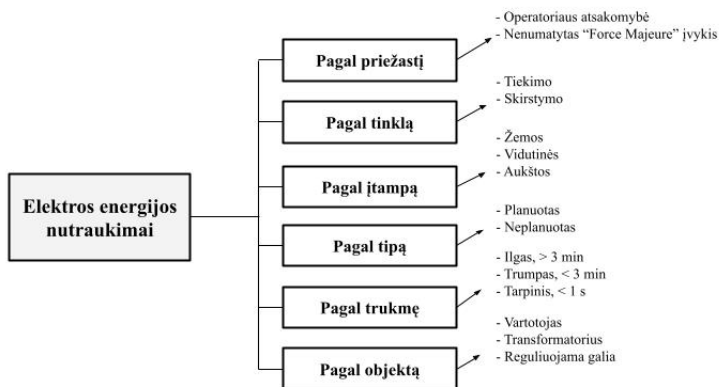
1.3 pav. Patikimumo vertinimas pagal objekto ir eksploatacijos sąlygas

Taigi, patikimumas yra kompleksinė savybė, kuri nusako įrenginio arba sistemos: funkcionalumą, būseną, saugumo kriterijų, sistemos lygį negesti, ilgaamžiškumą, išsilaikymą ir galimybę būti pataisomiems(-am). O pačiai savybei tiesioginę įtaką turi: tinklo geografinė vieta, topologija (Ashtari, 2022), technologijų kaita, techninis amžius, gedimai, nutrūkimai. Taigi, patikimumas – savybė ir svarbiausius kriterijus, apibūdinantis elektros sistemos našumą, stabilumą, tinklo gebėjimą būti veiksnium ir tiekti elektros energiją, veikiant įvairiems darbo režimams.

1.3. Elektros tiekimo nutrūkimų ir gedimų analizė

Teigiama, kad iš visų elektros energetikoje įvykusių gedimų 80–90 % įvyksta elektros skirstomajame tinkle (Wang, 2016; Mora-Florez ir kt., 2009). Elektros energijos tiekimo sutrikimai ir nutrūkimai yra tiesiogiai susiję su tinklo patikimumu (Gono, ir kt. 2007; Gono ir kt., 2011; Choma, 2019) ir elektros vartotojų pasitenkinimo lygiu (Poudel, Dubey, 2019).

Elektros sistemos darbo sutrikimas, elektros tinklo ir elektros tiekimo **nutrūkimas** gali būti įvardijamas kaip **gedimas** (angl. *failure*) arba **defektas** (angl. *fault*), dėl kurio objektas iš dalies arba visiškai netenka darbingumo ir kuris turi įtakos elektros sistemos patikimumui (Chen ir kt., 2019; Furse, 2021). Elektros energijos nutraukimai yra klasifikuojami pagal požymius (žr. 1.4 pav.), kurie ES šalyse yra fiksuojami skirtingai.



1.4 pav. Elektros energijos nutraukimų klasifikacija

Elektros tiekimo nutraukimas gali būti *planuotas* arba *neplanuotas*. ES šalių skirstomojo tinklo operatoriai patikimumą vertinančiose sistemose kiekvieną nutraukimo įvykį registruoja atskiru įrašu, nurodydami planuoto ir neplanuoto nutraukimo pirminius duomenis (Jaech, 2019; Kumar, 2014). **Planuotas nutraukimas** – kai operatorius praneša iš anksto apie elektros energijos tiekimo nebuvimą, „<...>informuotas teisės aktuose arba sutartyje nustatytu laiku ar būdu <...>“ (Lietuvos Respublikos ūkis, Nr. 4-265; EN50160 str.). Kiekvienoje ES šalyje planinių nutraukimų reglamentuotos ribos (laikas) skiriasi (žr.1.3 lentelė, 1 priedas). ES šalyse taikomi standartai nėra griežti ir priklauso tik nuo tinklo operatorių ir vartotojų susitarimų.

1.3 lentelė. ES šalių reglamentuotų ilgalaikių ir trumpalaikių nutraukimų vertinimas

Šalis	Laikinas nutraukimas	Trumpalaikis nutraukimas	Ilgalaikiai nutraukimai
Lietuva, Latvija, Graikija, Slovėnija, Ispanija	Neapibrėžtas	$T \leq 3 \text{ min.}$	$T \geq 3 \text{ min.}$
Estija	Neapibrėžtas	Neapibrėžtas	$T > 3 \text{ min.}$
Vengrija, Vokietija	$T \leq 1 \text{ s}$	$1 \text{ s} < T \leq 3 \text{ min.}$	$T > 3 \text{ min.}$
Danija	Nėra nustatytas skirtumas tarp ilgų ir trumpų nutraukimų. Nutraukimai $< 1 \text{ min.}$		
Malta	Vertinami visi nutraukimai, klasifikacija nėra naudojama.		

Šaltinis: sudaryta autorės remiantis Europos energetikos reguliavimo tarybos ataskaita, 2016.

Planinis remontas vykdomas *pagal planą* ir / ar pagal įvykusius gedimus. Idealaus remonto atveju po remonto būsena yra kaip naujo, įvertinus tai, kad įrenginys neturi dilimo defektų iki analizuojamojo momento *t*. *Sutaisymas* yra sisteminė procedūrų visuma, kuri reikalinga įrenginio sistemos būsenai atkurti. O *remontas* – sugedusio įrenginio sutvarkymas arba pakeitimas nauju.

Neplanuotas nutraukimas yra įvardijamas kaip atsitiktinis elektros tinklo gedimas, įvykęs be išankstinio vartotojo įspėjimo (EN 50160, Lietuvos Respublikos ūkis; 2005 m., Nr. 4-265). Neplanuoti elektros tiekimo sutrikimai skirstomi į:

trumpalaikius (< 3 min.) ir **ilgalaikius**, dar kitaip vadinamus nuolatiniais (> 3 min.), labai ilgais (12 val. ≤ 24 val.) ir „*pragaištingais*“ ($T \geq 24 \text{ val.}$) (Kornatka, 2017).

Visų ES šalių bendrinis susitarimas – išankstinis vartotojų išpėjimas apie elektros energijos nutraukimą. Tačiau ES šalių siekis – nutraukimus matuoti ir registruoti, reguliuoti pagal vienodus nutraukimų požymius (Klementavičius, 2006) – iki šiol nėra tai įgyvendintas.

1.4 lentelė. Atskiro elektros energijos vartotojo neplanuoto ilgo nutraukimo trukmei taikomi normatyvai ir kompensacijos

Standarto tipas	Šalys, standartus taikančios	Standarto vertė	Automatinis kompensavimas
Atskiri, ilgos trukmės neplanuoti nutraukimai	Čekija, Estija, Graikija (taiko tik prie vidutinės įtampos prijungtiems elektros vartotojams); Suomija, Prancūzija, Vengrija, Lietuva, Nyderlandai, Norvegija, Rumunija, Švedija	8 val. sostinėje Prahoje, 12 val. kituose Čekijos regionuose (taikoma tik žemos įtampos 0,4–0,6 kV tinkluose); >12 val. (Graikija 6–22 kV); >6 val. (Prancūzija 1–45 kV); > 12 val. (Suomija); > 24 val. miesto, > 12 priemiesčio ir kaimo (Italija); > 12 val., > 1 val. (Nyderlandai 1–36 kV); > 12 val. (Norvegija).	Estija, Graikija, Suomija, Prancūzija (tik klientai, kurie yra prioritetingų paslaugų registre); Vengrija, Nyderlandai, Švedija
Atskiri, ilgos trukmės planuoti nutraukimai	Rumunija, Švedija		Estija
Suminis nutraukimų laikas (planuotų ir neplanuotų atskirai arba kartu) per metus	Ispanija, Lenkija (planuoti ir neplanuoti nutraukimai yra atskirai vertinami), Portugalija (kompensacijos taikomos tik esant ilgiems neplanuotiems nutraukimams), Slovėnija	45min<T<17h (Portugalija) (45 min.), >9h (Slovėnija) (įtraukiant žemos įtampos vartotojus 0,4 ir vidutinės įtampos vartotojus 10–35 kV)	Estija, Portugalija
Bendras nutraukimų skaičius (ilgų, trumpų arba abiejų kartu) per metus	Estija, Vengrija (trumpi 1 s.<T≤3 min.), Italija (ilgi ir trumpi, Portugalija (tik neplanuoti nutraukimai), Slovėnija	Trumpi (1 s.<T≤3 min.) ir ilgi (T>3 min.), priklausomai nuo tinklo lokacijos (Italija); 3<n<20 (Portugalija)	Estija, Italija (tik vidutinės įtampos tinkluose 1–35 kV), Portugalija

Šaltinis: sudaryta autorės remiantis 6 CEER elektros energijos ir dujų tiekimo kokybės lyginamosios analizės ataskaita, 2016

Šalyse taikomas kompensavimo normatyvas rodo maksimalų laiką, per kurį elektros energijos tiekimas turi būti atnaujintas, priklausomai nuo kiekvienos šalies reikalavimų. Taikymo sąlygos nurodo išimtinis įvykius, kurie gali atidėti elektros tiekimo atnaujinimą. Kompensavimo tvarka už elektros tiekimo nutraukimą, automatiškai arba pateikus prašymą, priklauso nuo ES šalių įmonių politikos. Kompensacijos dydis rodo procentinį dydį arba fiksuotą sumą, kurią vartotojas gauna kaip kompensaciją už elektros tiekimo nutraukimą, priklausomai nuo nutraukimo trukmės. Pastebima, kad dažniausiai kompensacijos yra taikomos esant neplanuotiems

nutraukimams. ES šalių neplanuotų nutraukimų reguliavimo sistemos požymiai pateikti 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. ES šalių neplanuotų nutraukimų reguliavimo sistemos požymiai ES šalyse

Šalis	Taisyklių taikymas nutraukimams registruoti	Nutraukimų klasifikavimas pagal priežastis	„Force majeure“ apibrėžimas ir gedimų identifikavimas	Auditoriai	Taikomi nutraukimų normatyvai
Belgija		+	+		+
Čekija	+	+	+		+
Italija	+	+	+	+	+
Lietuva		+	+		+
Portugalija	+	+	+	+	+
Latvija					
Vengrija	+	+	+	+	+
Graikija					

Šaltinis: sudaryta autorės remiantis Klementavičius, 2006.

Neplanuoti nutraukimai, kurie priskiriami taip pat ir Lietuvos elektros skirstomiesiems tinklams, **gedimų pažeidimų** fiksuojamos priežastys:

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

Didžiausią žalą elektros sistemoms daro neplanuoti (*epizodiniai* įvykiai) įrangos gedimai, elektros tiekimo nutraukimai. EST neplanuoti nutraukimai dažniausiai įvyksta dėl išorinių veiksnių (tokių, kaip oro sąlygų kaita, metų laikas, užkritę medžiai, žmogiškasis faktorius ir pan.), įrangos senėjimo, netinkamos jos eksploatacijos.

Gedimų ir nutraukimų dažnis priklauso nuo šalies lokacijos, energetinės sistemos struktūros, įrenginių skaičiaus ir jų specifiškumo, patikimumo veikti. EST gedimus lemia daug faktorių: įrenginiai (elektros linijos, transformatoriai, jungtuvai, generatoriai ir pan.) ir jų būklę lemiantys veiksniai (eksploatavimo sąlygos, viršįtampių lygiai; aplinkos veiksniai; žmogiškasis faktorius; medžių griūtis ir pan., trukmė, stebėseną), specifinės savybės. O visus šiuos faktorius veikia įvairūs veiksniai: elektros, šilumos, mechaninės jėgos, viršįtampiai (žaibo išlydžio, komutavimo, rezonansiniai ar ferorezonansiniai), drėgmė, apkrova ir jos pokytis, nuolat veikiančios darbinės įtampos, elektros įrenginių izoliacijos įšilimo temperatūros.

Didžiausią įtaką patikimumui turi: linijos, pastočių įrenginiai, komutaciniai įrenginiai, transformatoriai. Kabelinių linijų izoliacijos patikimumui didelę įtaką turi kabelių klojimo būdas. Kabelinės linijos reikalauja mažiau priežiūros, patikimesnės, tačiau jų klojimo būdas yra labai brangus, o ir gedimus likviduoti yra daug sudėtingiau ir užtrunka daugiau laiko normalizuoti elektros tiekimą į darbinį režimą. EST oro linijų patikimumą dažniausiai lemia laidų, atramų, izoliacijos kokybė ir specifinės jų savybės, darbo sąlygos: viršįtampiai, aplinkos veiksniai, natūralus nusidėvėjimas, žmogiškasis faktorius. Veiksniai turi įtakos gedimų atsiradimui bei patikimumui (Pilgrim, 2019).

EST gedimai ir elektros energijos nutrūkimai gali apsunkinti elektros energetikos sistemos darbą, padaryti didelių ekonominių nuostolių (Liu, ir kt., 2020). Atskiras nutraukimas yra epizodinis įvykis, pagal kurį negalima vertinti aprūpinimo kokybės, todėl tai negali atspindėti visos sistemos patikimumo. Taigi, siekiant įvertinti patikimumą, reikia vesti gedimų statistiką: fiksuoti kiekvieno elemento gedimų dažnį; kokie ir kiek vartotojų neteko elektros energijos tiekimo; kiek laiko buvo nutrauktas elektros energijos tiekimas; per kiek laiko elektros energijos tiekimas buvo atkurtas (Sucila ir kt., 2017). Patikimi ir išsamūs duomenys leis spręsti apie tinklo būklę, įvertinti galimybę nepertraukiamai tiekti elektros energiją.

1.3.1. Gedimų dažnis ir intensyvumas

Elektros sistemų įrenginių patikimumą, esant stacionariam darbo režimui, lemia: *gedimų intensyvumas, vidutinė atkūrimo bei remonto trukmė* (Choma, 2019). Įrenginių funkcionavimo laikas nuo įrengimo arba eilinio remonto iki gedimo yra atsitiktinis ir priklauso nuo *sąlygų* (izoliacijos elektrinio atsparumo atsitiktinio charakterio, įrenginių nusidėvėjimų, tinklo konfigūracijos, apkrovos, kokybės, gamintojo) ir *įvykių* (tinklo lokacijos, oro sąlygų, jų kaitos, priežiūros ir tinkamos eksploatacijos). Funkcionavimo laikas pasiskirsto (*gama*) eksponentiniu statistiniu dėsnio, kurio skirsnio funkcija turi tokią išraišką:

$$F_T(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1.1)$$

čia T ir τ – atsitiktinis ir vidutinis funkcionavimo laikas;
 t – nepriklausomas funkcijos argumentas (vieneri metai).

Mokslinėje literatūroje **gedimų dažnis** kitaip dar vadinamas **gedimų intensyvumu** $\lambda(t)$, t. y. sugedimo greičiu (Navickas, 2007; Višniakas, Slavinskas, 2005; Brown, 2009). Gedimų intensyvumas įvertinamas kaip sąlyginis tikimybės tankis, išreikštas tam tikru laiko momentu (t). IEEE 493-2007 standarte gedimų intensyvumo charakteristika aprašoma:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot l \text{ [kartai / linijos ilgiui]}, \quad (1.2)$$

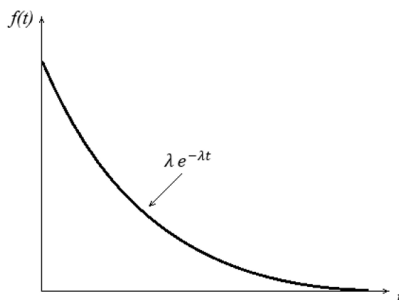
čia λ_0 – numatytas gedimų intensyvumas 1 km linijos ilgio atkarpoje;
 l – linijos ilgis.

Sistemos ar įrenginių gedimų intensyvumas skirtingais periodais gali skirtis (pvz., skirtingais metų laikais). Esant pastoviam ir nusistovėjusiam gedimų intensyvumo dydžiui: $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, priimama, kad elektros įrenginio patikimumas per laiką mažėja. Tai galima užrašyti funkcija (1.3), kuri vadinama *gedimų pasiskirstymo funkcija*, arba *patikimumo funkcija* (žr. 1.5 pav.). Tikimybės tankio funkcija išreiškiama formule:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (1.3)$$

čia λ – eksponentinio skirstinio parametras esant įvykių pasiskirstymui pagal Veibulo skirstinį.

Gedimų srautas ir gedimų intensyvumas nėra lygūs dydžiai. Daugumos elektros sistemų įrenginių gedimų srautai gali išsiskirti šiomis savybėmis: *ordinariškumu* ir *stacionariškumu*. Taisomų įrenginių vidutinis gedimų dažnis (gedimų srauto parametras) $\omega(t)$ – tai pataisomų įrenginių gedimų dažnio procesas (Navickas, 2007; Gečys, 2011). *Ordinariškumas* pasireiškia, kai gedimų intensyvumas ir gedimų srautas įvyks tuo pačiu momentu: $\omega(t) = \lambda(t)$, kai $(t, t + \Delta t)$, $k = 1$. *Stacionariškumas* pasireiškia, kai įvykių tikimybės charakteristikos nekinta, t. y. $(t, t + \Delta t)$ priklauso tik nuo Δt . $\omega = \lambda = \text{const}$. Todėl priimama, kad elektros įrenginių *gedimo srauto parametras* yra lygus *gedimų intensyvumui*.



1.5 pav. Gedimų intensyvumo ir tarnavimo laiko priklausomybės grafikas

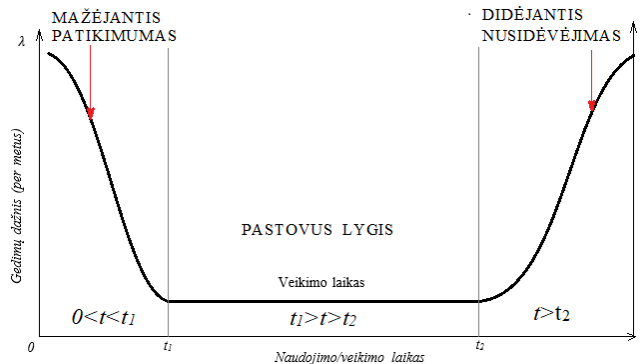
Gedimų intensyvumas yra klasifikuojamas pagal polinkį: *didėti*, *mažėti* arba būti *pastoviam* laiko atžvilgiu ir apibūdinamas dviem arba trimis kitimo tendencijomis. Laikoma, kad gedimų intensyvumas yra momentinė sistemos būsenos (Augutis, 2005) charakteristika. Gedimų intensyvumas įvairiais laiko periodais dažniausiai yra skirtingas, o laiko dedamosios gali būti išreiškiamos (Voropai ir kt., 2013):

$$t = t_1 + t_2 + t_n, \quad (1.4)$$

čia t_1, t_2, t_n – laiko dedamosios, išreiškiamos valandomis, dienomis, metais.

Mažėjant eksploatacijos trukmei ir dėvintis elektros įrenginiams, gedimų intensyvumas turi aiškią tendenciją didėti (Guldbrand, 2007). Gedimai

interpretuojami „vonios“ principo kreivė (žr. 1.6 pav.), dar kitaip žinoma kaip rizikos funkcija (angl. *Bath Curve*) (Zhu ir kt., 2019; Liu ir kt., 2019) (žr. 1.6 pav.).



1.6 pav. „Vonios“ tipo gedimų intensyvumo kitimo kreivė

1.6 pav. pateikta kreivė yra naudojama teoriškai vertinant įrangą, išskiriant tris periodus (tankio funkcijos formas):

1. ($0 < t < t_1$) didelis gedimų dažnis, staigiai mažėja patikimumas. Tai įrenginio ar visos sistemos įsidirbimo periodas, kuriame yra šalinami visi projektavimo, gamybos, montavimo defektai.
2. Nusistovėjęs gedimų intensyvumas ($t_1 < t < t_2$), normalus eksploatacijos periodas, kuriame gedimų intensyvumas tampa pastovus, o eksponentinis pasiskirstymas patampa *Reilėjaus* pasiskirstymo dėsnio.
3. Nusidėvėjimo – senėjimo periodas ($t > t_2$), kai gedimai vyksta dėl negrįžtamų fizikinių, cheminių procesų tiek izoliacijoje, tiek dėl mechaninių mazgų susidėvėjimų, korozijos, erozijos ir kitų reiškinių ir išreiškiamas eksponentine senėjimo būseną. Šiuo laikotarpiu gedimų srautai suintensyvėja, o patys gedimai tampa nestacionarūs.

Gedimai taip pat skirstomi į **funkcinius** ir **parametrinius**. *Funkciniai* – kai įrenginys ar sistema negali atlikti savo darbinių funkcijų. *Parametriniai* gedimai – kurių numatytos darbinės charakteristikos neatitinka reikalavimų, tad vieno įrenginio darbingumą galima atkurti, o kitų ne. Todėl vieni įrenginiai yra *pataisomi*, o kiti *netaisomi*, toks skirstymas yra pagal **veikimo būseną**. Kadangi kiekvienas įrenginys ar sistema aprašoma kaip tikimybė p veikti R ir tikimybė neveikti (sugesti) Q . Tikimybė veikti įprastiniu režimu aprašoma išraiška: $1 - P(R)$, t. y. kai visų galimų būsenų suma privalo būti lygi vienetui. Nepatikimumas arba gendamumas $Q(t)$ yra apibrėžiami kaip tikimybiniai dydžiai (Wiseman, 2014), t. y. elementų ar sistemos charakteristikų neatitikimas gamintojo numatytoms / nustatytoms specifikacijoms. Nepataisymo tikimybė $Q(t)$, per laiką $(0, t): Q(t) = P(T_{pv} > t)$:

$$Q(t) = 1 - R(t). \quad (1.5)$$

Negedimo tikimybiniis dydis, jog funkcionavimo laikas bus didesnis už numatytą dydį per nustatytą T laiką laiko momentu t :

$$p = 1 - Q = P(T > t) = 1 - F_T(t), \quad (1.6)$$

čia Q – nepatikimumo (gedimo) dydis;

$P(T > t)$ – tikimybė išraiška.

Gedimas ir veikimas yra priešingi įvykiai. Q ir R išreiškiami aritmetiniais komponentais, priklausančiais nuo laiko.

$$R(t) = \int_t^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t}. \quad (1.7)$$

Nepataisomi įrenginiai dažniausiai yra naudojami iki pirmojo sugedimo, kai gedimo neįmanoma pašalinti. *Taisomi* – naudojami daugiau nei 1 kartą po sugedimo. Taisomas įrenginys taip pat skirstomas pagal būsenas: *veikimo būseną*; *avarinio remonto būseną*; *planinio remonto būseną*. Viena iš svarbiausių techninių sąlygų atliekant tinkamą įrenginių eksploataciją yra *perspėjimų, periodinių, planinių darbų* atlikimas. Taisomų įrenginių veikimo ir atkūrimo trukmės aprašo *eksponentinis gedimų pasiskirstymo dėsnis*. Šiam dėsniui yra būdinga: kai gedimai yra atsitiktiniai ir priimta, jog staigus ir vidutinis gedimų skaičius (pagal lygius) laiko perioduose yra panašus. **Gedimo tikimybė**, kad įrenginys per laiką suges: $Q(t) = p(T_V < t)$, aprašoma formule:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (1.8)$$

čia N_0 – elektros įrenginių skaičius;

$n(t)$ – per laiką t sugedusių įrenginių skaičius.

Daugumą sugedusių elektros įrenginių galima pataisyti. Tačiau nuo tolimesnių galimų gedimų įrenginys nėra apsaugotas ar koku nors būdu nėra užtikrinamas negendamas. Eksploatuojamas įrenginys gali gesti daugybe kartų. Taisomų įrenginių esminis skirtumas nuo nepataisomų įrenginių – funkcijų skaičius. Nepataisomam įrenginiui aprašyti pakanka tik vienos paskirstymo funkcijos, o pataisomiems įrenginiams reikia mažiausiai dviejų dydžių.

1.4. Elektros skirstomojo tinklo patikimumo rodiklių analizė

Elektros energetinės sistemos patikimumo įvertinimas, naudojant patikimumo rodiklius, reiškia elektros (kaip paslaugos) ir elektros tinklo būklės nustatymą (Zuliani ir kt., 2017). Patikimumo rodikliai naudojami elektros įrenginių ar elektros tinklo stebėsenai ir vertinimui atlikti. Pagal rodiklius galima įvertinti: tinklo ar įrenginių patikimumą veikti, gedimų dažnį, tinklo nusidėvėjimą, atjungimo trukmes, atjungimų dažnį, atkūrimo laiką (Sucita ir kt., 2017; Kornatka, 2017). Patikimumo rodikliai

taikomi įvertinant: gedimų elektros energijos tiekimo prieinamumą, tęstinumą, veiksmingumą, sistemos patikimumą, paslaugų lygį (Voropai ir kt., 2013).

Atliekant elektros tinklo patikimumo skaičiavimus, yra išskiriami dviejų tipų patikimumo rodikliai: **pagrindiniai** ir **papildomi**. Patikimumui vertinti mokslininkai dažniausiai naudoja *pagrindinius* išplėstinius rodiklių rinkinius: *vartotojų skaičiaus*, *vidutinės apkrovos* ir *vartotojų nutraukimo kainos*, taikomus apkrovos mazgui (Liu ir kt., 2019; Jamshid, Abrar, 2020) (žr.1.6 lentelę). Šie rodikliai remiasi IEEE standartu (IEEE 1366TM, 2004), taikomi *i* apkrovos mazgui.

1.6 lentelė. Pagrindiniai patikimumą vertinantys rodikliai

Patikimumo rodiklio pavadinimas	Patikimumo rodiklio išraiška formule
Vidutinis gedimų dažnis	$\lambda_{si} = \sum_{i=1}^N \lambda_i, [\text{gedimai} \cdot \text{metai}^{-1}] \quad (1.9)$
Apkrovos mazgo vidutinė nutraukimo trukmė	$U_{si} = \sum_{i=1}^N \lambda_i r_i, [\text{valandos} \cdot \text{metai}^{-1}] \quad (1.10)$
Vidutinis kasmetinis apkrovos mazgo neveiksmumas	$r_{si} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} = \frac{U_{si}}{\lambda_{si}} [\text{valandos}] \quad (1.11)$
Vidutiniai energijos nuostoliai per metus	$LOE_{si} = U_{si} \cdot P_s \quad (1.12)$
Sudėtinis patikimumo modelis	$\lambda_i = \frac{\sum_{k=1}^U T_k}{U \cdot Y} \quad (1.13)$
	$\mu_i = \frac{8760 \cdot J}{\sum_{i=1}^J D_i} \quad (1.14)$
čia λ_{si} – apkrovos mazgo gedimų dažnis (gedimų skaičius / metus); r_{si} – atkūrimo laikas (valandų skaičius / gedimų skaičius); U_{si} – atsijungimo trukmė (valandų skaičius / metus); LOE_{si} – vidutiniai energijos nuostoliai per metus (kWh / m.); P_{si} – galia (kW).	

Minėti rodikliai pateikia kiekybinį patikimumo rodiklių matą visoje sistemoje (Zuliani, Lomi, 2017), o naudojamus kiekybinius sistemos rodiklius galima suskirstyti į: *istorinių rezultatų įvertinimą* ir *būsimų rezultatų numatymą*. Istoriniai duomenys ir statistika pateikia esamos sistemos būsenos patikimumo vertinimą, o būsimų rezultatų nustatymą šis vertinimas tik papildo.

Naudojant tik pagrindinius patikimumo rodiklius, būtų sunku įvertinti tinklo esamą techninę būklę, kadangi pavieniai rodiklių apskaičiavimai neapibūdina tinklo funkcionavimo ir tinklo padėties. Taip pat iš rezultatų ne visuomet galima įvertinti elektros tinklo funkcionavimą ir jo atitinkamą reakciją į įrangos ar tinklo gedimus, nutrukimus. Norint įvertinti sistemos gedimo ar nutraukimo rimtumą, reikšmingumą, reikia įtraukti išplėstinius rodiklių rinkinius (žr. 1.7 pav.): *tikimybinis*, *dažninius*, *vidutinės trukmės* ir *numatomuosius*.

Tikimybiniai rodikliai	Dažniniai rodikliai	Vidutinės trukmės rodikliai	Numatomieji rodikliai
- Gedimo tikimybė - Atkūrimo tikimybė - Darbo atstatymo tikimybė - Apkrovos netekimo tikimybė	- Vidutinis gedimų skaičius - Ilgų nutraukimų skaičius - Trumpų nutraukimų skaičius	- Vidutinis išdirbis iki gedimo - Vidutinis išdirbio laikas tarp gedimų - Vidutinė pataisymo trukmė	- nepatiktos elektros energijos kiekis (įvykus gedimui) - numatomas vidutinis gedimų skaičius, kai įvyksta gedimai
Apkrovos ir energijos suvartojimo rodikliai	Ilgų nutraukimų rodikliai	Kiti rodikliai	Nepatiktos elektros energijos rodiklis
Vidutinis sistemos tiekimas, nutraukimas ir trukmė: - ASAI - ASIFI Bazinės apkrovos nutraukimo rodikliai - ASIDI - AIT - ASUI - ACCI - AENS Generavimo adekvatumo rodikliai - LOLP - LOLE	Sistemos vidutinis nutraukimų dažnis ir trukmė: - SAIFI - SAIDI Vartotojų vidutinis nutraukimų dažnis ir trukmė: - CAIDI - CAIFI - CTAIDI - CEMI_n - CEMSMI_n	Trumpi elektros energijos persiuntimo nutraukimai - MAIFI - MAIFI_E - MAIFET_X - Galios kokybės - SARFI_X - SIARFI_X - SMARFI_X - STARFI_X	- EENS - ENS - END

1.7 pav. Papildomų patikimumo rodiklių skirstymas

Dauguma pasaulio šalių, taip pat ir ES, naudoja tinklo vidutinio vartotojo rodiklių sistemą, kurios pagrindą sudaro amerikietiški patikimumą vertinantys rodikliai, įsitvirtinę Nacionalinės energetikos reguliavimo tarybos (VERT) NERC (angl. *North American Electric Reliability Council*) praktikoje. Papildomi rodikliai patvirtinti IEEE 1366-2003 standartu. Išsami taikomų ES šalyse papildomų rodiklių analizė pateikta 2 priede.

ES šalys dažniausiai naudoja: SAIDI, SAIFI, MAIFI, CAIDI, ENS; AIT papildomus patikimumą vertinančius rodiklius (Sekhar ir kt., 2016; Zuliani ir kt., 2017). Jų panaudojimas yra reglamentuotas ir patvirtintas kiekvienoje šalyje atskirai, atsižvelgiant į tinklų technines charakteristikas.

1.7 lentelė. Papildomų patikimumo rodiklių formulės

Rodikliai	Formulės	Formulės
SAIFI	$= \frac{(\text{nutrauktų el. vartotojų skaičius} \cdot \text{laikas})}{(\sum \text{vartotojų})}$	$= \frac{\sum t \cdot N}{\sum N} \quad (1.15)$
SAIDI	$= \frac{(\text{suminis laikas nutrauktų vartotojų laikas})}{(\sum \text{vartotojų})}$	$= \frac{\sum UN}{\sum N} \quad (1.16)$
CAIDI	$= \frac{(\text{vartotojų nutraukimo laikas})}{(\sum \text{vartotojų})}$	$= \frac{\sum UN}{\sum AN} \quad (1.17)$
ASAI	$= \frac{(\text{vartotojų valandos, kai buvo galimas tiekimas})}{(\text{vartotojų el. energijos paklausa [val.]})}$	$= \frac{\sum N \cdot 8760 - \sum UN}{\sum N \cdot 8760} \quad (1.18)$
ASUI	$= \frac{(\text{elektros energijos tiekimas valandomis})}{(\text{vartotojų el. energijos paklausa [val.]})}$	$= 1 - \text{ASAI} \quad (1.19)$

Šie rodikliai naudojami vertinant: elektros energetinės sistemos, elektros skirstomojo tinklo ar jo dalies, pastovių, apkrovos mazgų patikimumą (Gaur ir kt., 2020). Taip pat leidžia įvertinti elektros tinklo būseną, nustatyti avarijos sudėtingumą, kai žinomos vidutinės elektros tinklo veikimo, gedimo ir remonto trukmės. Rodiklių rezultatai parodo sistemos galimybes tiekti elektros energiją į apkrovos mazgus. Naudojantis šiais rodikliais galima įvertinti avarijos sudėtingumą. Šalyse taikomi skaičiavimai ir rezultatai skiriasi dėl skirtingų elektros tinklų topologijų, techninių parametrų, prijungtų vartotojų skaičiaus, įrenginių kiekio ir t. t. Apkrovos mazgo patikimumo priklausomybė nuo visos elektros sistemos patikimumo lygio yra labai reikšminga ir neatsiejama. Rodiklių tapatumo apkrovos mazgo ir sistemos lygių sugretinimas pateiktas 1.8 lentelėje.

1.8 lentelė. Apkrovos mazgo ir sistemos lygių patikimumo skaičiavimo rodikliai

Apkrovos mazgui taikomas patikimumo rodiklis	Sistemos lygiui ir apkrovos mazgui taikomas patikimumo rodiklis
λ_{si} (gedimų skaičius / m.)	SAIFI (nutraukimų skaičius, tenkantis vienam vartotojui / m.)
r_{si} (val. / gedimų skaičius)	SAIDI (nutraukimų trukmė [min.], tenkanti vienam vartotojui / m.)
U_{si} (val. / m.)	CAIDI (val. / nutraukimai)
LOE_{si} (kWh / m.)	AENS (kWh vartotojui / m.)

Europos Sąjungos šalyse nėra bendro sutarimo, kaip skaičiuoti patikimumą pagal numatytuosius ir nusistatytus rodiklius, skaičiavimo metodikos. *Pavyzdžiui:* Austrija naudoja AISI, ASIFI (jie įvertinami pagal vardinę galią), o CAIDI ir ENS naudojami kaip papildomi tiekimo tęstinumo rodikliai; Čekija pateikia AIT neplanuotiems nutraukimams vertes (neįskaitant išskirtinių įvykių). Skaičiavimai atliekami aritmetinio vidurkio metodika. Suomija neįvertina SAIFI ir SAIDI be išskirtinių įvykių. Graikijoje paskirstymo tinklas yra aukštos įtampos, todėl SAIFI ir SAIDI metodikos, kaip ir Lietuvoje, naudoja STO tinklo patikimumui vertinti. Airija nenaudoja AIT ir ENS perdavimo sistemos sutrikimams vertinti, ši šalis naudoja „System Minutes Lost“; Liuksemburgas skaičiavimams naudoja SAIDI ir SAIFI, kurie buvo koreguojami 2013 metais. Šių rodiklių vertės buvo pritaikytos atsižvelgiant į tai, kiek vartotojų mazgų buvo prijungta prie elektros tinklo. Slovakijos Respublika:

SAIDI ir SAIFI rodikliai nėra išskirstomi pagal įtampos lygius. Slovėnija: Tiekimo stebėsenos patikimumas žemos įtampos tinkle nėra vykdomas (2016 metų statistikos duomenys). Ispanija: SAIDI ir SAIFI šioje šalyje įvardijami kaip tiekimo tęstinumo įvertis. Vietoje šių rodiklių naudoja TIEPI, NIEPI rodiklius (šie rodikliai lygiaverčiai ASIDI ir ASIFI rodikliams). Norvegija: „*Nenumatytų įvykių*“, tokios sąvokos ši šalis neapibrėžia ir šiai sąvokai nenaudoja jokių indikatorius. Lenkija: neturi atskirų įtampos lygių indikatorius. Rumunija: be „*numatytų įvykių*“ sąvoką išreiškia kaip visus įvykius, už kuriuos yra atsakingas yra operatorius, neįskaitant oro sąlygų sukeltų įvykių, ar kaip „*kiti įvykiai*“ įvardijamus įvykius. Rodiklių tikslumo išraiška priklauso nuo taikomų matematinių metodų, rezultatų tikslumo.

Patikimumo vertinimas, taikant patikimumo rodiklius, priklauso nuo ES šalių trumpųjų ir ilgų nutraukimų vertinimo (Carlos, Rodriguez, 2018). Rezultatų patikimumui didelę įtaką turi duomenų patikimumas, vedama statistika, parinkta vertinimo ir skaičiavimo metodika, metodų funkcionalumas nustatyti realią elektros tinklo būseną. Patikimumo rodikliai turi būti parenkami taip, kad patikimumo būklę ir raidą nusakytų visapusiškai, palygintinai ir iš esmės. Patikimumą galima apskaičiuoti ir vertinti įvairiais metodais ir metodikomis, priklausomai nuo tiriančiojo žinių багаžo, duomenų ir galimybių ištirti, apskaičiuoti ir įvertinti.

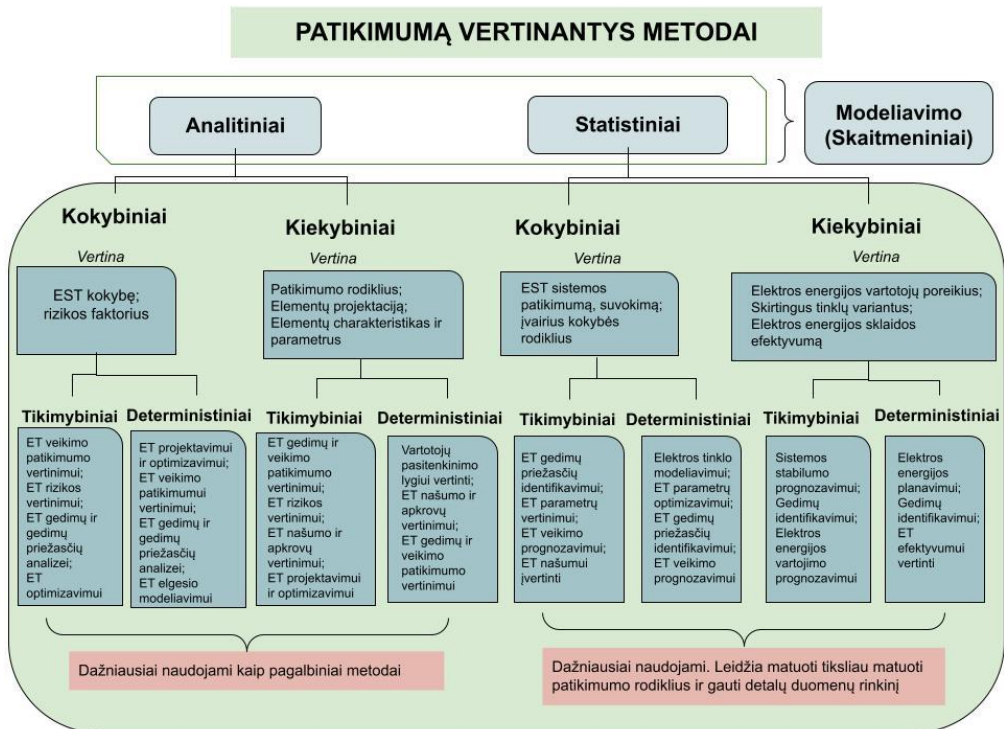
1.5. Elektros skirstomojo tinklo patikimumą vertinantys metodai

Patikimumo analizė yra svarbi proceso dalis, siekiant suprasti EST veikimo principą, jo techninę būklę, kai jį veikia skirtingi darbo režimai, ekstremalios sąlygos, įvertinant jo galimybes dirbti nepertraukiamai. EST patikimumui vertinti, apskaičiuoti ir prognozuoti yra naudojama daugybė skaičiavimo metodų ir metodikų (Akhikpemelo ir kt., 2016; Sekhar ir kt., 2016; Parol ir kt., 2022). ES šalių EST operatoriai iki šiol naudoja skirtingas duomenų bazes, skaičiavimams ir vertinimams taikomus metodus (Gono ir kt., 2011). Nėra apibrėžtumo dėl tinkamiausio metodo naudojimo, kuris būtų tinkamas naudoti visose ES šalyse ir kuris tikėtų visiems EST ir juose ar šalia jų vykstantiems procesams įvertinti (Baublys, 2008). Vertinant EST būsenas, darbo režimus, reikalinga informacija apie visus ir kartu atskirą įrenginį dėl atliekamų sistemos modeliavimų, skaičiavimų ir įverčių, siekiant nenukrypti nuo realių situacijų ir tinklo realios būsenos įverčio.

Metodų skirstymas priklauso nuo jų galimybių atlikti: vertinimus, skaičiavimus, modeliavimus, rezultatų pateikimą. Diagnostikai, gedimų paieškai ir jų likvidavimui, skirtingam darbo režimui gali būti taikomi skirtingi patikimumo vertinimo metodai. Skaičiavimo modelis ir taikoma metodika kiek įmanoma turi būti paprasti, tačiau kartu įgalūs ir tikslūs fiksuoti ir įvertinti gedimus, jiems įtaką turinčius veiksnius ir tikėtinas elektros tinklo nutraukimo rizikas. Tik suvokus modelį ir jo ribotumo lygį, galima teisingai interpretuoti rezultatus, jų nefetėšuojuant (Čekanavičius, Murauskas, 2009).

Metodai skirstomi į **analitinius**, **statistinius** ir **skaitmeninius** (žr. 1.8 pav.). Visi metodai gali būti *kokybiniai* ir *kiekybiniai*, jie dar skirstomi į *tikimybinis* ir *deterministinius*. Metodai skiriasi savo: logika, sudėtingumu, specifika ir galimybėmis apskaičiuoti bei įvertinti elektros skirstomojo tinklo patikimumą. **Kokybiniai** vertina

EST kokybę arba įvertina rizikos faktorius, jie labiau subjektyvūs, remiasi ekspertų nuomone ir patirtimi, kokybinių charakteristikų vertinimu. **Kiekybiniai** metodai remiasi statistiniais duomenimis, matematiniais skaičiavimais ir analizėmis. Naudoja tikslus matavimus ir modelius, remiasi matematinėmis formulėmis ir algoritmais. Skirti matuoti, analizuoti ir prognozuoti elektros tinklo patikimumą, atsižvelgiant į vertinamuosius parametrus ir identifikuoti patobulinimo galimybes.



1.8 pav. Patikimumą vertinančių metodų sisteminė analizė

Patikimumą vertinantys metodai gali būti skirstomi pagal: darbo režimą (normalus darbo režimas, avarinis režimas, abu režimai kartu); priežasčių analizę (FTA, RCA, 5-Why, FMEA); tinklo struktūrą (dydį, topologiją, lokaciją); energijos tiekimą; vertinimo tikslą; patikimumo standartą ir pan. Pagrindiniai patikimumą vertinantys kriterijai pavaizduoti 1.9 paveiksle.



1.9 pav. Pagrindiniai patikimumą vertinantys kriterijai

Elektros tinklo topologija, jo dydis ir geografinė padėtis, tinklo techninių duomenų patikimumas, tiksli gedimų registracija, tinkamos skaičiavimo metodikos parinkimas ir taikymas gali padėti priimti optimalias problemų sprendimų strategijas, įvertinti reikšmingiausius tinklo segmentus, didžiausias tinklo ar mazgų apkrovas, elektros tinklo būklę ir patikimumą.

1.5.1. Pasiskirstymo dėsniai

Elektros sistemose įdiegiami įrenginiai yra įvairaus pobūdžio, konstrukcijų, įvairiai išsidėstę. Patikimumo skaičiavimams modeliuoti, įvairiems gedimų srauto parametrams (įsidirbimo periodas, normalaus darbo periodas, intensyvaus dilimo periodas) naudojami *pasiskirstymo dėsniai*.

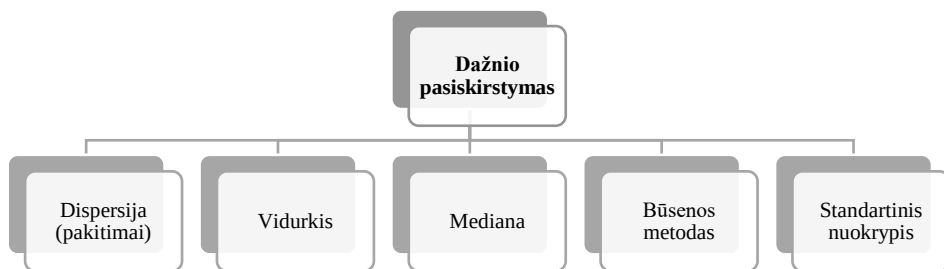
Dažniausiai patikimumui vertinti ir skaičiuoti naudojamos tikimybių pasiskirstymo funkcijos (žr. 1.10 pav.) (gedimų pasiskirstymo dėsniai): normalusis (*Gauso*) (Edimu, 2011); Veibulo (Sindaravičius, 2019); gama; eksponentinis; tikimybinis (Hughes, 2019); Puasono skirstinys (retų įvykių skirstinys); lognormalusis; Reilėjaus pasiskirstymo dėsnis. Šie dėsniai apibūdina atsitiktinio dydžio tikimybės skirstinį (kitimo pobūdį) (Brown, 2009; Gečys, 2011).

Analizuojant duomenis, juos tikslinga suskirstyti grupėmis, apskaičiuoti įvykių skaičių kiekvienoje grupėje. O pačios grupės sudaromos pagal kiekybines charakteristikas (atsijungimo laiką). Grupės – klasės, skaičius kiekvienos grupės – dažnis. Klasės gali būti ir intervalinės.

Tikimybės						
Atsitiktinis kintamasis	Tankio funkcija	Eksponentinis pasiskirstymas	Tikimybių pasiskirstymas	Binominis pasiskirstymas	Puasono pasiskirstymas	Normalusis pasiskirstymas

1.10 pav. Tikimybių pasiskirstymas vertinant EST patikimumą

Patikimumui vertinti naudojamos įvairios matematinės variacijos: klasifikavimas, dažniniai grafikai, vidurkiai, medianos, būsenų modeliavimas, standartinis nuokrypis, dispersijos (žr. 1.11 pav.).



1.11 pav. Dažnio pasiskirstymas vertinant EST patikimumą

Įrenginių patikimumo charakteristikų apskaičiavimo tikslumas priklauso nuo: stebimų objektų skaičiaus, jų imties (Navickas, 2007; Chowdhury, Koval, 2009). 1.9 lentelėje pateikiama paskirstymo dėsnų analizė, naudojama elektros tinklo patikimumui vertinti.

1.9 lentelė. Pasiskirstymo dėsnų analizė

Pasiskirstymo dėsnio pavadinimas	Naudojama formulė / formulės	Išskirtinės savybės
Normalusis pasiskirstymas (Gauso)	$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(t-\mu)^2/\sigma^2}$	Plačiai naudojamas, bendros paskirties skirstinys. Naudojamas tikimybinei tankio funkcijai išreikšti.
Veibulo pasiskirstymas	$\lambda(t) = \lambda(t)^{a-1}$	Naudojamas gedimų intensyvumo kitimui aprašyti, dažniausiai priklausomas nuo eksploatacijos trukmės.
Eksponentinis pasiskirstymas	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	Nusako įrenginio ar sistemos veikimo tikimybę, taisomų įrenginių veikimo ir atkūrimo trukmei aprašyti, sudėtingoms ir remontuojamoms sistemoms, gedimams apibūdinti, kai faktinis gedimų pasiskirstymo dėsnis nežinomas.
Puasono skirstinys	$P(x) = \frac{e^{-\mu} \mu^x}{x!}$	Norint įvertinti tikimybę, kad per kažkurį laiką įvyks x gedimų. Naudojamas retiems įvykiams modeliuoti.
Tikimybė skirstinio funkcija	$f(t) = \frac{1}{a} e^{-\frac{t}{a}}$	Tikimybė rodo, kad elementas veiks tam tikrą laiką be gedimų, nurodyma laiko ir norimo patikimumo vertę.
Gama skirstinys	$R(T_\gamma) = 1 - F(T_\gamma)$ $= 1 - \int_0^{T_\gamma} f(t) dt = \frac{\gamma}{100}$	Nepataisomiems įrenginiams. Taisymo trukmei ir planinio išjungimo trukmei aprašyti.

čia a – pasiskirstymo formos parametras;
 μ – tikėtina kintamoji reikšmė per laikotarpį t ;
 N – minimalus stebimų objektų skaičius, vidutiniam dydžiui t_{vid} nustatomas priklausomai nuo santykinės įvertinimo paklaidos δ ir pasikliautinumo tikimybės β .

Šie pasiskirstymo dėsniai gali atlikti realių gedimų srauto duomenų patikimumo įvertinimą, prognozuoti patikimumą ir įvertinti riziką. Tinkamo pasiskirstymo dėsnio pasirinkimas priklauso nuo turimų duomenų ir jų charakteristikų, analizės tikslų.

1.5.2. Analitinių ir statistinių metodų elektros skirstomojo tinklo patikimumui vertinti apžvalga

Elektros paskirstymo sistemų patikimumo vertinimas atliekamas dviem metodais: **analizės** (*analitiniai*, kitaip *matematiniai modeliai*) (Kapourchali, ir kt., 2013; Kapourchali ir kt., 2018; Sepehry et. al., 2018) ir **modeliavimo, skaitmeniniai** (*statistinės analizės*, kitaip *imitavimo modeliai*) (Liu ir kt., 2008).

Analitinis metodas. Analitinis metodas kilo iš gedimų režimų ir poveikio analizės, paremtas analitine skaičiavimo technika, tikimybiniais matematiniais modeliavimais (Kapourchali ir kt., 2018; Sepehry ir kt., 2018). Šiuo metodu siekiama, kad būtų atrasti skaitiniai, rodikliniai sprendimo būdai. O jo paties galimybės leidžia apibūdinti pačią sistemą, derinti skirtingas sistemų būsenas. Mokslininkai siūlo daugybę patobulintų algoritmų, siekiant padidinti skaičiavimo efektyvumą (Hernando-Gil, Ilie, Djokic, 2016; Nahman, Perić, 2017) ir pan. Šio metodo rezultatai priklauso nuo duomenų kokybės, jų tikslumo.

Statistinis metodas. Šis metodas dar kitaip vadinamas *imitaciniu modeliavimu* (Liu ir kt., 2008; Sepehry ir kt., 2018; Konstantinavičiūtė ir kt., 2019). Metodas skirtas parametrų pasikliautiniams intervalams apskaičiuoti. Šiam metodui būdingi *daugiakriteriniai* (dar kitaip vadinami *daugiatiksliai*) sprendimai, t. y. naudojami keli rodikliai. Metodo trūkumai: daugiakriteriniai metodai nevertina vienos alternatyvos, statistiniai sprendiniai nelabai tiksliai atspindi realų analizuojamą objektą. Sprendimo laikas taip pat pasižymi vienu iš šio metodo trūkumų. Tačiau laiko sprendimo trūkumą iš dalies išsprendė šiuolaikinės skaičiavimo priemonės ir modeliavimų paketai. Atlikus statistinio ir analitinio metodų mokslinę analizę, susisteminta apžvalga pateikta 1.10 lentelėje.

1.10 lentelė. Analitinio ir statistinio metodų palyginimas

Lyginamasis rodiklis	Analitinis metodas	+, -	Statistinis metodas	+, -
Skaiciavimų paprastumas	Aibė lygčių ir ryšių tarp matematinių kintamųjų.		Atliekami su kiekybiniais duomenimis.	
Skaiciavimo laikas	Sprendimo laikas labai trumpas. Tai priklauso ir nuo imties, grupių ir pan.	+	Sprendimo laikas gana ilgas. Programose, kuriose reikalingi keli patikimumo vertinimai.	-
Kuriama, taikoma tinklo sistema	Labai supaprastina analizuojamą sistemą ir gali būti, kad prieinama prie nerealios sistemos modelio.	-	Šiuo metodu galima apimti ir imituoti, atkurti visas analizuojamo elektros tinklo charakteristikas ir funkcijas, sistemos charakteristikas. Šis metodas geriau apibūdina praktinį sistemos elgesį.	+
Skaiciavimo rezultatų patikimumas	Teikia tuos pačius tai pačiai sistemai, t. y. vienai sistemai priskiriami tik įvesties duomenys. Rezultatai gana riboti, t. y. iki vidutinių verčių ir standartinių nuokrypių.	-	Priklauso nuo tikslumo, kai duomenys įvedami modeliavimo pradžioje.	+
Gautų rezultatų vertinimas, analizė	Įvesties patikimumo rodikliai yra išreiškiami paprastomis vidutinėmis vertėmis ir standartiniais nuokrypiais. Galiausiai pateikiami tik bendriniai rezultatai, t. y. duoda tą patį skaitinį rezultatą tai pačiai	-	Leidžia atlikti išsamesnį vertinimą. Įvesties patikimumo rodikliai yra išreiškiami tikimybiniais skirstiniais. Rezultatas priklauso nuo naudojamo atsitiktinių duomenų ir imitacijų skaičiaus.	+

Lyginamasis rodiklis	Analitinis metodas	+, -	Statistinis metodas	+, -
	sistemai, tam pačiam modeliui, tam pačiam įvesties duomenų rinkiniui. O tai reiškia, kad ne visuomet yra tinkama įvertinti tinklo sistemą informacija.		Suteikia platų išvesties parametų diapazoną, įskaitant tikimybės tankio funkcijas ir jų atitinkamus momentus. Aprašomasis modelis kaip rezultatą pateikia funkcionavimo įverčių aibę. Didesnės vertės nustatomos didesniu tikslumu.	
Sudėtingų sistemų aprašymas	Labai retai kada galima ir pavyksta aprašyti sudėtingą sistemą.	-	Tinkamai suvedus duomenis ir pasirinkus modeliavimą, dažniausiai pavyksta aprašyti sudėtingas sistemas.	+
Realios sistemos aprašymo galimybės	Matematiškai sugebėti adekvačiai aprašyti realią sistemą pakankamai sudėtinga.	-	Sudaromas bet kokiai realiai sistemai.	+
Modeliuotojo kompetencijos	Modeliuotojui reikia labai daug žinių, kompetencijos sprendžiant ir išsprendžiant lygtis.		Reikalauja mažiau laiko ir pastangų sudaryti imitacinį modelį.	+

Analitinis ir statistiniai metodai turi savų privalumų ir trūkumų. Elektros įrenginių parametų sklaida yra įvairi ir atsitiktinė. Siekiant patikimesnių rezultatų ir tikslesnės analizės, analitinių ir statistinių metodų naudojimo derinimas gali papildyti vienas kitą. Šie metodai gali padėti identifikuoti galimus potencialius gedimus, nustatyti jų priežastis ir vertinti jų poveikį.

1.5.3. Metodų privalumų ir trūkumų analizė: svarbiausi kriterijai ir jų taikymas tyrimuose

Siekiant įvertinti EST patikimumą, reikalingi ne tik kiekybiniai, bet ir kokybiniai patikimi ir informatyvūs duomenys. Duomenims apdoroti naudojami patikimumą vertinantys metodai ir skaičiavimo metodikos. Keičiantis tinklo struktūrai, topologijai ir struktūros sudėtingumui, skaičiavimo metodai ir metodikos turi būti nuolatos tobulinami (Hernando-Gil ir kt., 2016; Nahman, Perić, 2017). 1.11 lentelėje pateikti mokslinėje literatūroje dažniausiai taikomi patikimumą vertinantys metodai. Metodų taikymo sritys, privalumai ir trūkumai atskleidžia metodų galimybes vertinti tinklą ir jo patikimumą turint tam tikrus vertinamuosius duomenis. Taip galima pagerinti elektros tinklo patikimumą, efektyvumą ir tiekimo kokybę, sumažinti gedimų trukmę.

1.11 lentelė. Analitiniai kiekybiniai ir kokybiniai patikimumą vertinantys metodai

Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
Kokybiniai			
Gedimų ir pasekmių analizė [FMEA] (Li ir kt., 2009; Sepehry ir kt., 2014; Sepehry ir kt., 2018; Hernando-Gil ir kt., 2016)	- Taikomas EST didelio masto, turintiems sudėtingas konfigūracijas; - Nustato, kaip ir kada galimi gedimai gali paveikti tinklo ar jo proceso funkcionalumą; - identifikuoja veiksmus, kurių reikia imtis, siekiant sumažinti arba pašalinti galimus gedimus; - įvertina tikėtinus gedimų režimus;	- Sisteminis gedimų identifikavimas ir vertinimo procesas; - išsamiai išnagrinėja skirtingus gedimų scenarijus; - identifikuoja gedimų priežastis; - objektyviai vertina potencialių gedimų poveikį ir tikimybę, grindžiant kiekybiniais duomenimis.	- Reikalauja daug laiko; - reikalinga speciali programa ir papildomi ištekliai; - didelis rezultatų netikslumas; - neišsamus įvertinimas; - nepakankama dinamika (metodas yra statinis ir negali atsižvelgti į skirtingus scenarijus ar aplinkybių dinamiškumą).

Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
	- įvertina poveikį apkrovos mazgams.		
<i>Kokybinių duomenų rinkimas ir analizė. Tinklo topologija yra pateikiama matricine išraiška.</i>			
Žaidimų teorija (Tisdell, 1990; Puškorius, 2009; Lu ir kt., 2014; Yassine, 2015; Ottesen ir kt. 2016; Cheng ir kt., 2019; He ir kt., 2020.)	- sprendžia EM optimizavimo sprendimų priėmimo problemas; - subalansuoja naudingą duomenų naudojimą ir asmenų privatumą nereguliuojamuose išmaniuosiuose tinkluose; - vertina elektros įrenginių gedimo intensyvumo ir neveikimą; - galima prognozuoti dalyvių veiksmus ir pasirinkti optimalias strategijas; - žaidimų teorija yra pagrįsta matematika, todėl ji yra labai tikslus ir objektyvus metodas.	- Žaidimų teorija nagrinėja konfliktines situacijas; - analizuoja ir tiria įvairiausius galimus sprendimų variantus, esant galimybei pasirinkti vieną iš palankiausių; - padeda identifikuoti tinkamas strategijas ir prognozuoti kitų dalyvių veiksmus, kurie gali paveikti galutinius rezultatus; - pasirenkama tuomet, kai susiduria ir veikia dvi arba daugiau suinteresuotų grupių, turinčių skirtingus tikslus; - pateikia tam tikras rekomendacijas, kaip dalyviai turi / turėtų elgtis; - siekiama numatyti pavienių žaidėjų strategijų rezultatus, kai jie neturi visos informacijos apie kitų žaidėjų elgesį; - sprendžiant elektros sistemos valdymo klausimus; - leidžia analizuoti sudėtingas situacijas, kuriose yra daugelis dalyvių ir sprendimų; - leidžia prognozuoti kiekvieno dalyvio veiksmus ir numatyti galutinius rezultatus; - yra lengvai suprantamas ir gali būti panaudojamas praktiškai.	- Modeliavimo supaprastinimas: dažnai, siekiant analizuoti situacijas, yra būtina supaprastinti realiąją situaciją, kad būtų galima ją išanalizuoti; - neapibrėžtumas: kartais yra sunku numatyti, kokie sprendimai bus priimti kitų dalyvių, o tai gali turėti įtakos galutiniams rezultatams; - kompensacija: žaidimų teorija nesprendžia problemos, susijusios su kompensacijos teikimu; - modelių sudėtingumas: kai situacijos yra labai sudėtingos, modeliavimas ir sprendimų priėmimas gali būti labai sudėtingas ir sunkiai įgyvendinamas; - tikimybių vertinimas: kai kuriais atvejais yra sunku įvertinti tikimybes, susijusias su tam tikrais įvykiais ar sprendimais.
<i>Naudoja matematinius modelius ir algoritmus, apima žaidimo medžius, strategijų rinkimus, tikimybių skaičiavimus ir kt.</i>			
Hierarchinių lygių [AHP] (Billinton, Wenyan, 1994; Billinton, 1996; Xie, Wang, 2004; Karimzadeh ir kt., 2011; Tripathi, Sisodia, 2014;	- Suskirstyti sprendimų priėmimo procesą į hierarchinius lygius, kad būtų lengviau apdoroti ir suprasti informaciją; - priimti sudėtingus sprendimus, kai yra daug kriterijų arba faktorių; - leidžia struktūrizuoti sprendimus ir jų priėmimo procesą; - tinklui zonuoti;	- Padeda pasirinkti geriausią sprendimą iš kelių alternatyvų, įvertinus kiekvienos alternatyvos svarbą, atsižvelgiant į daugiakriterinius vertinimus; - universalus ir gali būti pritaikytas daugybei skirtingų sprendimų priėmimo situacijų;	- Dideliems EST patikimumo analizės projektams gali būti sunku sukurti tinkamą hierarchinę struktūrą ir priimti tinkamus sprendimus; - sunku nustatyti tinkamus svorio koeficientus, kas gali lemti subjektyvias nuostatas ir sprendimų netikslumą; - mažų grandinių ar elementų nepakankamumas pernelyg pabrėžiamas, didesnių

Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
Qamber, 2019)	- vertina mazgų pasiskirstymą, skirtingose zonose, išskiriant tinklą pagal vartotojų patikimumo kategorijas.	- nustatyti svarbiausius elementus ar grandines ir nustatyti jų reikšmę; - nustatyti prioritetus remiantis įvairiais kriterijais, pvz., patikimumu, saugumu, ekonomiškumu ir kt.; - padidinti ir pagreitinti sprendimų priėmimo procesų efektyvumą.	- grandinių ar elementų įtaka yra mažai vertinama; - sudėtingas metodo taikymas; - reikalauja specialių žinių ir įgūdžių.
<i>Matematinis metodas, naudojant daugiakriterinę analizę. Šis metodas naudoja lyginamąjį matricos modelį, kuriame matavimai atliekami tarp skirtingų parinktų variantų. Jis taip pat naudoja skirtingų matų (svarbiųjų kriterijų) įvertinimų reitingų skalę, kad būtų galima palyginti skirtingus kriterijus ir pasirinkti geriausią sprendimą.</i>			
Maksimalaus srauto (Armbruster ir kt., 2005; Andrew ir kt., 2014; Gaber ir kt., 2016)	- Naudojamas srauto problemoms spęsti grafuose; - EST patikimumui ir efektyvumui vertinti; - nustatyti, kaip tinklas veiks, jeigu dalis tinklo bus sugedusi ir didžioji dalis neturės elektros energijos tiekimo; - galingas algoritmas: geba spręsti sudėtingas problemas, atlikti sudėtingus skaičiavimus.	- Lengvai pritaikomas kilus įvairioms problemoms, kurios gali būti išreikštos grafiniu formatu; - gali būti taikomas dideliems grafams; - patikimas algoritmas, kuris gali garantuoti, kad bus surastas didžiausias srautas per grafą; - plačiai naudojamas praktikoje, kad būtų sprendžiamos įvairios problemos.	- Algoritmas netinka fizinėms sąlygoms ir incidentų sekoms imituoti; - ne visada gali užtikrinti visišką tikslumą; - esant kai kurioms situacijoms gali būti sunku apibrėžti tinkamo dydžio grafą arba jo reikšmės gali būti nepakankamai tiksliai žinomos, o tai gali lemti netikslumus ir klaidų atsiradimą sprendžiant problemą; - algoritmas gali reikalauti didelio skaičiaus operacijų, ypač jei sprendžiama sudėtinga problema; - ilgas sprendimo laikas; - didelė skaičiavimų sąnaudų suma; - skirtas spręsti tik taisyklingai nukreiptų srautų problemas; - nėra tinkamas sprendžiant problemas, susijusias su nekeliaujančiais srautais; - sudėtingos problemos gali reikalauti daugiau nei vieno maksimalaus srauto metodo taikymo, kad būtų galima rasti optimalų sprendimą; - galimi keletas sprendimų, kurie yra vienodai optimalūs.
<i>Remiasi matematiniais modeliais ir algoritmais.</i>			

Analitiniai metodai, vertinantys EST patikimumą, apima matematinę ir teorinę analizių interpretaciją, kuri remiasi moksline teorija, modeliavimu ir skaičiavimu. Šie metodai remiasi matematinėmis statistikomis, tikimybių teorija (Pilkas, 2011) ir kitomis teorijomis, siekiant sukurti modelį, kuris atitiktų realias situacijas. Statistiniai metodai, vertinantys elektros tinklo patikimumą, apima statistinės analizės ir matematinio modeliavimo metodus, kurie remiasi empiriniais duomenimis ir

tikimybės teorijos principais. Gauti rezultatai yra matematinės išraiškos arba teorinio pobūdžio. 1.12 lentelėje pateikiama statistinių kiekybinių patikimumo skaičiavimo metodų apžvalga ir jų palyginimas.

1.12 lentelė. Statistiniai kiekybiniai patikimumo skaičiavimo ir vertinimo metodai

Nr.	Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
Kiekybiniai				
1.	Gedimų medžio analizė [FTA]	- Vertina įvykių tikimybę ir jų padarinius EST; - nustato skirtingas galimas tinklų gedimų eigas ir kokia tikimybė, kad tam tikros eigos įvyks; - nagrinėjami įvykiai, kurie gali atsirasti po sistemos gedimo; - prognozuoja sistemos elgesį; - gedimų priežastims nustatyti, jų ryšiams sudaryti.	- Metodas gali aptikti naujus gedimus, kurie nebuvo identifikuoti; - greita analizė; - įvertina potencialius gedimus; - analizuoja gedimų simptomus; - identifikuoja kritines sistemas, jų komponentus.	- Metodas subjektyvus, kadangi analizuojami tik pastebimi ar gerai žinomi gedimai; - tik kokybinis vertinimas (vertina atvejus kokybine prasme); - sudėtinga analizė; - reikalinga speciali programinė įranga; - nenurodo gedimų prioritetų; - neišskiria gedimų, kurie turi didžiausią tinklų atjungimo priežastį; - didelės laiko sąnaudos; - turi trūkumų dėl gedimų aptikimo netikslumų.
<i>Matematiniai modeliavimo ir skaičiavimo metodai; kiekybinė analizė remiasi kiekybinių duomenų rinkimu ir analizavimu; naudojami grafiniai medžiai, vaizduojantys įvykių seką ir jų tikimybę, siekiant nustatyti sistemos reakciją į tam tikrą įvykį. Reikalinga ekspertų nuomonė įvertinant ir atliekant išsamią gedimų analizę.</i>				
2.	Gedimų pasekmių įvertinimas [FCA] (Bie, Li, 2011)	- Vertinti elektros gedimų skaičių ir trukmę; - gedimų pasekmėms įvertinti; - atskleisti ryšius tarp gedimų priežasčių ir identifikuoti patikimumo problemas.	- Identifikuoja kritinius tinklo segmentus; - koncentruojasi į pagrindines EST dalis ir koncentruojasi į patikimumo gerinimą; - prognozuoja pasekmes; - parodo sistemos sudėtingumą, nustatant pagrindines elementų grupes.	- Didelis skaičiavimų kiekis; - sudėtinga duomenų struktūra; - laiko ir išteklių sąnaudos; - reikalingas kruopštumas ir tinkamas duomenų paruošimas; - subjektyvumas.
<i>Gali būti naudojamas ir kokybiniam įvertinimams (priklausomai nuo duomenų). Grindžiamas matematiniais konceptais, remiasi formaliu duomenų kontekstu, kuris gali būti išreiškiamas matrica. Elektros tinklas yra suskirstomas į zonas, išskiriami jungikliai (rankiniai, automatiniai).</i>				
3.	Pagrindinių priežasčių analizė [RCA] (Moloi, Abe, 2019)	- Identifikuoti ir išnagrinėti pagrindines elektros skirstomojo tinklo ar elektros sistemos elemento gedimo priežastis; - siekiant nustatyti gedimus ir juos pašalinant.	- Leidžia tinkamai ir efektyviai išspręsti problemą, ją identifikuoti.	- Laikas ir resursai; - reikia specifinių žinių ir įgūdžių; - reikalingas kvalifikuotas personalas; - reikia daug duomenų, norint nustatyti tikrąją gedimo priežastį.
<i>Atliekama medžio analizė su elektros tinklo gedimais; atliekama kiekybinė ir kokybinė analizė. Naudojamas su kitais metodais: FMEA; priežasčių ir pasekmių diagnostavimas.</i>				
4.	Būsenų erdvės metodas	- Sistemoms elgsenai nustatyti ir prognozuoti, kai ją veikia įvairios	- Atskleidžia sąsajas tarp skirtingų sistemos komponentų ir procesų; - padeda suprasti, kaip skirtingi veiksniai turi įtakos EST	- Labai abstraktus ir sudėtingas; - reikalauja specifinių žinių ir įgūdžių; - reikalauja laiko resursų.

Nr.	Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
		aplinkos sąlygos ir gedimai.	patikimumui ir kaip juos geriausiai valdyti; - atlieka išsamias ir struktūrizuotas analizes.	
<i>Grafinis metodas, matematinis modeliavimo metodas; sistemos dinamika yra aprašoma būsenų erdveje, kurią sudaro būsenų kintamieji ir jų išvestinės; loginių schemų sudarymas ir analizė. Naudojamas su kitais metodais: FTA, ETA.</i>				
5.	Patikimumo blokinė diagrama [RBD] (Wadi, Elmasry, 2022)	- Vizualizuoti EST tinklo patikimumą; - identifikuoti elektros tinklo komponentus, kurie gali turėti didžiausią poveikį elektros tinklo patikimumui; - vizualizuoti skirtingus tinklo komponentus, kaip jie veikia kartu, ir tarpusavio ryšius, kaip paveikiamas elektros tinklo patikimumas; - nustatyti galimas gedimo priežastis; - apskaičiuoti sistemos patikimumą.	- Paprastas; - lengvai suprantamas.	- Laiko ir išteklių reikalaujantis metodas; - gali būti netikslus, kadangi nepaiso, kaip komponentai sujungti; - negali įtraukti įvairių gedimų priežasčių; - reikia tinkamo informacijos ir duomenų prieinamumo; - sudėtingas; - nesprendžia sudėtingų sistemų.
<i>Grafinis modeliavimas, susideda iš blokų ir linijų, pavaizduoja sistemų elementų ryšius, jų patikimumo lygmenis; matematinės ir statistinės analizės; remiasi matematine logika ir apskaičiavimais.</i>				
6.	Patikimumas Prieinamumas Priežiūra (RAM) (Talukdar, Dekka, 2021)	- Vertina sistemos patikimumo, prieinamumo ir priežiūros galimybes; - identifikuoja kritines sistemas ir elementus, kad būtų galima priimti sprendimus dėl jų gerinimo; - nustato pažeidžiamus elementus, kurie gali sukelti gedimus.	- Tiksliai įvertina tinklo patikimumą, prieinamumą, priežiūrą planuojant tinklo atsargines dalis ir remontą; - patikimas ir patvirtintas būdas.	- Laiko ir išteklių reikalaujantis procesas; - reikalauja išsamios informacijos apie tinklo komponentų patikimumą, prieinamumą, priežiūrą; - reikia didelio kiekio duomenų; - reikia programinės įrangos; - subjektyvumas ir galimos klaidos.
<i>Sistėmingas būdas; statistinė analizė; modeliavimas ir skaičiavimas.</i>				
7.	Veibulo modelis (Adil, Khan, 2015)	- Naudojamas EST analizuoti ir prognozuoti; - prognozuoti ateities gedimus, gedimų dažnį ir trukmę, nustatant, kiek laiko praeis, kol ateityje atsiras kitas gedimas; - nustatyti gedimų riziką, nustatant gedimų galimybes.	- Galimybė analizuoti gedimų istoriją (nustatant, kodėl ir kada atsirado gedimai); - padėti nustatyti tinklo komponentų gedimų priežastis; - prognozavimo galimybė: prognozuoti ateities gedimus; - padėti nustatyti gedimų tikimybę ir prognozuoti gedimus.	- Tikslumo nebuvimas: jeigu nepakanka duomenų, arba duomenys netikslūs; - metodas gali būti ribotas, esant netolygiems duomenims; - neturint patirties metodas gali būti sunkiai interpretuojamas.
<i>Veibulo metodas remiasi tiesioginiais skaičiavimais naudojant matematinius modelius, kuriuose yra įtraukiami komponentų patikimumo duomenys ir tinklo topologija.</i>				
8.	Minimaliųjų pjūvių metodas; Minimaliųjų loginių klaidų	- Sistemų gedimų analizei atlikti; - nustatyti minimalų gedimų skaičių;	- Paprastas ir aiškus; - pakankamai mažai laiko užimantys skaičiavimai;	- Laiko ir resursų reikalaujantys skaičiavimai, kai norima įvertinti didelius

Nr.	Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
	metodas (Talukdar, Deka, 2021)	- nustatyti minimalius klaidų rinkinius, kurie gali sukelti sistemų gedimus arba sutrikimus; - nustatyti, kaip kiekvienas komponentas prisideda prie sistemos patikimumo. -	- leidžia nustatyti, kurie sistemos komponentai yra kritiniai; - pateikia rekomendacijas, kaip pagerinti sistemos patikimumą; - lengvai ir įgyvendinamas; - gali suteikti daugiau informacijos apie kritinių komponentų priklausomybes.	- ir sudėtingus elektros tinklus; - jautrus modeliavimo klaidoms ir netikslumams; - nėra tinkamas vertinti sistemos patikimumo poveikiui arba pažeidžiamumo atžvilgiu, kai yra daug ryšių ir įvykių; - negali tiksliai nustatyti pažeidimų tikimybes ar jų poveikį; - nesant pakankamai n elementų skaičiui – metodas neveiks; - neatspindi remonto laiko.
<i>Modelis pagrįstas prielaidomis, susijęs su statistiniu gedimų dažnio ir taisymo laiko pasiskirstymu. Matematinis modeliavimas, apskaičiuoti minimaliųjų pjūvių rinkinių ir identifikuoti kritinius komponentus; pagrįstas grafo teorija.</i>				

Pritaikius analitinius ir statistinius patikimumą vertinančius metodus, galima prognozuoti vartotojų poreikius, atsižvelgiant į galimybę pritaikyti elektros tiekimo sistemų infrastruktūrą, kas gali padėti elektros energijos tiekėjams geriau suprasti vartotojų poreikius, numatyti didėjančią elektros energijos vartotojų paklausą. Metodai taip pat naudojami atliekant rinkos tyrimus ir prognozuojant rinkos tendencijas. Tai padeda elektros tiekėjams suprasti rinkos poreikius ir reaguoti į rinkos pokyčius, kad būtų užtikrintas stabilus, patikimas energijos tiekimas. Tiek statistiniai, tiek analitiniai metodai gali būti derinami, kadangi jie gali papildyti vienas kitą.

Elektros sistemose įvykę gedimai yra atsitiktiniai. Aprašant atsitiktinumus simuliaciniu metodu, taikomi tikimybių teorijos ir statistikos metodai (Pilkauskas, 2011). Skaitmeniniai modeliavimai yra naudojami įvairioms tinklo funkcijoms tirti, vertinti, analizuoti ir simuliuoti procesus, prognozuoti jų veikimą. Skaitmeniniai metodai taip pat gali būti vertinami kiekybiškai ir kokybiškai, naudoti tiek kokybinius ir tiek kiekybinius duomenis. Šių metodų analizė pateikta 1.13 lentelėje.

1.13 lentelė. Skaitmeniniai kiekybiniai ir kokybiniai patikimumo skaičiavimo ir vertinimo metodai

Nr.	Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
Kiekybinis ir kokybinis				
1.	Markovo, [MCA] (Brown ir kt., 1996; Pylvanai ir kt., 2005; Yinglong, 2018; Li ir kt., 2014; Amini, ir kt., 2018; Skalny, 2014; Xiaochen, 2011)	- Nustatyti ir prognozuoti elektros sistemos būklę; - leidžia modeliuoti, tirti EST ir nustatyti tikėtinus gedimus, jų tikimybę, gedimo režimą; - tirti EST elementų veikimą ir neveikimą; - analizuoja, kaip sistema keisis ateityje; - naudojamas: didelėms sistemoms, kiekvienam	- Nustatyti, kokie tinklo elementų gedimai turi didžiausią poveikį tinklo patikimumui; - modeliavimo analizė yra labai tiksli; - metodas nesudėtingas, esant pastovioms būsenų sąlygoms, dažniausiai skaičiavimus atlikti yra pakankamai paprasta.	- Reikalauja didelės skaičiavimo galios, laiko; - metodika ribota, netinkama sudėtingiems modeliams ar situacijoms, kurios turi daug parametrų arba nenumatytų veiksmų;

Nr.	Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
		komponentui reikalingi atskiri gedimų rodikliai; - nustatomas kiekvienos maitinimo linijos būsenos perėjimo sąlyginis tikimybinis pasiskirstymas; - įvertina laiką, per kurį elementas buvo sutvarkytas; - vertina gedimų tikimybę, gedimų dažnį; - vertina laiką, per kurį elementas buvo sutvarkytas; - sistemų ir procesų dinamikos kaitos stebėjimas.		- metodas gali būti netikslus dėl duomenų informacijos trūkumo; - skaičiuojant dinamiškų sistemų sąlygas su daugybe būsenų, reikalingos matricinės diferencialinės lygtys; - sistema yra be atminties (t. y. atsitiktinių gedimų tikimybė yra tik esamos sistemos būsenos funkcija, nepaisant, kas įvyko prieš sistemai pereinant į darbinę poziciją); - sistema yra stacionari (perėjimo tikimybės tarp būsenų yra pastovios ir nesikeičia priklausomai nuo laiko); - atsiradus daugiau nei dviejų elementų gedimams, šis modelis negali įvertinti patikimumo; - kai sistemoje galimos dvi sąlygos, tuomet analizė tampa komplikuoja; - atsiradus daugiau nei dviejų elementų gedimams, negali įvertinti patikimumo; - sudėtinga taikyti skaičiavimus sudėtingoms sistemoms.
<i>Simuliacijos, statistinės analizės metodas, kuris remiasi tikimybėmis ir statistika; aprašo būsenų erdvės metodiką; sudaro logines schemas; modeliuoja; prognozuoja stochastines tikimybes; statistikos teorijos aprašomos naudojant iteracinį procesą, kitaip vadinamą Markovo grandinių kompiuterinį imitavimo metodu. Diskrečios Markovo grandinės charakterizuojamos kaip būsenų ir perėjimų tarp būsenų, atsirandančių atskirais laiko momentais, visuma. Tolydus procesas savo būsenas keičia atsitiktiniu laiko momentu.</i>				
2.	Monte Karlo (Yuan ir kt., 2005; Zhang ir kt., 2011; Brown 2009; Haakana ir kt., 2011; Liu, 2017; Liu, 2019; Xiaochen, 2011)	- Prognozuoti EST patikimumą, atsižvelgiant į skirtingus veiksniai; - kai labai sunku arba neįmanoma išspręsti uždavinio analitiniu būdu; - elektros skirstomojo tinklo patikimumui vertinti; - modeliuoti elementų būsenoms;	- Elektros tinklo veikimo simuliacija, atsižvelgiant į skirtingus veiksniai; - gaunamas tikėtinų rezultatų pasiskirstymas; - paprasta modeliuoti sistemų komponentų parametrus; - metodo efektyvumas, kai gedimo tikimybė pakankamai maža;	- Reikalauja daugybės simuliacijų, kad būtų pateikiami patikimi statistiniai rezultatai; - skaičiavimai užima daug laiko, norint gauti tikslus duomenis; reikalinga daugiametė analizė; - atsiradus klaidai, užima daugiau laiko

Nr.	Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
		- informatyvi patikimumo parametrų aibė; - siekiant labai patikimo rezultato; - apkrovoms, varžų būsenoms modeliuoti, gedimų tikimybės apskaičiuoti; vertina FVSI; LOLP; SAIFI; SAIDI; EENS; - atlieka didelio masto ir sudėtingų struktūrų, kompleksinių tinklų patikimumo analizę; - galima gauti rezultatų pasiskirstymą; - simuliaciniams metodams, juos lengvai pakeičiant sudėtingesniais (be išskirtinai didelių laiko sąnaudų); - galima lengvai modeliuoti komponentų parametrus kaip atsitiktinius dydžius, apibūdinamus tikimybių pasiskirstymo funkcijomis.	- apibūdina neapibrėžtas savybes; - išsami patikimumo rodiklių analizė; - nereikalingos sudėtingos matematinės išraiškos, generacijos; - realizacija gana paprasta; - modeliavimas fizinį tinklą paverčia patikimumą analizuojančiu tinklu, kuris paremtas nuosekliai ir lygiagrečiai jungtais elementais; - simuliacijos sugebėjimas paskirstyti galimus rezultatus, o ne laukiamą vertę; - lengvai modeliuojami komponentų parametrai kaip atsitiktiniai kintamieji, kuriems būdingos tikimybių pasiskirstymo funkcijos, o ne kaip pastovios reikšmės; - lengviau modeliuojamos sudėtingų sistemų būsenos.	- skaičiuoti, nei tai būtų galima atlikti analitiniu metodu (tai priklauso ir nuo įvesties duomenų skaičiaus); - netikslumas (dėl atsitiktinių variacijų rezultatų).
Skaitmeninis, pagrįstas statistinių pasiskirstymų brėžiniais; skaičiai generuojami atsitiktinai; statistinis modeliavimas ir gautų rezultatų apdorojimas statistiniais metodais.				
	Bayesian metodas (Nemati, Sant'Anna; 2016)	- Vertina sistemos patikimumą; - nustato patikimumo rodiklius: elektros tinklo gedimo tikimybę arba vidutinį laiką tarp gedimų.	- Gali naudoti ankstesnę patikimumo informaciją, nustatyti tikimybes ir prognozuoti elektros tinklo gedimus ateityje; - įtraukiami subjektyvūs vertinimai, atsižvelgiama į naujai pateikiamą informaciją, siekiant pagerinti patikimumą; - plastiškas ir gali būti pritaikytas įvairioms EST struktūroms ir situacijoms.	- Sudėtingas; - reikalauja specialių žinių ir įgūdžių; - didelis duomenų kiekis; - reikia programinių įrangų; - subjektyvumas ir klaidos gali turėti įtakos patikimumo prognozėms.
Statistinis, pagrįstas tikimybių teorija, sujungia realių duomenų ir ekspertų nuomones.				
	Minimaliųjų kelių išdėstymo metodas [MST] (Montoya, Ramirez 2012; Nahman, Perić, 2017; Nemati, Sant'Anna; 2016)	- Vertina tinklo gedimų tikimybes; - įvertina skirtingus tinklo komponentus ir jų patikimumą; - nustato trumpiausią kelią tarp visų tinklo mazgų, vertinant EST patikimumą.	- Nustatomas minimalus kelio medis, apimantis visus tinklo mazgus; - atskleidžia tinklo struktūrą ir priklausomybes, siekiant tinklo infrastruktūros gerinimo ir tinkamo jo valdymo;	- Sudėtingas, reikalingas aukšto lygio matematinis supratimas, programavimo įgūdžiai; - neatsižvelgiama į tinklo dinamiką ir atsitiktinius gedimus;

Nr.	Metodo pavadinimas	Taikymo sritis	Privalumai	Trūkumai
			- nustato gedimų taškus, jų poveikį sistemai; - atsako laiko ir tikimybinį įvertinimą.	- reikia turėti tikslius tinklo topologijos ir gedimų tikimybinis duomenis.
<i>Algoritmais ir grafo teorija pagrįsti skaičiavimai, apima visus tinklo mazgus, aprašomi matematinėmis formulėmis.</i>				
	Dirbtiniai neuroniniai tinklai, [ANN] (Aslan, Yağan, 2017)	- Naudojamas nustatyti EST atitikimus, įvertinus kokybės standartus ar reikalavimus; - elektros energijos kokybei vertinti; - tiekimo patikimumui vertinti; - gedimo trukmei nustatyti.	- Pritaikytas daugeliui skirtingų problemų; - tinkamas tinklo gedimų analizei atlikti ir jiems išspręsti; - mokomas atpažinti sudėtingus santykius tarp duomenų.	- Tinklo mokymas gali užimti daug laiko; - reikalauja didelių mokymo duomenų rinkinių; - sudėtingas tinklo interpretavimas; - sunku suprasti, kaip tinklas padaro tam tikrą prognozę.
<i>Sukurti modeliai remiasi skaičiavimais ir statistika, grindžiami istoriniais duomenimis (skaitiniais rodikliais); analitinis metodas remiasi matematiniais modeliais, skaitmeninis grindžiamas duomenų apdorojimu ir dirbtinio intelekto algoritmais.</i>				

Skaitmeninis modeliavimas leidžia iš anksto ištestuoti ir išanalizuoti įvairius galimus scenarijus, kurie vyrauja realiaje elektros tinkle. Šio metodo galimybės leidžia geriau suprasti, kaip veikia tam tikros sistemos ir kaip jų veikimo procesus galima pagerinti, kaip tinklas reaguoja į gedimus ir avarijas.

Skaitmeninio metodo trūkumai: gali būti pernelyg idealizuotas ir netikslus, kadangi ne visi procesai grindžiami matematiniais modeliavimais, matematinių formulių taikymas reikalauja tam tikrų prielaidų, kurios gali netiksliai apibūdinti tinklą ar jo procesus. Pasirenkant tinkamą skaičiavimo ir vertinimo metodą, atsižvelgta į pagrindinius kriterijus:

- turimų duomenų, kurie parodytų esamą tinklo būklę, patikimumas vykdant galimų sprendimų priėmimo analizę;
- elektros tinklo topologiją, jos dydį ir lokaciją;
- metodo galimybes simuliuoti, analizuoti tinklo charakteristikas ir funkcijas;
- galimybę rasti optimalų sprendimą;
- metodo galimybes išsamiai įvertinti pasirinktą realią sistemą, atsižvelgiant į laiko ir pastangų sudarymo sąnaudas;
- rezultatų patikimumą, siekiant rodiklių verčių pokyčio ir aiškos naudos elektros energijos vartotojams, siekiant sumažinti ilgalaikių nutrūkimų, atkūrimo laikus;
- galimybę nustatyti pažeidžiamiausias tinklo vietas;
- galimybę naudoti kitiems elektros tinklams vertinti;
- numatyti, kaip elektros tinklas reaguos į įvairias situacijas, identifikuojant potencialias, galimas tinklo problemas ir priimti tinkamus sprendimus, siekiant gerinti tinklo patikimumą.

1.6. Pirmo skyriaus apibendrinimas

1. Elektros skirstomasis tinklas yra esminė elektros energetikos sistemos infrastruktūros dalis, kuri užtikrina elektros energijos tiekimą vartotojams. Elektros skirstomojo tinklo **patikimumas** yra tikimybinis, bendrinis visos sistemos kokybės ir saugumo rodiklis, nutraukimų ir nesklandumų charakteristika per ilgesnį laikotarpį. Rodiklis apibūdina elektros energetikos sistemos nenutrūkstamą darbo funkcionalumą, gyvybingumą, apkrovos poreikių patenkinimą.
2. EST ir STO taikomi vis griežtesni reikalavimai, siekiant užtikrinti patikimą elektros energijos tiekimą vartotojams, taip pat diktuoja pokyčių poreikį esamai elektros skirstomųjų tinklų būklei. ES šalyse patikimumą vertinantys kriterijai ir skaičiavimo metodikos, skaičiavimams taikomi patikimumo rodikliai skiriasi. ES šalyse gedimai ir nutraukimai, jų priežastys, gedimų dažnis ir intensyvumas, nutraukimų ir atstatymų laikai yra traktuojami, vertinami ir fiksuojami skirtingai. Skirtingi elektros tinklų įtampos ir EST identifikacija apsunkina, ES šalių taikomų patikimumo rodiklių ir skaičiavimų, rezultatų ir reglamentuotų rodiklių palyginimą. EST patikimumo rodiklių naudojimas ir tinklo patikimumo palyginimas yra lengvesnis tarp šalių, kurios turi panašias tinklo charakteristikas, parametrus. Tiek gedimų ir nutraukimų tikslus klasifikavimas, naudojimas turi tiesioginį poveikį įvertinti tinklo būklę ir jo patikimumą. Tinklo būklė ir patikimumas priklauso nuo geografinės padėties ir energetinės sistemos struktūros, STO duomenų tikslingumo ir siekiamų tikslų.
3. Didelės veiklos sąnaudos, neefektyvios ir nepasitvirtinusios investicijos, aukštos elektros energijos kainos priverčia ieškoti efektyvesnių ir tinkamesnių būdų problemoms spręsti. Sprendimas keisti senus įrenginius naujais, įdiegti ir tobulinti EST, elektros tinklo topologijos keitimas turi būti pagrįstas, įvertinant keitimo naudą ir tikėtiną EST, elektros energijos patikimumo padidėjimą, ekonominį efektyvumą. Remiantis moksline literatūra, kiekybiniais ir kokybiniais, patikimumo rodikliais, įvertinta esama EST būklė, sudaryta elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimo metodika, kurios pagalba įvertinama skirtingų veiksmų įtaka patikimumo rodikliams. Kintant tinklo topologijai, taip pat pat reikalinga vertinti kintančius tinklo kriterijus, skaičiavimų pervertinimas atsižvelgiant į tinklo topologijos ir įstatymų, ES reglamentų kitimą, parenkant optimalius sprendinius elektros tiekimo patikimumui padidinti.
4. Įvertinus pagrindinius patikimumą vertinančius kriterijus, skaičiavimo metodų galimybes ir jų pritaikomumą, pasirinktas maksimalaus srauto, Monte Karlo ir žaidimų teorijos kompleksinis vertinimas, siekiant priimti optimalius sprendimus EST patikimumui padidinti.

1.7. Autorės indėlis į nagrinėjamąją problematiką

Atlikta išsami ir detali mokslinės literatūros analizė. Išanalizuoti ir susisteminti elektros skirstomųjų tinklų gedimai, nutraukimai, pagrindinės priežastys. Išnagrinėti dažniausiai EST patikimumą vertinantys metodai, atlikta išsami jų lyginamoji apžvalga, išskiriant jų privalumus ir trūkumus. Naudojant deterministinius metodus (FTA, RCA, FCA, Markovo grandinės, Bayesian), pastebėta, jog šie metodai remiasi prielaidomis apie sistemos elgesį, reikalauja tikslių ir išsamių duomenų, didelio jų kiekio. Taip pat šiems skaičiavimams reikalingi specialūs programiniai įrankiai. Tokie metodai naudingi, kai yra aiškos ir tiksliai žinomos sistemos charakteristikos, kurios leidžia atlikti tikslias EST analizes. Šie metodai gali nepakankamai atsižvelgti į sistemos kompleksiskumą, tinklo pakeitimus. Tai gali apsunkinti patikimumo vertinimą, jeigu turimi istoriniai duomenys yra nepakankami arba netikslūs. Veibulo, RAM, RBD metodai reikalauja išsamios ir tikslios informacijos apie sistemos charakteristikas, tokias kaip: gedimų tikimybės ar atkūrimo laikas. Tačiau nepakankamas duomenų kiekis ir informacijos trūkumas neleidžia įvertinti elektros tinklo patikimumo naudojant šiuos metodus.

Atsižvelgiant į skaičiavimo galimybes, turimus duomenis, jų tikslumą ir laiko išteklius, buvo atlikta metodų pasirinkimo vertinimo analizė. Sudaryta elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimo metodika, kurioje parinkti patikimumą vertinantys kriterijai (tinklo apkrova, vidutinis gedimų intensyvumas, atkūrimo laikas), skaičiavimo algoritmai paremti Monte Karlo ir maksimalaus srauto metodais. Taikomi metodai vienas kitą papildo, nereikalauja daugybės techninių tinklo duomenų, pateikia išsamų EST patikimumo vertinimą, problemų identifikavimą. Programinis algoritmas įgyvendintas *MATLAB* ir *Python* aplinkose. Algoritmas ir taikomi metodai leidžia išsamiai įvertinti tinklo būklę, patikimumą ir priimti optimalius sprendinius dėl tinklo infrastruktūros plėtros elektros tiekimo patikimumui vertinti, ko kiti metodai nedaro.

Maksimalaus srauto metodas gali išsamiai išanalizuoti elektros tinklo patikimumą, kai turimi minimalūs techniniai parametrai apie tinklo topologiją, duomenys apie elektros linijų pralaidumus, vartotojų galias. Palyginti su fizikiniais elektros tinklų modeliais, naudojamais srautų pasiskirstymo uždaviniais spręsti, nereikalingi detalūs duomenų rinkiniai, apimantys elektros linijų ar transformatorių elektrinius parametrus (varžas, induktyvumus ir pan.). Maksimalaus srauto metodas idealizuoja elektros tinklą, leidžia įvertinti galios nuostolius bei įtampos lygius elektros tinkle. Indikuoja, ar turima elektros tinklo topologija ir tinklo elementų pralaidumai yra pakankami (Monis, Kunjumon, 2019) siekiant aprūpinti elektros energija vartotojus, ir nurodo, kuriems vartotojams būtų apribotas ar visiškai nutrauktas elektros tiekimas, esant tam tikrai tinklo būsenai. Šis metodas gali spręsti didelių duomenų problemas, skaičiavimo ir laiko sąnaudas, palyginti su kitais metodais, yra efektyvus. Maksimalaus srauto metodas naudojamas kartu su tikimybinio Monte Karlo metodu tinklo būsenoms generuoti, leidžia įvertinti elektros tiekimo vartotojams tikimybinis rodiklius, įvertinti tikėtina nepateiktos energijos kiekį kiekvienam elektros vartotojui atskirai. Metodai leidžia atlikti efektyvų elektros

tinklo patikimumo rodiklių įvertinimą, pateikiama išsami informacija apie elektros tinklo veikimą, tinklo keitimo ir modernizavimo tikslingumą, siekiant optimalaus elektros skirstomojo tinklo lygio.

Darbe naudojama žaidimų skaičiavimo metodika (Cheng, Yu, 2019; Mohammadi, 2019), kuri buvo patobulinta ir pritaikyta Lietuvos elektros skirstomojo tinklo patikimumui vertinti. Žaidimų teorijos metodika leidžia įvertinti strateginius veiksmus ir sąveikas tarp dalyvių, atsižvelgiant į skirtingus jų tikslus ir interesus. Taikoma metodika leidžia išsamiai išnagrinėti skirtingas elektros tinklo schemas, jų patikimumą bei įvertinti jų poveikį elektros vartotojui ir STO. Identifikuojant strateginius veiksmus, analizuojant galimus poveikius, metodas leidžia pasirinkti efektyviausią sprendimą, naudingą elektros vartotojams ir STO.

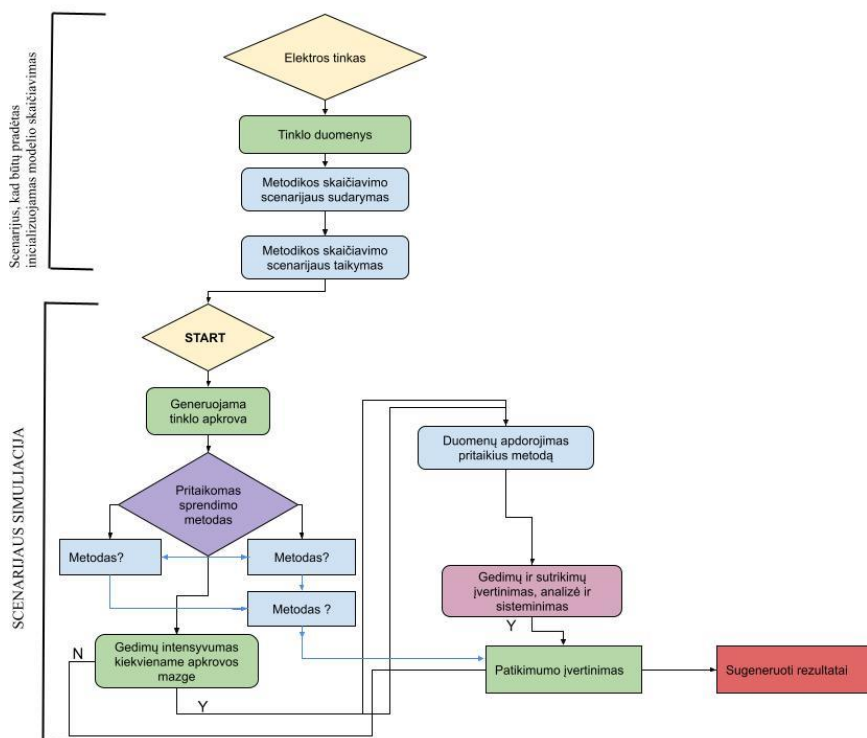
Darbas turi praktinę naudą, įvertina elektros tinklo projektavimo ir modernizavimo reikiamybę, siekiant užtikrinti elektros tinklo patikimumą.

2. ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO PATIKIMUMO TYRIMO METODIKA

2.1. Tyrimų metodikos sudarymas

Vertinant elektros skirstomojo tinklo patikimumą turi įtakos elektros tinklo duomenys ir statistika. Tinkamas duomenų rinkimas ir vertinimas leidžia priimti sprendimus, siekiant geresnio elektros tinklo patikimumo ir stabilumo tiekti nepertraukiamą elektros energiją vartotojams. Disertacijos duomenų rinkimo ir apdorojimo procesas vyko sistemingai. Siekiant tyrimo efektyvumo ir pagrįstumo, duomenų rinkimo planas keitėsi dėl kintančių energetikos, rinkos sąlygų, duomenų tikslumo / netikslumo įvertinimo, pasirenkant tiriamąjį objektą, imties sudarymo strategiją ir įvertinus laiko sąnaudas, galimybes naudoti skaičiavimo programas. Duomenims apdoroti naudota duomenų klasifikacija, taikyta duomenų analitika: aprašomoji, diagnostinė, nuspėjamoji ir rekomendacinė. Duomenys apdoroti matematinės statistikos metodais, panaudojant *Microsof Office* paketą, *Matlab*, *Phyton* programas. Tyrimo duomenų analizei atlikti naudoti statistiniai tyrimo metodai, panaudotas informatyvus ir vaizdus surinktų duomenų grafinis apdorojimas.

Susidurta su techninių duomenų apsauga ir prieigos ribotumu. Buvo atsižvelgta į duomenų kiekį, jų prieinamumą ir patikimumą, taikant įvairias skaičiavimo metodikas, skelbtas mokslinėje literatūroje. Duomenų analizė ir interpretacija leido suformuluoti problemą. Atsižvelgiant į tyrimo tikslą, apibrėžiamas ir sukuriamas patikimumą vertinantis modelis. Modeliavimo koncepcija – nesudėtinga ir paprasta, apimanti 11 mazgų tinklą. Metodikos variacijos pritaikytos 70 mazgų turinčiam tinklui (žr. 2.3 pav.), vėliau skaičiavimai naudojami sudėtingam Lietuvos EST. Pasirenkamas simuliacijos metodas, įvertinant turimų duomenų kiekį, metodo tinkamumą ir pagrįstumą. Rezultatų interpretacija buvo vykdoma remiantis mokslininkų tyrimų rezultatais, ataskaitų duomenimis. Sudaryta tyrimų metodikos schema EST patikimumui vertinti (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Tyrimų metodikos schema EST patikimumui vertinti

2.2. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo patikimumo lygiai ir reguliavimas

Lietuvoje elektros veiklos valdymą, reguliavimą, priežiūrą ir kontrolę atlieka: Lietuvos Respublikos Vyriausybė; Lietuvos Respublikos energetikos ministerija; Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija; Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija; Valstybinė energetikos reguliavimo taryba; Valstybinė vartotojų teisių apsaugos tarnyba; Savivaldybių institucijos. Atsižvelgiant į Europos Sąjungos teisinius reikalavimus, elektros energijos gamybą, perdavimą, skirstymą ir tiekimą, elektros energijos paslaugų tiekėjų ir vartotojų santykių nustatymą, jų sąlygas konkurencijai plėtoti elektros energetikos sektoriuje reguliuoja Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas. Įstatymu siekiama užtikrinti „<...> patikimą elektros energijos gamybą, perdavimą ir skirstymą“ (Lietuvos Respublikos Seimas, 2012. Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas (Nr. XI-1919, 2012-01-17)).

Lietuvoje EST patikimumo stebėseną ir persiuntimo patikimumo lygiai reglamentuojami ir vykdomi nacionaliniu lygmeniu, tarptautiniu mastu rengiamos metinės ataskaitos ir / ar palyginamosios apžvalgos, atsižvelgiant į faktinį praėjusio periodo persiuntimo rodiklių vidurkį (Valstybinė energetikos reguliavimo taryba, 2019 (Zuliani, 2017)). STO atsakingas už EST iki vartotojų ar gamintojų (perdavimo tinklų) „<...> įrenginių prijungimo taško bei už jų saugumą, patikimumą, eksploatavimą, priežiūrą, valdymą bei plėtojimą atsižvelgiant į skirstymo tinklų

naudotojų poreikius“ (Energetikos įstatymo Nr. VIII – 1881, 17 str.). STO taip pat atsakingas už EST priežiūrą, remontą, energijos apskaitą, patikimą ir saugų elektros energijos tiekimą galutiniams elektros energijos vartotojams, nepažeidžiant aplinkos apsaugos reikalavimų (Lietuvos Respublikos energetikos įstatymas, 18 str.). STO privalo užtikrinti techninių konstrukcijų ir eksploataavimo keliamus reikalavimus (Lietuvos Respublikos energetikos įstatymas, 2022 gegužės 16d.; Lietuvos Respublikos elektros energijos įstatymas, VIII-1881, 18 str.).

Minimalūs persiuntimo patikimumo lygiai nustatomi Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos (toliau VERT) kiekvienam operatoriui, konkrečiam reguliavimo periodui (Tin., 2000, Nr. 66-1984; 2012, 17-752, 9 str. 3 dalies 4 punktas, Elektros energijos persiuntimo patikimumo ir paslaugų kokybės reikalavimų, patvirtintų Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos (VKEKK) 2009 m. birželio 11 d. nutarimu Nr. O3-75, 12 punktu). Minimalus elektros energijos persiuntimo patikimumo lygis nustatomas remiantis metų vidutiniais patikimumo rodikliais, nustatomos viršutinės paslaugų kainų ribos naujam reguliavimo periodui ir galioja numatytajam periodui ir / ar iki jo pabaigos (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija dujų ir elektros departamento elektros skyrius, 2012). Nustatyti ir patvirtinti lygiai negali būti blogesni už reglamentuotus ir patvirtintus praėjusiame periode minimalius lygius.

Ši metodika operatoriams turėtų numatyti skatinamąjį reguliavimo principą. Lietuva, susijungusi su ES energijos sistemomis, turi vadovautis ir palaikyti kuo aukštesnį patikimumo lygį. Tačiau, siekiant atitikti minimalius persiuntimo lygius, STO netiesiogiai skatinamas mažinti skirstymo išlaidas, kurios skiriamos elektros tinklo patikimumui padidinti. Todėl iškyla tarsi kontrolinis pavojus, kad STO gali sumažinti dėmesį elektros „<...> tinklų infrastruktūrai ir patikimumas sumažės dėl nepakankamų investicinių ir eksploatacinių išlaidų skirstomiesiems tinklams“ (Klemantavičius, 2006).

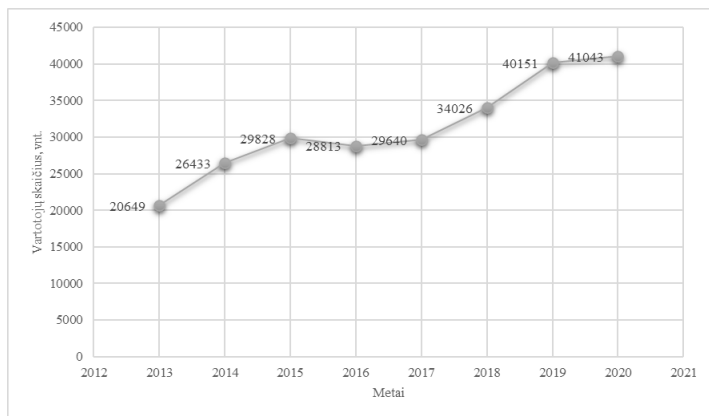
STO reguliavimas yra paremtas pasiektais rezultatais, kuriuos galima būtų įvardinti premijų / nuobaudų sistema. Todėl STO veiklos rezultatai finansiškai labai susiję su rodiklių kokybės gerinimu, t. y. ne tik trumpalaikių rodiklių pagerėjimu vienu ar kitu metu, bet ir ilgalaikiu planavimu, kad būtų užtikrintas patikimas elektros energijos tiekimas. Sietina metodika paremta pinigine grąža su patikimumo rodikliais, ne tik dėl geresnių rezultatų, bet ir nusako esamo elektros tinklo būklę, jo jautrumą veikiams išoriniams ir ne tik poveikiams.

2.3. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo gedimų analizė: statistinė duomenų analizė ir patikimumo vertinimas

Šioje dalyje atlikta statistinė duomenų analizė, paremta istoriniais apkrovos, gedimų duomenimis. Patikimumo rodiklių analizė ir vertinimas yra labai svarbūs veiksniai, kurie gali parodyti Lietuvos EST būklę. Analizė remiasi 2013–2021 m. sukauptais kokybiniais ir kiekybiniais Lietuvos EST statistiniais ir techniniais tinklo duomenimis. Duomenų rinkimo tikslas – įvertinti EST gedimų ar nutraukimų

priežastis, esamą tinklo būklę, patikimumo lygį, atsižvelgiant į elektros tinklo vartotojus, gedimų ir nutraukimų dažnį, elektros energijos nutrūkimo trukmę.

Remiantis AB „Litgrid“, pateiktais Europos Komisijos duomenimis, kiekvienais metais vartotojų skaičius auga tendencingai, kaip ir elektros energijos valandinis poreikis (žr. 2.2 pav., 2.1 lentelę) (Valstybinė energetikos reguliavimo taryba Vilnius, 2019).



2.2 pav. Naujų elektros vartotojų prijungimas prie elektros skirstomojo tinklo

2.1 lentelė. Vartotojų elektros energijos suvartojimas pagal metus

	Metai						
Elektros energijos suvartojimas / poreikis	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Energijos suvartojimas						
Buitinių vartotojų elektros energijos suvartojimas			2,713 TWh	2,862 TWh	2,878 TWh	2,9 TWh	2 TWh
Maksimalus valandinis elektros energijos poreikis (<i>netto</i>)		1979 MW	1896 MW	1999 MW	2032 MW	2105 MWh	2217 MWh
Skirstomajame tinkle maksimalus elektros energijos valandinis poreikis	1555 MWh	1695 MWh	1665 MWh	1760 MWh	1733 MWh	1872 MWh	1990 MWh
Vidutinis metinis vieno buitinio vartotojo suvartojimas			1726 kWh	1,800 kWh	1844 kWh	1859 kWh	1900 kWh
Vartotojų skaičius			1710553	1732539	1754464	1799025	1823744

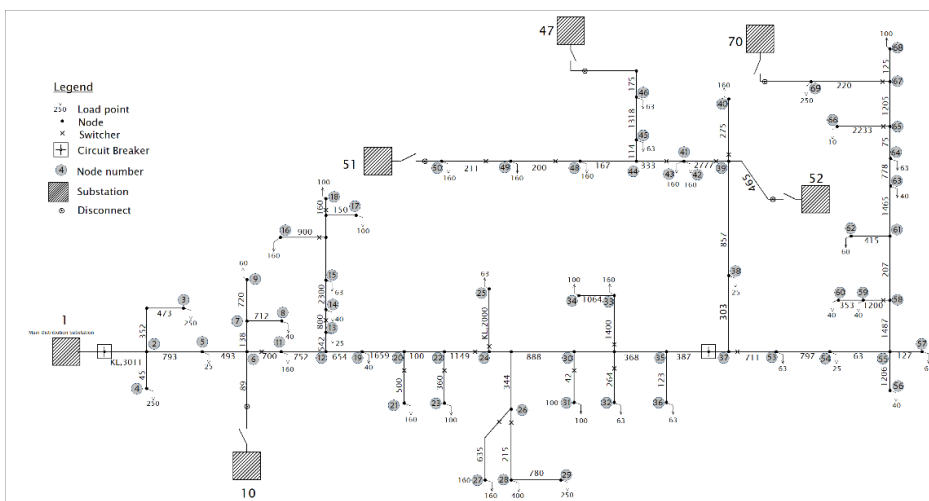
Šaltinis: sudaryta autorės remiantis Lietuvos Respublikos elektros energijos ir gamtinių dujų rinkų metinė ataskaita Europos Komisijai. Vilnius, 2019.

Didėjant apkrovai ir elektros energijos suvartojimui, keliama ir reikalavimai: tinklo būsenai, skirstomojo tinklo operatoriams, kad būtų užtikrintas vartotojų pasitenkinimo ir patikimumo lygis (Xu, Wu, 2010; Biyun ir kt., 2018). Auga elektros vartotojų skaičius ir galios poreikis, kuris tam tikruose Lietuvos rajonuose viršija reglamentuotas normas nuo kelių iki keliolikos kartų. O tai gali turėti įtakos nepakankamam magistralinių linijų pralaidumui (Valstybinė energetikos reguliavimo taryba. Vilnius, 2020). Todėl, atsižvelgus į vis didėjantį elektros energijos poreikį, svarbu įvertinti esamą elektros skirstomąjį tinklą: kiek jis yra pajėgus tiekti patikimą

ir kokybišką, su pakankama galia elektros energiją, įvertinus nustatytas nutraukimų vertes, gedimų priežastis.

Remiantis LR išnagrinėtais įstatymais ir taisyklėmis, Lietuvos EST patikimumas priklauso nuo STO veiksmų, paskirstytų investicijų, organizavimo, strateginių planų įgyvendinimo. Elektros tinklo ir elektros energijos tiekimo patikimumas ir jo užtikrinimas yra vertinamas pagal: STO veiksmus ir vykdomą veiklą, vartotojų patikimumo kategorijas (žr. 1.1.1. poskyrį), patikimumo rodiklių vertinimą (žr. 1.4 poskyrį), gedimų ir nutraukimų tipus (žr. 1.3. ir 1.1.3. poskyrius).

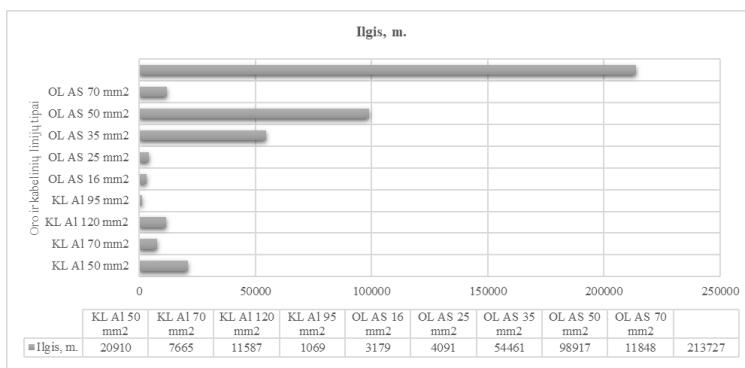
Remiantis ES ir ESO, Litgrid pateiktomis ataskaitomis, LR įstatymais, kokybiniais ir kiekybiniais duomenimis, galima teigti, kad didžiąją Lietuvos EST (0,4–35 kV) dalį sudaro spindulinio tipo tinklas (žr. 2.3 pav.). Tokio tipo tinklo dauguma įrenginių skirti perduoti elektrą vartotojams ir yra sujungti nuosekliai.



2.3 pav. Elektros skirstomojo tinklo dalis

Spindulinio tipo tinklo didžiausias trūkumas – įvykus bet kokiam gedimui, elektros tiekimas vartotojams nutrūksta iki tol, kol yra vykdomas tiekimo perjungimas. Sugedus tinklo daliai, vartotojai yra priklausomi nuo to, kaip greitai bus likviduojamas gedimas ar perjungimas. Perjungimo trukmė priklauso nuo to, koku būdu yra vykdomas prijungimas: rankiniu ar automatinu.

2.3 pav. pateikta reali Lietuvos EST dalis. Pagal gautus duomenimis, atsižvelgus į linijų ilgius ir tipus, atlikta tinklo analizė. Lietuvos EST tinkle vyrauja AS tipo oro linijos, kurių suminis ilgis yra apie 94 % viso 10 kV OL tinklo (žr. 2.4 pav.).



2.4 pav. Oro ir kabelinių linijų tipai Lietuvos elektros skirstomajame tinkle

Skirtingi EST linijų tipai ir jų techniniai parametrai, siekiant įvertinti tinklo pralaidumą įvykus gedimams linijų dalyse, pateikti 2.2 lentelėje.

2.2. lentelė. Oro ir kabelinių linijų tipai ir jų pralaidumas

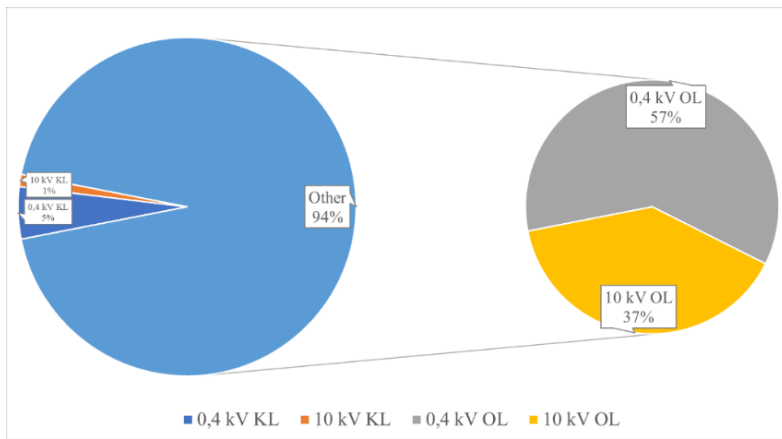
Tipas (KL – kabelinė linija, OL – oro linija)	Srovės pralaidumas, A
OL AS 50 mm ²	210
OL AS 35 mm ²	175
OL AS 70 mm ²	265
OL AS 16 mm ²	110
OL AS 25 mm ²	142
KL AI 50 mm ²	165
KL AI 70 mm ²	265
KL AI 95 mm ²	260
KL AI 185 mm ²	430
KL AI 120 mm ²	190

Remiantis 2.4 pav. ir 2.2 lentelės duomenimis, EST labiausiai paplitusios OL AS 50 mm². Šio tipo OL yra ekonomiškai ir patikima, turi pakankamai didelį laidininko skerspjūvį perduoti elektros energiją dideliems atstumams, atlaikant didelius apkrovų lygius. EST magistralinės OL dažniausiai būna 70 mm², 120 mm², OL: 25, 35, 50, 70 laidininkų skerspjūvis mm² – atšakinės.

Remiantis Lietuvos elektros energetikos sistemos (LEES) patikimumo įvertinimo ataskaita už 2016 m., didžioji 35 kV oro linijų eksploatuojama daugiau kaip 40 metų (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, 2017). Linijos nėra keistos nuo to laiko, kai buvo sumontuotos (prieš 30–40 ar net daugiau metų) (Lietuvos energetikos instituto tyrimas, 2006; CEER 2012 m. ataskaitos). Nusidėvėję izoliatoriai ir trasos, susidėvėjusios srovinių dalių jungtys, nėra atnaujintos ir įdiegtos automatinės valdymo sistemos (Valstybinė energetikos reguliavimo taryba, 2019). Daugiau kaip 84 % visos elektros sistemos SAIDI visų gedimų verčių yra priskiriami vidutiniam elektros skirstomajam tinklui (Komatka, 2017; Mora ir kt., 2009).

35–110 kV transformatorių pastotėse ir 10 kV skirstomuosiuose punktuose labiausiai genda 10 kV alyviniai jungtuvai ir jų pavaros, relinės apsaugos, vyrauja

automatikos gedimai, gedimai antrinėse grandinėse (Valstybinė energetikos reguliavimo taryba, 2017). EST 0,4–10 kV tinklo įvykusių gedimų pasiskirstymas pavaizduotas 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Lietuvos elektros skirstomajame tinkle (0,4–10 kV) įvykusių gedimų pasiskirstymas

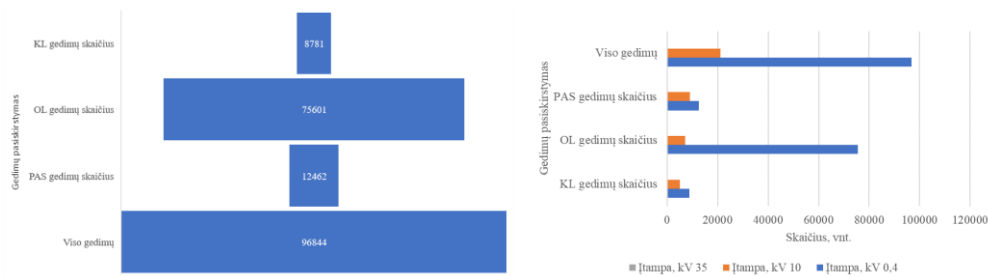
Analizuojamojo tinklo dalyje bendras įvykių ir atsijungimų skaičius 0,4–10 kV tinkle 2014-01-01 – 2018-12-31 – 14 660 atjungimų atvejų. 10 kV – 2966 atjungimų atvejai, t. y. 20,2 % visų įvykusių gedimų ir atsijungimų (Sindaravičius, Kovalynas, 2019). 10 kV OL atsijungimus sudaro 65,2 %, 0,4 kV – 76 % (vieno rajono). Pažeidžiamiausius EST segmentus – oro linijos: žemos (0,4 kV) ir vidutinės (6 kV, 10 kV ir 35 kV) įtampos pasiskirstyme. 9371 gedimo atsijungimų pagrindinė priežastis – operatoriaus atsakomybė, tai sudaro 47,47 % „*Force majeure*“, o tai yra 36,64 % visų gedimų. Dėl elektros energijos nutraukimų ir atkūrimo laiko šiandien labiausiai nukenčia III kategorijos vartotojai (buitiniai vartotojai).

Gedimų vertinimas priklauso nuo Lietuvos tinklo lokacijos ir jo amžiaus. Priežasčių pasiskirstymams taip pat turi įtakos ir metų laikas – vasarą padaugėja žaibų skaičius, o žiemą – sniegas, drėgmė ir įšalas. Išanalizavus pagrindines Lietuvos EST nutraukimo ir gedimų priežastis, atsižvelgiant į metų laiką, sudarytas gedimų ir nutrukimų priežasčių įvertinimas (žr. 2.6 pav.).



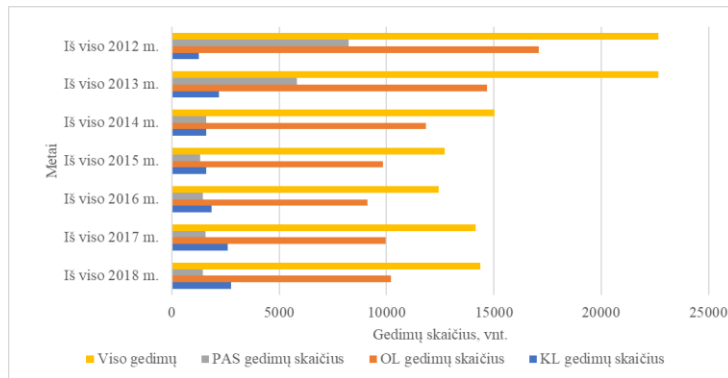
2.6 pav. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo gedimų ir nutrūkimų priežastys

Remiantis surinktais 2011–2018 m. duomenimis, veiksniai, turintys įtakos tinklo ar jo įrenginių gedimams, buvo: vėjas ir audros (30 %), žaibai (7 %), sniegas ir ledas (6 %), kitos priežastys, susijusios su gamtos padariniais (3 %), gyvūnai (4 %). Pagal 3 priede pateiktus duomenis sudaryti grafikai (žr. 2.7 pav.), rodantys gedimų pasiskirstymą skirtingų įtampų EST.



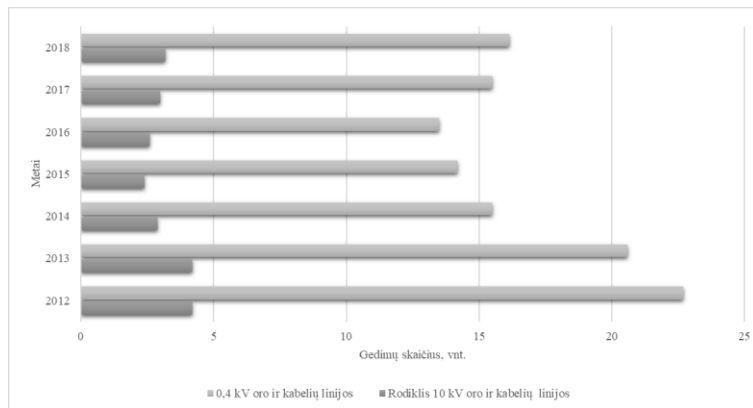
2.7 pav. Gedimų skaičiaus pasiskirstymas EST per 2012–2018 m.

Oro linijose daugiausia gedimų įvyksta dėl nutrūkusių laidų ir izoliatorių gedimų. Kabelinėse linijose – dėl trumpojo jungimo (TJ), vienfazių išžemėjimų (Gudzius, ir kt., 2011; Wang ir kt., 2020). 0,4 kV, 10 kV ir 35 kV oro linijų silpniausia vieta – miškingose vietovėse esančios trasos dėl: apšalo, vėjų ir stichinių reiškinių, perkūnijos ir žaibų, nusidėvėjusių tinklų ir jų konstrukcinių dalių, nusidėvėjusių izoliatorių ir traversos, susidėvėjusių srovinių dalių jungčių. Taip pat EST gedimams turi įtakos: įrenginiai ir jų izoliacijos senėjimas, 10 kV alyviniai jungtuvai ir jų pavaros, relinės apsaugos ir automatikos gedimai bei gedimai antrinėse grandinėse (Valstybinė energetikos reguliavimo taryba, 2019). Kabelių linijose nustatyta, kad didžioji dalis gedimų įvyko nusidėvėjusiuose 10 kV įtampos kabeliuose su alyvine izoliacija. Apie 32 % visų gedimų sudarė gedimai transformatorinėse, įvykę seno tipo kompleksinėse transformatorinėse (Šiaulių bei Minsko), kurios yra technologiškai pasenusios. Gedimų skaičiaus pasiskirstymo, remiantis 2012–2018 m. duomenimis, rezultatai pateikti 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Gedimų skaičius EST skirstymo sistemos įrenginiuose per 2012–2018 m., vnt.

Nuo 2016 m. gedimų kiekis didėjo. Gedimų skaičiaus kitimui galėjo turėti įtakos duomenų surašymo pasikeitimas, oro sąlygos, tinklo nusidėvėjusios dalys ir kitos sąlygos, kurios jau buvo paminėtos anksčiau. Kadangi šiame darbe svarbu įvertinti gedimų pasiskirstymą OL ir KL tipo linijose, remiantis statistiniais duomenimis, pateikiamas bendras lyginamasis šių linijų tipų gedimų pasiskirstymo grafikas (žr. 2.9 pav.).



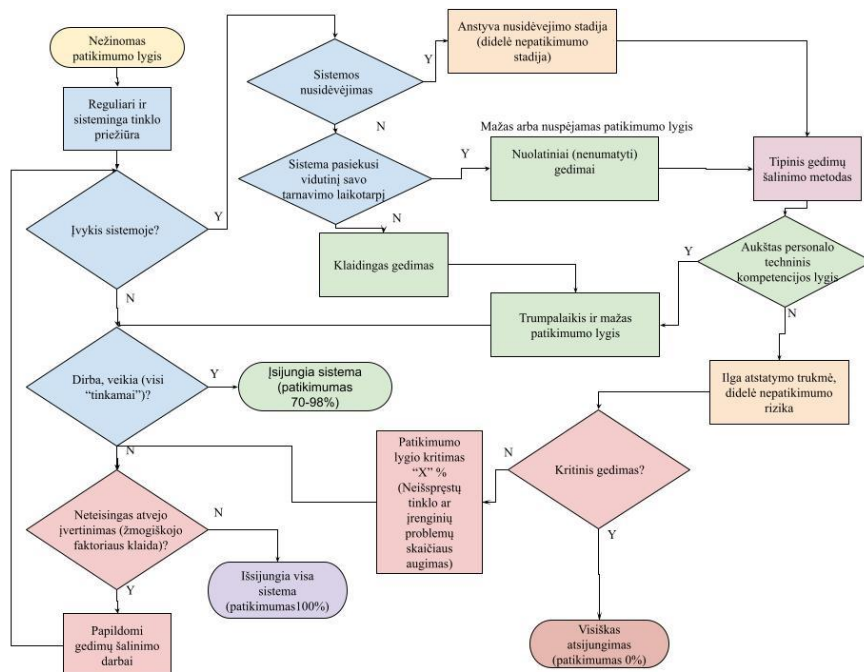
2.9 pav. Bendras oro ir kabelinių linijų gedimų skaičius

Iš pateiktų duomenų matyti, kad 2012–2014 m. įvykdytas EST modernizavimas pagerino tinklo patikimumą ir sumažino gedimų skaičių, taip pat šiais metais oro sąlygos buvo palankios ir nebuvo didelių oro stichijų, kurios būtų sukėlusios linijų gedimus. Nuo 2016 m. oro ir kabelinėse linijose gedimų daugėjo. Pagrindinės priežastys, dėl kurių įvyko elektros energijos tiekimo nutraukimai:

- Nusidėvėję 10 kV įtampos kabeliai su alyvine izoliacija;
- Oro linijose gedimus sukėlė augmenija, gamtos reiškiniai;
- Įvykę įtampų svyravimai dėl tinklo konfigūracijos ir natūralaus vartotojų galios poreikio augimo (vartotojams leistinoji galia viršija nuo kelių iki

keliolikos kartų; per ilgos linijos, neoptimali tinklo konfigūracija dėl senos infrastruktūros ir didesnių galios poreikių).

EST vyraujantys nuolatiniai gedimai apsunkina elektros energetikos sistemos darbą, o ateityje gali sukelti didelių ekonominių nuostolių. Gerinant skirstomųjų elektros tinklų darbo kokybę, energijos paskirstymo patikimumą galima pasiekti tik nuosekliai stebint tinklo pokyčius, fiksuojant įvykius ir numatant galimybes išvengti gedimų – kuo greičiau reaguoti į jų pašalinimą ar viso to išvengti. Sistemingas gedimų vertinimas ir analizė yra esminis procesas, kuris leidžia įvertinti EST ar jo dalies gedimų dažnį, dažniausiai pasitaikančius gedimus ir jų priežastis. Vertinimas yra labai svarbus procesas siekiant sumažinti gedimų kiekį ir įvertinti tinklo patikimumą. Elektros tinklo gedimų vertinimo algoritmas pateiktas 2.10 paveiksle.



2.10 pav. Elektros tinklo gedimų ir veikimo, patikimumo vertinimo algoritmas

Analizuojant gedimus galima identifikuoti pagrindines technines problemas. Tai leidžia nustatyti silpnąsias elektros tinklo vietas ir problemų atsiradimo šaltinius. Gedimų vertinimas padeda nustatyti tinklo pažeidžiamiausias zonas ir numatyti būsimus gedimus. Remiantis šia informacija, galima planuoti ir taikyti būtinas priemones, priimti tinkamus sprendimus, skirtus EST pakeisti ir patobulinti, kad būtų užtikrintas patikimas elektros tiekimas (Xu, Wu, 2010) ir sumažintas gedimų skaičius arba elektros energijos netiekimo laikas.

Taigi, išanalizavus Lietuvos elektros skirstomąjį tinklą, galima teigti, jog turi būti skiriamas išskirtinis dėmesys 10 kV tinklui. Įvykus gedimams magistralinėse linijose, atjungiamą didžiąją tinklo vartotojų dalis. Tai priklauso tik nuo gedimų

sunkumo ir STO galimybių greitai ir operatyviai likviduoti gedimus. Todėl labai svarbu atkreipti dėmesį į EST esamą būklę, esant reikalui – priimti optimalius ir ekonomiškai efektyvius sprendimus.

2.4. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimas

Lietuvos EST patikimumas dažniausiai vertinamas SAIDI, SAIFI ir MAIFI patikimumo rodikliais, jų vertinimas vykdomas kasmet. Siekiant įvertinti vidutinį neplanuotų elektros energijos persiuntimo nutraukimų skaičių, tenkantį vienam sistemos vartotojui, ilgiems nutraukimams (trunkantiems >3 min.) naudojami du pagrindiniai rodikliai: SAIFI ir SAIDI. Sistemos vidutinės nutraukimo trukmės rodiklis vienam vartotojui apskaičiuojamas:

$$SAIDI = \frac{\sum T_{ai} N_i}{\sum N_i}, \quad (2.1.)$$

čia T_{ai} – i -tojo mazgo vartotojų atjungimo trukmė;

N_i – i -tojo mazgo vartotojų, kuriems nutrauktas elektros energijos persiuntimas, skaičius.

Sistemos vidutinis elektros tiekimo nutraukimo dažnio rodiklis vienam vartotojui apskaičiuojamas:

$$SAIFI = \frac{\sum f_i N_i}{\sum N_i} \quad (2.2.)$$

čia f_i – i -tojo mazgo maitinimo nutraukimų skaičius.

MAIFI – vidutinis elektros energijos persiuntimo trumpų nutraukimų dažnio rodiklis. Šis rodiklis parodo, kiek vidutiniškai kartų per ataskaitinį laikotarpį elektros energijos persiuntimas buvo nutrauktas esant trumpiems nutraukimams (< 3 min.).

$$MAIFI = \sum \frac{\text{Vart., kuriems elektros energijos persiuntimas nutrauktas dėl trumpojo nutraukimo, skaičius}}{\text{Visų aptarnaujamų vartotojų skaičius}} = \frac{\sum IM_i \cdot N_{mi}}{N_T} \quad (2.3.)$$

Šis rodiklis yra labai panašus, kaip ir SAIFI, bet jis labiau traktuoja vidutinį momentinio elektros nutraukimų dažnį. MAIFI yra naudojamas trumpos trukmės nutraukimams vertinti. Apkrovos ir tiekiamos energijos rodikliai: ENS, AENS; turint tinklo mazgų apkrovą, galima įvertinti šiuos rodiklius. ENS rodiklis parodo, kiek elektros energijos buvo nepersiūsta dėl nutraukimų per ataskaitinį laikotarpį.

$$\begin{aligned} END &= \sum \text{Nutraukimo metu tiekiamą galią (MW)} \cdot \text{Nutraukimo trukmė} \\ &= L_{a(i)} U_i [kWh \cdot \text{metus}], \end{aligned} \quad (2.4.)$$

čia $L_{a(i)}$ – vidutinė apkrova i -tajame apkrovos mazge;

U_i atjungimo trukmė i -tajame apkrovos mazge.

AENS rodiklis parodo nepatiekto energijos kiekį.

$$AENS = \frac{\sum L_{a(i)} U_i}{\sum N_i} [kWh \cdot vartotojas^{-1} \cdot metus^{-1}]. \quad (2.5.)$$

Taip pat patikimumo vertėms apskaičiuoti naudojamas papildomas rodiklis, kuris parodo neperduotos elektros energijos kiekį ΔW vartotojams:

$$\Delta W = \sum A_i f_i T_{ai}, \quad (2.6.)$$

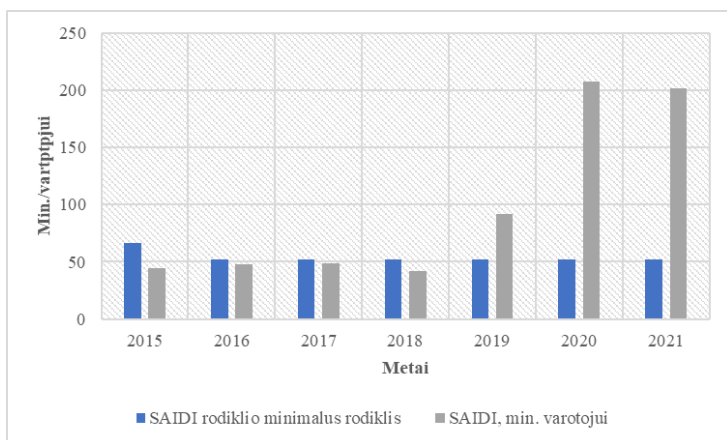
čia A_i – i -tojo mazgo apkrova.

Šių rodiklių vertės priklauso nuo kiekvienų metų surinktų duomenų tikslumo, elektros skirstomojo tinklo operatoriaus duomenų apdorojimo, metodų funkcionalumo nustatyti realią elektros tinklo būseną. Nuo 2012 m. Lietuvoje vertinti patikimumo statistinių duomenų rodikliai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Papildomų patikimumo rodiklių analizė 2012–2018 m.

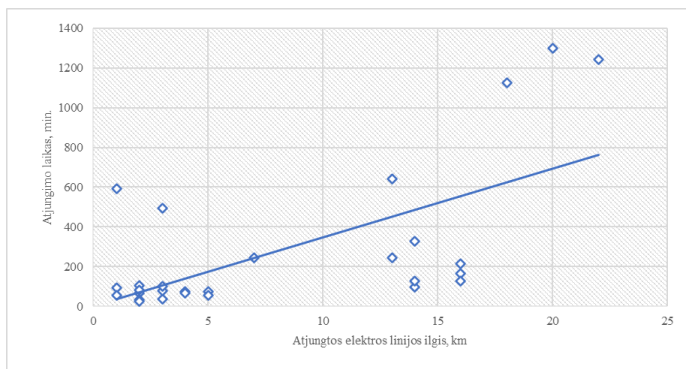
	SAIFI	SAIFI Minimalus lygmuo	SAIDI	SAIDI Minimalus lygmuo	Nutraukimai dėl nenumatytų prižasčių	Dėl operatoriui priskiriamos atsakomybės
Metai	kartai / vartotojui	kartai / vartotojui	min. / vartotojui	min. / vartotojui	min. / vartotojui	min. / vartotojui
2018	0,68	0,72	42,00	52,12	1,52	40,48
2017	0,67	0,72	49,06	52,12		
2016	0,62	0,72	47,94	52,12		
2015	0,60	0,93	44,6	66		
2014	0,67	0,93	49,4	66		
2013	0,72	0,93	51,4	66		
2012	0,79	0,93	55,6	66		

Rodiklių vertės kiekvienais metais turėjo tendenciją mažėti dėl STO strategijoje užsibrėžtų tikslų. Remiantis 4 priede pateikta informacija, 2.3 lentelėje pateikti duomenys pripažinti kaip netinkamai apskaičiuoti ir vertinti, o anksčiau vertinti duomenys neatspindi viso EST situacijos. Šiandien SAIDI rodiklio reglamentuota vertė pakito (žr. 2.11 pav.). Nuo 2020 m. SAIDI rodiklis vertinimas vykdomas įtraukiant „*Force majeure*“ gedimus, fiksuojant gedimus automatiškai.

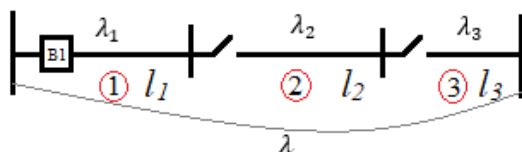


2.11 pav. Lietuvos EST SAIDI rodiklio palyginimas

Įvertinus netinkamą tinklo duomenų rinkimo ir vedimo, apskaičiavimo metodiką, dėl realių gedimų ir nutraukimų duomenų trūkumo tinklo patikimumo vertinimas atliekamas pasitelkus tikimybinis gedimų intensyvumų dydžius. Gedimų dažnis atskiroje linijos dalyje ir visame analizuojamajame elektros tinkle apskaičiuojamas ir vertinamas atsižvelgus į linijos ilgį ir gedimų intensyvumo parametą (žr. 2.12 pav.).



Priimama, jog gedimų intensyvumas per metus viename linijos kilometre – pastovus dydis: $\lambda(t) = const$, tinklo gedimų dažnis kis priklausomai nuo linijos ilgio. Vidutinis grandinės gedimų intensyvumas yra visos elektros grandinės bendrinis rodiklis (žr. 2.13 pav.).



2.13 pav. Gedimų intensyvumo pasiskirstymas pagal EST linijų ilgius

Bendras gedimų intensyvumo vertinimas tiriamajame elektros tinkle:

$$\lambda_j = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^N \lambda_i, [\text{gedimai} \cdot \text{metai}^{-1}], \quad (2.8.)$$

čia λ_i – gedimų dažnis elektros skirstomojo tinklo dalyje i ;

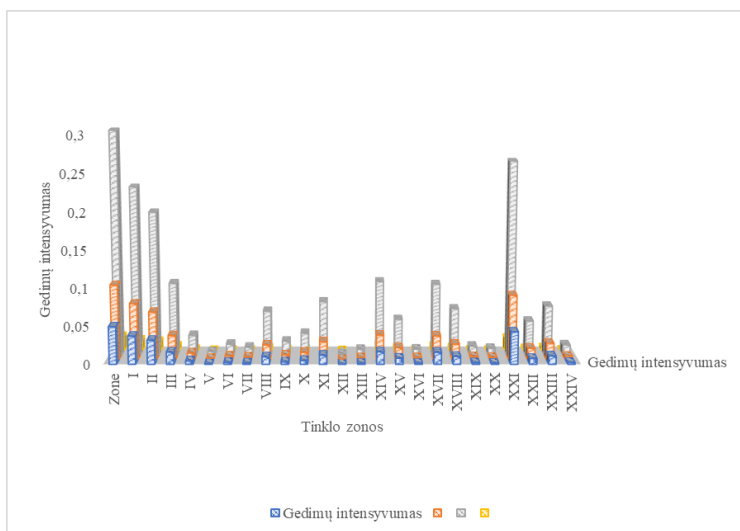
1 – komponentų rinkinys, kurio gedimas sukelia gedimą tam tikrame tinklo taške j .

Remiantis analizuojamo tinklo turimais duomenimis (žr. 2.3 pav.), apskaičiuota gedimų intensyvumo vertė – $\lambda = 0,0286$. Šio rodiklio vertė, įvertinus 5 priede pateiktus duomenis ir mokslinę literatūrą (Alavian ir kt., 2021; Brown, 2009; Navickas, 2007), nesiskyrė. Remiantis moksline literatūra, sudaryta gedimų intensyvumų verčių (lygių) lentelė (žr. 2.4 lentelę). Gedimų intensyvumas taikomas tinklo simuliacijai ir tinklo patikimumui vertinti, atsitiktinai generuojant gedimus tinkle.

2.4 lentelė. Gedimų intensyvumo dydžiai ir atkūrimo laikas

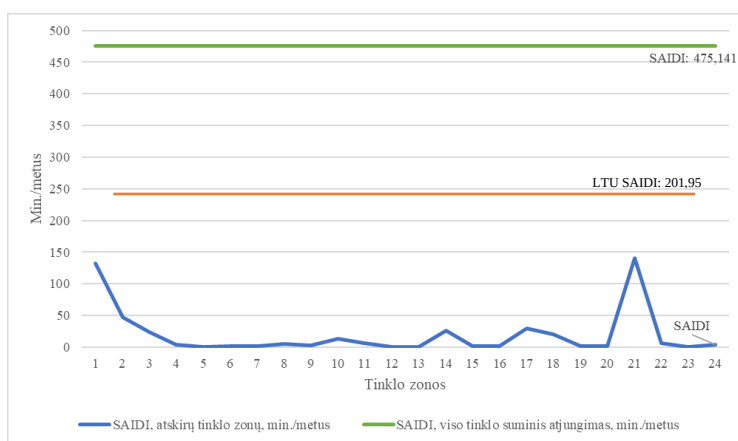
Gedimų intensyvumų lygiai			
	$\lambda/m.$		
	Žemas	Tipinis	Aukštas
Oro linijos	0,020	0,10	0,30
Jungiklis	0,004	0,014	0,14
Požeminis kabelis	0,003	0,07	0,587

Gedimų intensyvumui turi įtakos gedimų sudėtingumas, tinklo lokacija ir tinklo technologinis amžius. Svarbu žinoti gedimų ir viso tinklo esamą / būsimas būsenas (Xiaochen, 2011), žinant apie elektros sistemos įrenginius, kurie dažniausiai sutrikdo elektros tiekimą, pagrindines priežastis, kas labiausiai lemia elektros nutrūkimus, elektros tinklo pažeidimus. Atsižvelgus į 2.4 lentelėje pateiktus gedimų intensyvumų lygius (žemas, vidutinis, aukštas), pritaikius analizuojamajam tinklui (žr. 2.3 pav.), rezultatai pateikiami grafiškai (žr. 2.14 pav.).



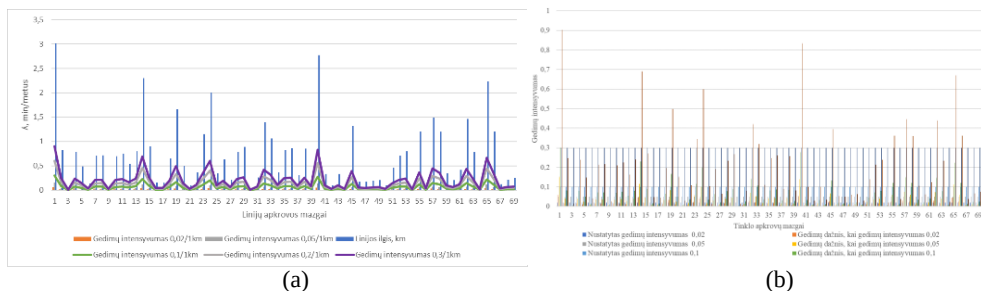
2.14 pav. Gedimų intensyvumo pasiskirstymas

SAIDI rodiklių vertės, atsižvelgiant į vartotojų skaičių, yra skirtingos atskirose tinklo zonose, palyginti su viso tinklo rodiklio verte (žr. 2.15 pav.).



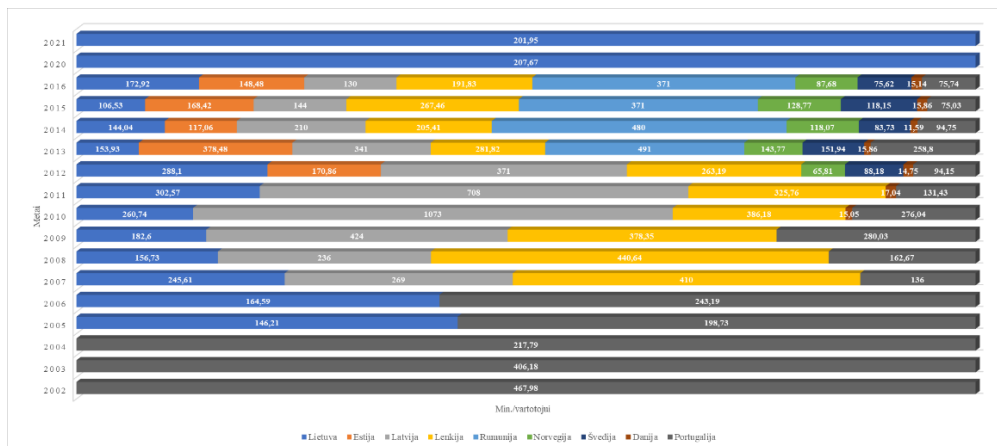
2.15 pav. Analizuojamo tinklo SAIDI rodiklių palyginimas

Gedimų intensyvumų pasiskirstymas, atsižvelgiant į tinklo linijų ilgį, vaizduojamas 2.16 paveiksle. Grafike aiškiai matosi, kad, gedimų intensyvumas, esant tiems patiems linijų ilgiams, neturi jokios reikšmės ir didelio polycio skaičiavimams. Toliau bus analizuojama tik pakeitus tinklo topologijas.



2.16 pav. (a) gedimų intensyvumo pasiskirstymas atitinkamai pagal linijų ilgį, (b) gedimų intensyvumo pasiskirstymas elektros tinklo apkrovos mazguose

Taigi, išanalizavus elektros tinklo situaciją, remiantis Valstybinės energetikos reguliavimo tarybos metine ataskaita (2021 m.), ESO vedami „<...> nutraukimai buvo netinkamai klasifikuojami pagal priežastis“. Pakeitus gedimų registraciją, įdiegus automatines registravimo sistemas, LTU EST tinklo rodiklių vertės pasikeitė 4 kartus (nuo 52,12 min. / vartotojui (2018 m.) iki 201,95 (2021 m.)). Remiantis 6 priede pateiktu ES šalių patikimumo rodiklių verčių vertinimu, sudarytas grafikas (žr. 2.17 pav.). 2.17 pav. grafikas rodo esamą Lietuvos situaciją tarp labiausiai pokytį rodikliuose turėjusių šalių. Grafike analizuojami tik neplanuoti nutraukimai ir SAIDI verčių pasiskirstymas pagal metus.



2.17 pav. Neplanuoti SAIDI rodikliai, įskaitant išimtinus įvykius (min. / vartotojui)

Pateikti duomenys parodo, jog STO daugiausia orientuoti į galingumo našumą, tačiau ne į tinklo patikimumo išlaikymą. Naudojami patikimumui vertinti rodikliai ir tradiciniai metodai neįvertina tinklo patikimumo ir jo būklės, neparodo elektros tinklo realios situacijos. Duomenys nėra tikslūs ir patikimi, nėra viešai prieinami. Įvertinus statistinius duomenis, išanalizavus Europos Sąjungos šalių skaičiavimams naudojamus rodiklius ir rodiklių statistinius duomenis (žr. 7 priedas), galima teigti, jog:

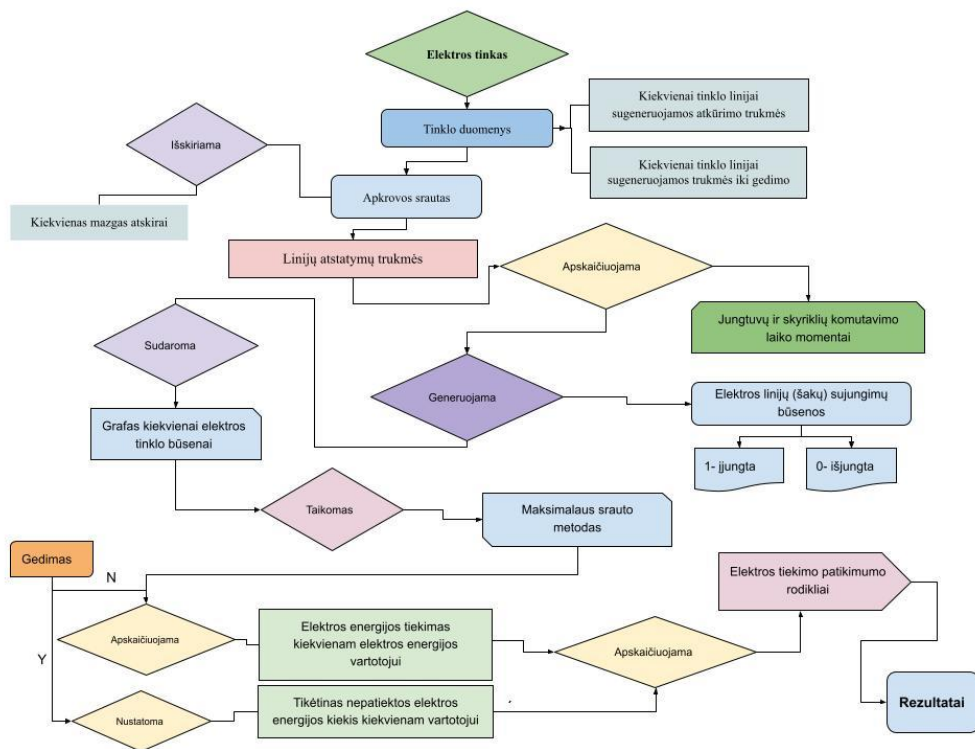
- su išskirtiniais įvykiais SAIDI rodiklio duomenys per 7 metus rodo, kad kai kurių šalių rodiklių vertės labai aukštos, o tai gali reikšti, kad reikalinga didelės investicija į elektros skirstomuosius tinklus;
- planuojami nutraukimai gali reikšti ne tik pasenusį elektros tinklą, bet ir remonto darbus. Remonto metu galimi keitimo ir taisymo, energijos skaitiklių keitimo darbai;
- SAIFI rodiklio įvertinimas ir palyginimas nėra lengva užduotis lyginant visas ES šalis. To priežastis yra ta, jog nutraukimų skaičius skirtingose šalyse yra skirtingai apskaičiuojamas ir vertinamas;
- kabelinės grandinių dalys turi tiesioginę įtaką rodiklių vertėms. Kuo didesnis požeminių kabelių procentas, atitinkamai pertraukimo rodiklių vertės yra žemesnės arba atvirkščiai, kadangi kabelinių linijų atkūrimo laikas gali trukti nuo 12 val. iki 48 val. ir daugiau;
- tinklo patikimumo rodiklių palyginimas yra lengvesnis tarp šalių grupių, t. y. šalių, kurios turi panašias tinklo charakteristikas.

EST ir jo įrenginiai dirba kintančiomis oro, apkrovos ir darbo sąlygomis, todėl patikimumo rodiklių vertinimas privalo būti nuolat peržiūrimas.

2.5. Elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimas

EST geografinė padėtis, tinklo linijų ilgiai, gedimai, jų dažnis, išoriniai ir vidiniai veiksniai turi tiesioginę įtaką elektros tinklo ir energijos tiekimo patikimumui. Šiandien EST patikimumas vertinamas abstrakčiai, probleminiams elektros skirstomojo tinklo segmentams sprendimams taikoma metodika neaiški.

Sukurtas EST patikimumo skaičiavimo algoritmas (žr. 2.18 pav.), panaudojant maksimalaus srauto (angl. *maximum flow*, arba *maxflow*) metodą, elektros tiekimo patikimumui vertinti. Sukurtas algoritmas leidžia įvertinti tinklo patikimumo rodiklius, kai keičiama EST topologija arba vykdomas tinklo modernizavimas, keičiami tinklo įrenginiai, vyraujant skirtingoms tinklo būsenoms. Patikimumo vertinimas vykdomas naudojant pagrindinius išplėstinius rodiklių rinkinius.



2.18 pav. Elektros tiekimo tikimybių rodiklių skaičiavimo algoritmas

Skaičiavimams taikomas Monte Karlo ir maksimalaus srauto metodų kompleksinis vertinimas. Taikant maksimalaus srauto metodą, kiekvienai elektros tinklo būsenai sudaroma veiksmų seka, atsitiktinai sugeneruojami įverčiai ir tikimybiniai rodikliai. Šis metodas identifikuoja sritis, kuriose didžiausias tiekiamos energijos sumažėjimas, paveiktas gedimų. Abu metodai naudojami dėl to, jog maksimalaus srauto metodo optimaliam sprendimui rasti reikia taikyti kitą, papildomą metodą. Todėl naudojamas Monte Karlo metodas atliekant simuliacijas ir stochastinę analizę, modeliavimus, remiantis tikimybinėmis vertėmis ir taip kompensuojant

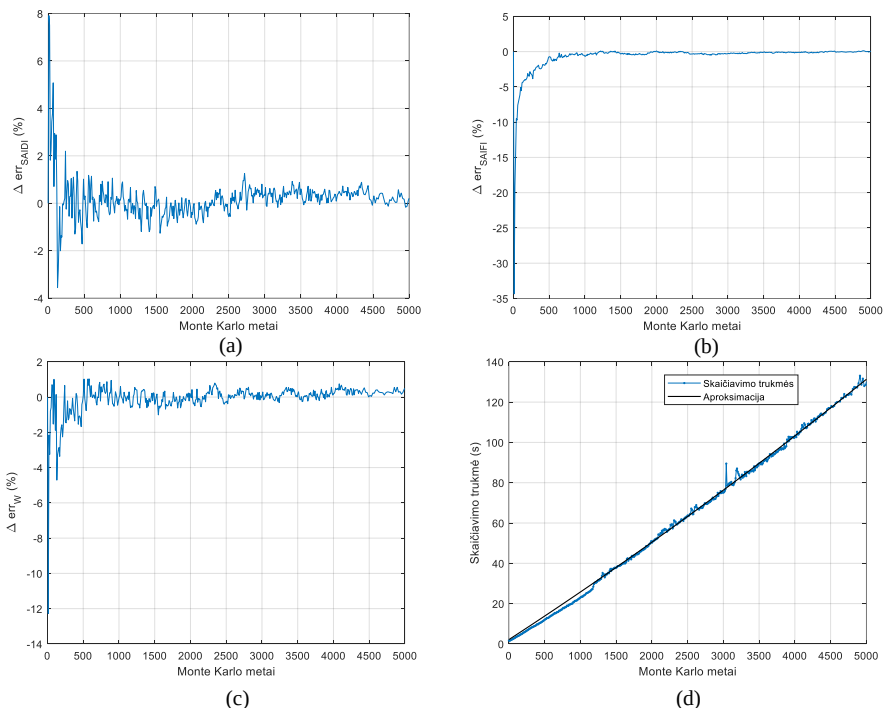
duomenų stoką, analizuojant ir tiriant elektros tinklą tik vienu metodu. Remiantis techninėmis charakteristikomis, metodas leidžia generuoti daug skirtingų variantų, gaunami rezultatai yra patikimesni. Monte Karlo metodu sugeneruojamos elektros tinklo linijų šakų sujungimo atsitiktinės būsenos (linija veikia arba neveikia; visos linijos veikia; visos atjungiamos ir pan.). Skaiciavimo konvergavimas patikrintas analizuojant rezultatus, gautus naudojant skirtingą Monte Karlo metų skaičių.

Aproximacijos koreliacija: $R=0,9982$. Skaiciavimo paklaidų analizė rodo, kad analizuojamam tinklui užtenka naudoti 2000 Monte Karlo metų, kai paklaidos pasiekia mažiau nei 1 procentą. Trumpi perjungimai (elektros tinklo nutrūkimai) iki 3 min. nevertinami. 2.19 pav. a, b ir c grafikuose pateiktos procentinės paklaidos, o d grafike – uždavinio sprendimo trukmės priklausomybė nuo naudojamų Monte Karlo metų. Skaiciavimo trukmės kreivė (kompiuterio procesorius Intel Core i7-8750H 2,21 GHz, RAM 16 GB) gali būti aproksimuota antros eilės polinomu:

$$t = 3,694e-07 \cdot yr^2 + 0,01537 \cdot yr + 1,426, \quad (2.9.)$$

čia t – skaiciavimo trukmė, s;

yr – Monte Karlo metai.



2.19 pav. Monte Karlo metodo paklaidos (a) –SAIDI, (b) – SAIFI, (c) – nepateikta energija viso tinklo vartotojams ir skaiciavimo trukmė (d)

Metodas taikomas sudėtingoms remontuojamoms sistemoms, kai eksploatacija yra nusistovėjusi (nepaisant sistemos detalių gedimų ir intensyvumų) ir suminis gedimų intensyvumas yra pastovus, nekintantis. Taikomi metodai leidžia gauti

statistinius rezultatus ir prognozes, kurios atspindi realią sistemos būklę ir patikimumą. Skaičiavimo metodika realizuota *MATLAB* aplinkoje.

Gedimų pasiskirstymas elektros tinkluose yra stochastinis ir nuolat kintantis procesas, priklausantis nuo anksčiau minėtų faktorių, tinklo būsenos ir jį veikiančių išorinių ir vidinių sąlygų. Siekiant efektyviai valdyti elektros tinklo patikimumą ir užtikrinti patikimą elektros energijos tiekimą vartotojams, atsižvelgiant į ekonominį efektyvumą, pasirenkant optimalius sprendinius taikomas žaidimų teorijos metodas. Šis metodas leidžia naudoti skaičiavimus ir rezultatus, siekiant nustatyti optimalų sprendimą, kuris duotų maksimalią naudą dalyvaujantiems žaidėjams. Metodo simuliacijos vykdomos bendros paskirties programavimo kalba *Python* kaip priemonė, o žaidimų modelio principas – diskretūs įvykiai, pasiskirstę laike. Simuliacija vykdoma 50 metų laikotarpiui, kai paklaidos pasiekia mažiau nei 1 %. Analizuojamos 3 skirtingo jungimo tipo tinklo schemas, atsitiktinis gedimų dažnio pasiskirstymas laike. Patikimumo vertinimas parodo tam tikro tinklo patikimumą atlaikyti gedimus, siekiant kuo mažesnio elektros nutraukimo vartotojams skaičiaus. Tačiau skaičiavimo metodika ir metodai gali kisti, dėl to reikia nuolat skaičiavimus tobulinti, atsižvelgiant į tinklą, jį veikiančius išorinius poveikius.

2.5.1. Veikimo ir atkūrimo laiko įtaka elektros skirstomojo tinklo patikimumui

Kaip jau išsiaiškinta pirmame skyriuje, patikimumas yra tikimybė, kad elektros sistema ar įrenginys veiks tam tikrą laiką be gedimų. Vienas iš pagrindinių EST patikimumą nusakančių parametrų – laikas. Taisomų įrenginių visam darbo procesui skaičiuoti dažniausiai naudojamas *Gauso metodus*. Veikimo / negedimo būsena $R(t)$ laiko intervale $(0, t)$ vyraujant įvairioms darbo sąlygoms numatytame ar nustatytame laiko intervale, tikimybė, kad įrenginys nesuges, veikimas bus atkurtas, veikimo iki gedimo trukmė T bus ilgesnė arba lygi laikui t , tuomet galima užrašyti pasiskirstymo funkciją $R(t) = P(T \leq t)$. Tikimybių tankio funkcija aprašoma formule:

$$r_T(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P[t < T \leq (t + \Delta t)]. \quad (2.10.)$$

Paskirstymo funkcijos ir tankio funkcijos ryšys yra užrašomas:

$$R_T = \int_0^t r_T(t) dt; \quad r(t) = \frac{dR_T(t)}{dt}, \quad (2.11.)$$

čia T – elemento darbo trukmė, $\geq t$.

Elektros tinklo tikimybė veikti aprašoma:

$$R(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}; [val./m.], \quad (2.12.)$$

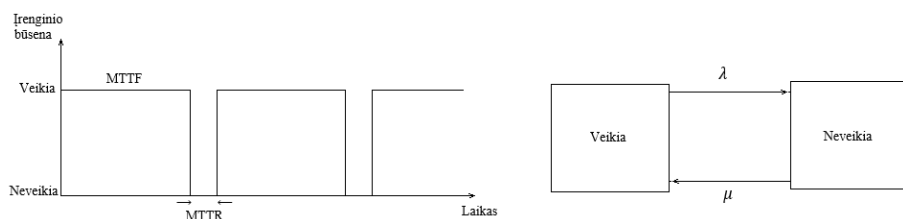
čia $MTTF$ – vidutinis laikas iki gedimo, val.;

$MTTR$ – vidutinis atjungimo laikas, val.

Elektros tinklo neveikimo tikimybė:

$$Q(t) = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR}; [val./m.]. \quad (2.13.)$$

EST įrenginių veikimo ir neveikimo procesas vyksta nuolat (žr. 2.20 pav.), o ne atskirais diskrečiais laiko intervalais. Perėjimai tarp būsenų rodo, jog elementai veikia, o kai perėjimai iš būsenų – elementai neveikia. Jeigu yra žinomas perėjimo iš bet kurios būsenos (iš vienos į kitą) greitis, tuomet galima apskaičiuoti bet kurios sistemos būseną. Kiekvienu laiko momentu elemento būsenos tikimybė būti bet kurios būsenos priklauso tik nuo sistemos būsenos konkrečiu laiko momentu.



2.20 pav. Atjungimų būsenų modeliai su taisomu įrenginiu

Analizuojant EST patikimumą, priimama sąlyga, jog įrenginiai yra taisomi, todėl visas funkcionavimo darbo procesas apibūdinamas atsitiktiniais dydžiais (pasiskirstymais) (Zulani, Lomi, 2017). Įrenginio ar elektros tinklo dalies vidutinė veikimo iki gedimo trukmė (angl. *Mean Time to Failure*, [MTTF]), tikimybiniis funkcijos tankis aprašomas:

$$E(x) = \int x f(x) dx, \quad (2.14.)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt, \quad (2.15.)$$

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = \frac{8760}{\lambda}. \quad (2.16.)$$

Vidutinis gedimų dažnis apskaičiuojamas kiekvienam analizuojamam tinklo komponentui:

$$\lambda = \frac{1}{d} = \frac{8760}{MTTF}; \left[\frac{\text{gedimai}}{\text{metus}} \right]. \quad (2.17.)$$

Atkūrimo (taisymo) intensyvumas $\mu(t)$ – taisymo tikimybės kitimo greičio ir nepataisymo tikimybės laiko momentu t santykis. Taisymo intensyvumas atkūrimo tikimybės kitimo greičio laiko momentu kiekvienam komponentui:

$$\mu = \frac{1}{r} = \frac{8760}{MTTR}; [1/m.]. \quad (2.18.)$$

Taikant eksponentinį metodą, įvertinamas įrenginio patikimumas ir gedimo tikimybė. Įrenginio atkūrimo tikimybė iki pilno darbingumo, esant $\mu = \text{const}$:

$$R_t(t) = 1 - e^{-\mu t}. \quad (2.19.)$$

Taisomų įrenginių patikimumui ir negendamumui apskaičiuoti, įrenginių pataisymo laikui vertinti naudojami kompleksiniai patikimumo rodikliai (parengties ir priverstinės prastovos koeficientai, dar kitaip vadinami techninės parengties koeficientais). Koeficientai apima dvi ar daugiau patikimumo savybių. Įrenginio parengties koeficientas k_p – darbo bei taisymo trukmių t_d , per tam tikrą laikotarpį santykis. Priimama, jog veikimo iki gedimo ir atkūrimo trukmės yra atsitiktiniai dydžiai. Šis tikimybinis rodiklis gali būti apskaičiuojamas:

$$k_p(t_p) = e^{-\mu t} e^{-\lambda t}, \quad (2.20.)$$

čia μ – sugedusio įrenginio taisymo intensyvumas, val^{-1} ;

t_p – sugedusio įrenginio taisymo trukmė, val. ;

t – laikas nuo įrenginio eksploatacijos pradžios $t > t_p$.

Veikimo (negendamumo) tikimybės tankio funkcija išreiškiama priėmus, kad elektros įrenginių $T \gg T_a$, $K_p \approx 1$, tuomet veikimo tikimybė per laiką $(0, t)$:

$$R(t) = k_p e^{-\lambda t}. \quad (2.21.)$$

Priežiūros dažnis $k_\omega(t)$ – priežiūrų skaičius per nustatytą ar numatytą laiko tarpą.

$$k_\omega(t) = \frac{n_p + n_r}{T_v + T_{pv} + T_{pr}}, \quad (2.22.)$$

čia n_p – priežiūrų skaičius per nustatytą laikotarpį (t) ;

n_r – remontų skaičius per nustatytą laikotarpį (t) .

Taisomi įrenginiai gali būti analizuojami pasitelkiant būtino įvykių tikimybių skaičiavimo metodiką. Priimama, jog taisomas įrenginys turi dvi būsenas: 0 – veikimo ir 1 – gedimo. Tuomet būsenos bet kurio laiko momentu t tikimybė $P_0(t)$ ir $P_1(t)$ įvairiomis pradinėmis sąlygomis. Būtino įvykio tikimybę galime užrašyti:

$$P_0(t) + P_1(t) = 1. \quad (2.23.)$$

Taip pat patikimumas vertinamas laiko atžvilgiu: nuo 1 (kai elektros tinklas ar jo dalis yra naujas) iki 0 (nusidėvėjęs arba nepataisomai sugedęs). Elektros tinklo ar jo įrenginių patikimumas gali būti išreiškiamas žemiau pateikta formule:

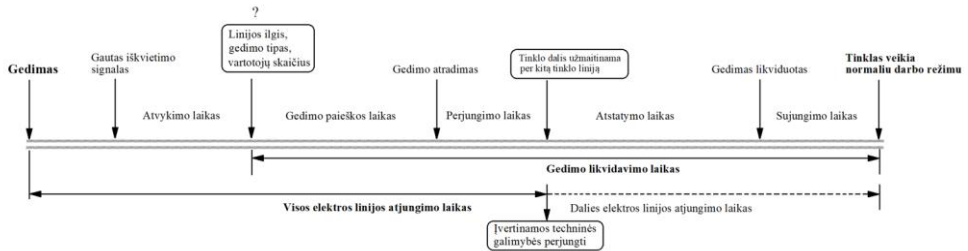
$$P(t) = e^{-(\lambda' t' + \lambda'' t'')}, \quad (2.24.)$$

čia t' įrenginio darbo laikas vyraujant tam tikroms aplinkos sąlygoms;

λ' – gedimų intensyvumas;

t'' – įrenginio veikimo laikas esant kitoms sąlygoms su atitinkamu gedimų intensyvumu λ'' .

Statistinė išraiška: per laiko vienetą sugedusių ir dirbančių įrenginių skaičių santykis, su priimtina sąlyga, jog visi sugedę įrenginiai yra pataisomi ir toliau eksploatuojami. Šiandien STO apie gedimus, įvyksiančius elektros skirstomuosiuose tinkluose, dispečeris sužino tik iš vartotojų. Pagrindinis laikas, įvykus elektros tinklo nutrūkimui, kuris vertinamas atnaujinant elektros energijos tiekimą, pavaizduotas 2.21 paveiksle.



2.21 pav. Gedimo šalinimo ir atkūrimo laiko procesas EST

Laikas, kai vykdomas atkūrimas po gedimo, – abstraktus. Priklausomai nuo tinklo lokacijos ir gedimo aptikimo, laikas gali būti vertinamas skirtingai, kas gali apsunkinti skaičiavimus. Dažniausiai gedimo pradžios laiku laikomas laikas, kai apie gedimą praneša pats elektros energijos vartotojas arba kai fiksuojamas gedimas sistemoje. Laikas, kai linija ar jos dalis buvo atjungta ir vykdomi atkūrimo darbai, yra bendrinis, jis aprašomas laiko dedamųjų suma:

$$T = \sum \lambda_i \cdot t_r + (\lambda - \lambda_i) \cdot t_s + \left(\sum_{j=1}^{i-1} \lambda_j \right) \cdot t_t, \quad (2.25.)$$

čia λ – gedimų dažnis visoje elektros linijoje arba jos dalyje;

λ_i – gedimų dažnis i apkrovos mazge;

t_r – atkūrimo laikas;

t_s – prijungimo (pajungimo) laikas;

t_t – sujungimo, perjungimo laikas.

Kasmetinė vidutinių atjungimų trukmė įvykus gedimams skirtingose elektros skirstomojo tinklo zonose apskaičiuojama pagal formulę:

$$U_j = \sum_{i \in I} (\lambda_i \cdot t_{ij}), \quad (2.26.)$$

čia U_j – numatytas vidutinis atsijungimų laikas;

t_{ij} – atjungimų laikas, analizuojamame mazge j , įvykus i gedimui.

Remiantis išanalizuota moksline literatūra ir kokybiniais EST duomenimis, toliau skaičiavimuose taikomas atkūrimo laikas skirstomas į tris lygius: žemą, tipinį, aukštą (žr. 2.5 lentelę).

2.5 lentelė. Gedimų šalinimo laikas

Elektros tinklo dalis	MTTR lygiai, val.		
	Žemas	Tipinis	Aukštas
Oro linijos	120	240	640
Jungiklis	720	240	720
Požeminis kabelis	18000	600	18000

Išskyla poreikis stebėti ir gerinti gedimų valdymo procesus, siekiant efektyviau planuoti remonto ir priežiūros išlaidas, taip pat įvertinant atkūrimo laiko grafikus. Naudojant gedimų šalinimo laikus, kurie pateikti 2.5 lentelėje, kaip veiklos rodiklį, galima matyti ir analizuoti gedimų atkūrimo procesą. Svarbus rodiklis yra MTTR, jis parodo, kiek vidutiniškai užtrunka pašalinti gedimą ir grąžinti sistemą ar tinklo dalį į normalią darbinę veiklą. Jei vidutinis atkūrimo laikas yra trumpesnis, tai reiškia, kad sistema ar jos dalis greitai grąžinama į normalią darbinę veiklą, gedimų šalinimo procesas yra efektyvus. Naudojant šį veiklos rodiklį, galima efektyviau planuoti remonto ir priežiūros išlaidas, kadangi, žinant, kiek vidutiniškai užtrunka pašalinti gedimus, galima prognozuoti laiko ir resursų poreikius. Taip pat galima identifikuoti silpnąsias vietas ir tobulinti procesus, siekiant sumažinti MTTR rodiklį ir padidinti sistemos darbingumą, veikimo efektyvumą.

2.5.2. Maksimalaus srauto metodas patikimumui vertinti

Elektros tiekimo vartotojams patikimumo rodikliai tiriami maksimalaus srauto metodu. Šio metodo privalumas yra tai, kad elektros sistemos modeliui sudaryti užtenka palyginti nedaug pradinių duomenų: reikalinga tinklo topologija ir tinklo elementų pralaidumai. Šiuo metodu galima apskaičiuoti optimalias srauto trajektorijas tinkle, išnaudojant elektros tinklo galimybes minimaliai paveikiant elektros vartotojus. O tai padeda išvengti perteklinės elektros energijos vartojimo ir galios praradimų, taip pat pagerina elektros energijos efektyvumą ir tinklo patikimumą.

Elektros sistema aprašoma grafu, sudarytu iš mazgų ir šakų. Elektros sistemos pastotės, generatoriai ir apkrovos modeliuojami kaip tinklo mazgai (grafų teorijoje vadinami *viršūnėmis*), o elektros linijos ir transformatoriai – kaip šakos arba grafo kraštinės. Elektros tinklas vaizduojamas kaip grafikas $G = (V, E)$ su n viršūnių, pasiskirsčiusių V ir k briaunų aibėje E . Sujungimų matrica A apibrėžia grafo topologiją. Sujungimų matricos elementai a_{ij} žymi kraštinės, jungiančios du mazgus, svorius. Kai $a_{ij} > 0$, tai reiškia, kad yra ryšys tarp mazgo i ir mazgo j . Esant $a_{ij} = 0$, nėra ryšio tarp i ir j .

Elektros linijų pralaidumai parenkami kaip briaunų svoriai. Srautai grafe žymimi vektoriumi: $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n) \in \mathcal{R}^P$. Kiekvienoje viršūnėje ($e_i \in E$) galioja

pirmasis Kirchhofo dėsnis, t. y. į viršūnę įtekančių srautų suma būtų lygi iš viršūnės ištekančių srautų sumai.

Grafo pradžios viršūnė s , o pabaigos viršūnė – t , tuomet didžiausias tikėtinas srautas iš s į t bus grafo maksimalus srautas, atitinkantis nagrinėjamo tinklo pralaidumą (Jiakun ir kt., 2018). Maksimaliam srautui apskaičiuoti naudojamas *Fordo-Fulkersono* algoritmas. Turimam grafui $G = (V, E)$, su briaunų pralaidumais $c = (u, v)$ ir srautais $f(u, v) = 0$, visose briaunose $u-v$, nustatomas maksimalus srautas (pralaidumas) iš šaltinio s į imtuvą t . Kiekviename žingsnyje galioja sąlygos:

- $0 \leq f(u, v) \leq c(u, v)$;
- $f(u, v) = -f(v, u)$;
- $\sum_v f(u, v) = 0 \Leftrightarrow f_{in}(u) = f_{out}(u)$ – visoms viršūnėms, išskyrus s ir t .

Sudaromas grafas $G_f = (V, E_f)$, kurio pralaidumas yra apskaičiuojamas:

$$c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v) + f(v, u) \quad (2.27.)$$

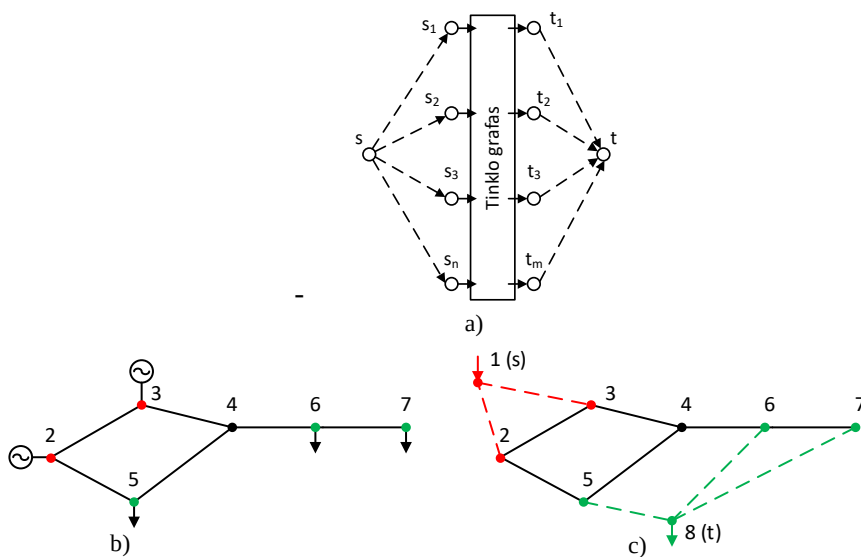
Elektros tinkle (žr. 2.22 pav., *b*), esant mažam šaltinių ir imtuvų (vartotojų) skaičiui, tinklo grafas modifikuojamas įvedant fiktyvaus šaltinio ir fiktyvaus imtuvo viršūnes, o maitinimo pastotes, generatorius ir vartotojus pakeičiant atitinkamo pralaidumo briaunomis (2.22 pav., *a*). 2.22 pav. *b* dalyje generatoriai yra prijungti prie 2 ir 3 mazgų, apkrovos prijungtos prie 4, 6 ir 7 mazgų. Elektros tinklą atitinkantis grafas pateiktas 2.22 pav. *c* dalyje. Prie grafo pridedamas virtualus šaltinis s (mazgas 1) ir virtualus imtuvas t (mazgas 8). Generatorių galia aprašoma briaunų svoriais 1–2 ir 1–3, o vartotojų – briaunų svoriais 5–8, 6–8 ir 7–8. Sudarant grafą, nurodomos generatorių ir vartotojų pilnutinės galios:

$$S_{gen} = \sqrt{P_{gen}^2 + Q_{gen}^2}, \quad (2.28.)$$

$$S_{ap} = \sqrt{P_{ap}^2 + Q_{ap}^2}, \quad (2.29.)$$

čia P_{gen} ; Q_{gen} – aktyvioji ir reaktyvioji sugeneruota galia;

P_{ap} ; Q_{ap} – aktyvioji ir reaktyvioji apkrovos galia.



2.22 pav. Grafo su keletu šaltinių ir imtuvų pakeitimas grafu su vienu virtualiu šaltiniu ir vienu virtualiu imtuvu (a), elektros tinklo schema (b) ir ją atitinkantis grafas (c)

Sudarius grafą, Monte Karlo metodu generuojamos elektros tinklo elementų būsenos ir kiekvienai tinklo būsenai maksimalaus srauto metodu apskaičiuojamas maksimalus srautas iš virtualaus šaltinio į virtualų imtuvą. Jei šis srautas mažesnis nei vartotojų suminis galios poreikis, vadinasi, nagrinėjamos tinklo būsenos topologija arba linijų pralaidumo galimybės riboja elektros tiekimą konkrečioms vartotojams. Taigi, maksimalaus srauto metodas leidžia įvertinti elektros skirstomojo tinklo būsenas, tinklo patikimumą, apskaičiuoti, kiek vartotojams bus nepateikta elektros energijos bendrai visame tinkle ir atskirai kiekvienai transformatorinei (konkrečiam elektros tinklo vartotojui).

2.5.3. Monte Karlo metodo pritaikomumas vertinant elektros tinklo patikimumą

Vertinimo technikos ir modelio tinkamumas, vertinamų rodiklių gausa elektros sistemai vertinti, jų įvesties tinkamumas ir kokybė – tai pagrindiniai ir svarbiausi aspektai pasirenkant tinkamiausius sprendinius ir modelį. Monte Karlo metodas pasirinktas dėl jo galimybių vertinti EST patikimumą, analizuoti elektros tinklo ar visos sistemos būseną (Yuan ir kt., 2005; Brown 2009; Haakana ir kt., 2011; Liu, 2019). Monte Carlo būsenų modeliavimo metodu imituojamas procesas, analizuojamos atsitiktinės sistemos būsenos, apskaičiuojant sudėtingų struktūrų patikimumo parametrus. Monte Karlo metodas išskirtinis tuo, kad yra naudojama atsitiktinių dydžių generacija, dėl ko reikia pateikti daug skaičiavimo rezultatų, kad būtų išvestas vidurkis ir būtų gautas kuo tikslesnis norimas rezultatas.

Dėl gedimų stochastinio pasiskirstymo elektros tinkluose dažniausiai tinklo būseną analizuojama laikotarpiui $(2000 \cdot 8760)$. Metodas turi *nuoseklią (tolydžią)* ir *nenuseklią (diskrečią)* technikas, kurių skaičiavimo principai gali skirtingai pateikti

skaičiavimo rezultatus. Naudojant Monte Karlo metodą, atsitiktiniams skaičiams generuoti yra naudojamas suderinta (angl. *congruent*) generacija, ją naudojant yra sukuriamas tolydus atsitiktinių skaičių pasiskirstymas nuo 0 iki 1. Modeliavimui taikomas būsenų modeliavimo metodas, o sistemų būsenos pasirenkamos pagal sistemų elementų būsenas, kurios gaunamos skaitinio eksperimento metu. Priimama, jog sistemų elementų būsenos nuo 0 iki 1 – tolygiai pasiskirsčiusios atsitiktiniais dydžiais. Tuomet atsitiktinio kintamojo X įgyjama konkreti reikšmė – atsitiktinė realizacija, kuri apibūdinama dviejų būsenų modeliu. Atsitiktinio kintamojo funkcija išreiškiama:

$$X: \Omega \rightarrow S, \quad (2.30.)$$

$$X(\omega) = x \in S, \quad (2.31.)$$

čia Ω – imties erdvė;
 S – atsitiktinio kintamojo x būsenų erdvė;
 $X(\omega)$ – realizacija;
 ω – imties elementas.

Numatoma modeliavimo vertė yra lygi rezultatų vidurkio vertei, kai artėja modeliavimų skaičius N begalybėje.

$$r = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i, \quad (2.32.)$$

čia r_i - i -tosios simuliacijos rezultatai;
 R – tikėtinos vertės;
 N – simuliacijų skaičius.

Naudojant atsitiktinių dydžių transformavimo eksponentinę funkciją, apskaičiuojama laiko iki gedimo trukmė:

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln U_1. \quad (2.33.)$$

Atkūrimo trukmė apskaičiuojama:

$$T = -\frac{1}{\mu} \ln U_2, \quad (2.34.)$$

čia U_1, U_2 – tolygiai pasiskirstę atsitiktiniai dydžiai.

Būsenų erdvės $S = \{\textit{Laisvas}, \textit{užimtas}, \textit{sugedęs}, \textit{neaktyvus}\}$, kurios susideda iš n elementų, būseną yra išreiškiama vektoriumi: $S = (S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n)$,
 čia S_i – i -tojo sistemos elemento būseną.

Sistemos elemento būseną yra aprašoma Laplaso transformacija:

$$S_i = \begin{cases} 0 & (Veikia) \\ 1 & (Neveikia) \end{cases} \quad (2.35.)$$

Elementas veikia 0, kai $U_i \geq \bar{K}_{pi}$; esant elemento gedimui (1), jeigu $U_i < \bar{K}_{pi}$, čia $\bar{K}_{pi}$ – i -ojo elemento neparengties koeficientas, elemento neveikimo tikimybė.

Naudojant šį metodą, esant įvairių elementų gedimų dažniui ir atkūrimo greičiui, pastoviam dydžiui, tikimybinės kiekvienos būsenos sąlygos bus pastovios: $\lambda = const$; $\mu = const$. Esant pastovioms būsenų sąlygoms, dažniausiai skaičiavimus atlikti yra pakankamai paprasta. Tačiau realiose situacijose būsenos keičiasi nuolatos.

Taigi, šis metodas ir jo gautų rezultatų analizė įgalina nustatyti sistemos patikimumo charakteristikų kitimą, atsižvelgiant į laiką, nustatoma, kokią įtaką sistemos darbo efektyvumui turi elektros linijų avarijos ir tinklo neveikimo, rezervinio maitinimo įjungimas.

2.5.4. Žaidimų teorijos metodas patikimumo vertinimo kontekste

Elektros vartotojai yra svarbi dalis, turinti įtakos elektros energijos poreikiui reguliuoti, jie turės įtakos pakitimams, elektros energijos naudojimo būdams, kad sumažintų elektros sąskaitas, skatindami elektros energijos kainų mechanizmą (Bae ir kt., 2014). Elektros vartotojas gali turėti tiesioginę įtaką elektros kainai, kadangi kiekvienas elektros energijos vartotojas turi tikslą mažiau mokėti už elektros energiją, gaudamas užtikrintą paslaugos tiekimą. Pardavėjai taip pat susiję su elektros energijos vartotojais, jie pasiūlo skirtingus elektros energijos pardavėjus, atsižvelgdami į jų siūlomas kainas ir paslaugas ir tuo pačiu tikslu siekdami sumažinti savo suvartojamos elektros energijos kainas. Elektros energijos rinka (angl. *Electricity Market*, [EM]) susideda iš įvairių sandorių, yra nuolat auganti ir ateityje gali turėti sudėtingą ir įmantrų žaidimo elgesį (Apynys, 2007; Avis ir kt., 2010; Cuzanauskas, Anskaitis, 2015; Zhou ir kt., 2017; Mei ir kt., 2017; Zeng, 2017; Cheng, Yu, 2019; Li, Ye, 2018).

Žaidimo teorija skirstoma į klases, tai: kooperacinis žaidimas (žaidėjai tarpusavyje bendradarbiauja), nekooperacinis, nekoalicinis (žaidėjai nebendradarbiauja) (Nash, 1951), evoliucinis (vystymosi) žaidimas (Smith, 1973; Taylor, 1978). Paprastai tariant, žaidimas gali būti skirstomas į klasikinį ir evoliucinį žaidimą, atsižvelgiant į dalyvių racionalumo laipsnį. Žaidimų teorijai būdingi pagrindiniai aspektai:

1. Vadovaujamasi nustatytais taisyklėmis (angl. *rules*);
2. Siekiama naudos (angl. *payoffs*);
3. Nežinomas rezultatas (angl. *uncertainty of the outcomes*);
4. Priimami sprendimai (angl. *decision making*);
5. Negalima apgauti (angl. *no cheating*).

Kiekvienas žaidimas susideda iš ėjimų, t. y. kiekvieno žaidėjo sprendimų ir įgyvendinimų. Žaidimo strategijos gali būti atsitiktinės ir asmeninės, kai naudojamos ir žinomos bendros taisyklės visiems dalyvaujantiems žaidėjams. Energetikoje tinka tik asmeninės, kadangi bendros taisyklės turi vyrauti dėl vyraujančių mainų, o žaidėjai turi pasirinkti atitinkamą sąmoningą sprendimą.

Žaidimų teorijos tikslas – rekomenduoti žaidėjams racionalius sprendimų priėmimus, kurie atneštų racionalias sprendimų priėmimo strategijas. Taip pat, įtraukiant elektros tinklą kaip žaidėjo sprendinį, parodyti patikimumo lygius ir esamą tinklo padėtį. Tikslas – įvertinti tinklo patikimumui turinčių įtaką žaidėjų sprendimų pasirinkimą.

Remiantis tipišku n žaidėjų žaidimu (Cheng, Yu, 2018; 2019; 2020), kuris įvardijamas Nešo pusiausvyra, tuomet esant įprastai žaidimo formai:

$$G = \langle N, S, U \rangle. \quad (2.36.)$$

Visa žaidimo forma susideda iš trijų pagrindinių elementų:

1. Žaidėjų rinkinio (Cuzanauskas, Anskaitis, 2015). Visa žaidėjų aibė $N = \{1, 2, \dots, n\}$, o atskiri žaidėjai žymimi: $i, j, k \dots$ ir t. t., čia N – baigtinė aibė.
 $n = |N|$ – aibę sudarančių žaidėjų skaičius.

2. Kiekvieno n žaidėjo strategijos S_i (*sąrankos*) ir strateginės erdvės $s_i \in S_i, i = 1, 2, \dots, N$:

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \quad (2.37.)$$

čia S žymi strateginį dalyvių $i \in N$ rinkinį.

Visų dalyvių strateginė kombinacija:

$$s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}. \quad (2.38.)$$

3. Kiekvieno žaidėjo atsipirkimo ar naudingumo funkcija U_i , pavadinimu $U_i(s)$ (laimėjimo funkcija – $f_i(x)$).

$$s_i \rightarrow R, i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.39.)$$

$$u = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}. \quad (2.40.)$$

Žaidėjų n tikslas – sumažinti savuosius mokėjimus ir padidinti pajamas. Jeigu žaidėjas pasirenka S_i strategiją, tai kitas žaidėjas arba žaidėjai atsakys S_j strategija. Tad, esant S_j strategijai, iki minimumo sumažėja S_i laimėjimai.

Strategijų pasirinkimo įvertinimas balno tašku (angl. *Saddle point*).

Žaidimų teorijoje vyrauja tokie pagrindiniai principai:

- 1) *Maximin* principas. Padidinti minimalų garantuotą pelną q A žaidėjo.
- 2) *Minimax* principas. Minimizuoti maksimalius nuostolius.
- 3) Balno taškas. Kai žaidimo vertės sutampa, t. y.:

$$\text{Maximin vertė} = \text{Minimax vertė}.$$

(2.41.)

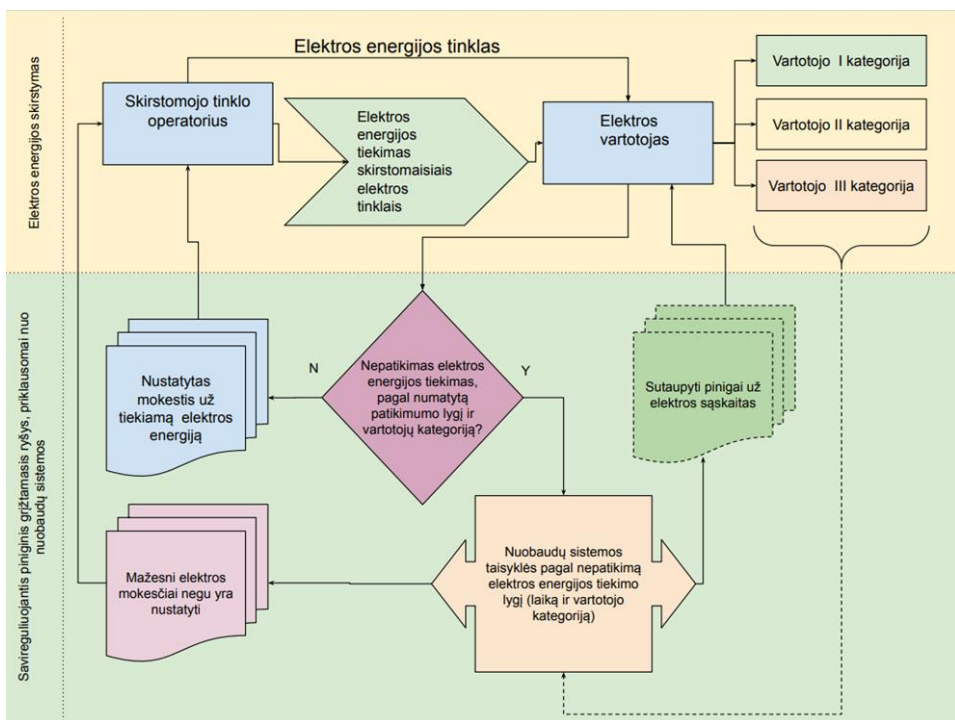
Strategijos, atitinkančios balno tašką, vadinamos optimaliosiomis strategijomis. O visos šios strategijos sudaro žaidimo uždavinio sprendimą. Jeigu žaidimas turi balno tašką, tuomet vertė, priklausanti balno taškui, yra vadinama *žaidimo grynąja verte*, $\alpha = \beta = v$, dviejų asmenų *nulinės sumos* (angl. *Zero Sum*) žaidimas. Šiame žaidime dalyvauja 2 žaidėjai. Vieno žaidėjo laimėjimas yra lygus kito žaidėjo pralaimėjimui.

Siūlomi žaidimų scenarijai parinkti atsižvelgiant į: energijos gamybos ir tiekimo pusę, paskirstymo tinklą, paklausą, taip pat atkreipiant dėmesį į bendras planavimo ir paskirstymo problemas, esančias integruotose energetinėse sistemose. Elektros energijos pardavėjų ir prekybos modeliai vystosi įvairiapusiškai. Tad, atvėrus elektros energijos rinką, paklausos ištekliai nebėra sutelkti tik į elektros energijos vartotojo apkrovas, tai apima: paskirstytą energiją kaip paskirstytą gamybą, paskirstytos energijos kaupimą ir transportavimo priemones (Cheng, Yu, 2021).

Skaiciavimams pasirinktas *Nešo* pusiausvyros metodas – optimalumo principas, taikomas vieno ar daugiau žaidėjų žaidimo sprendimams priimti, kai nė vienas žaidėjas negali padidinti savo laimėjimo visapusiškai pakeitęs tik savo sprendimą, todėl reikalingas bendras žaidimo dalyvių pasirinkimas (bendros taisyklės). Žaidimo metodas taikomas, kai visi žaidėjai siekia maksimalaus laimėjimo, žaidėjai griežtai laikosi strategijų, turi pakankamai žinių pasirinkti tam tikrą strategiją, visi žino abipuses pusiausvyros strategijas, esant kiekvieno iš jų nukrypimams. Svarbu užtikrinti, kad tai neturės įtakos kitų žaidėjų strategijų pakeitimams ir visi dalyvaujantys žaidėjai žino, kad jie tenkina numatytas sąlygas. Svarbu pabrėžti, kad žaidėjai žino vienas kito strategijų galimus pasirinkimus, todėl nėra prasmės ir naudos keisti strategijas individualiai.

Esant *Nešo* pusiausvyrai, nebendradarbiavimas žaidime reiškia, kad pavieniai žaidėjai negali pasiekti daugiau asmeninės naudos, kai vienašališkai yra keičiama strategija, kai visi žaidėjai yra *Nešo* pusiausvyros būsenoje. Žaidimų teorijos strategijos taikomos STO ir elektros energijos vartotojams bendradarbiavimui užtikrinti.

Vartotojas, mokėdamas didelę elektros energijos kainą, privalo gauti kokybę ir greitą tinklo atkūrimą avarijos atveju. Todėl reikalinga EST sistema, skirta ne tik STO gerovei, bet ir vartotojo teisėms užtikrinti dėl mokamos kainos už paslaugą, kuri padidintų tinkamų investicijų paskirstymą už tinklo priežiūrą ir jo atnaujinimą (žr. 2.23 pav.).

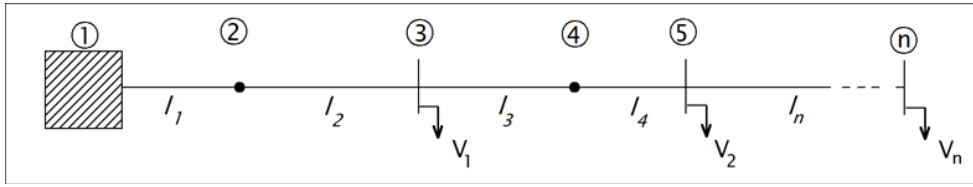


2.23 pav. Žaidimų teorijos metodo taikymo algoritmas

Metodo taikymo algoritmas reikalingas, kad būtų tam tikras įrankis, kuris galėtų reguliuoti konkurencinius rezultatus, laikantis nustatytų bendrų taisyklių. Tam tikri apribojimai ir taisyklės sumažintų tikimybes vienam žaidėjui žaisti tik esant palankiausiems vienos pusės strategijų pasirinkimams ir įvesti tik savo taisykles, kai kitas žaidėjas, laikydamasis taisyklių, neturi galimybės pasirinkti jam palankaus sprendimo. Dėl to reikia žaidėjams taikomų „saugiklių“, bendrų žaidimų taisyklių, kurios užtikrintų abipusį žaidėjų taisyklių laikymąsi, kurių pagrindu neįvyktų vienpusiai žaidėjų laimėjimai, kai kitas būtų nuolatinis pralaimėtojas.

Žaidimų teorijoje analizuojamos trys skirtingos EST topologijos: elektros tinklas yra spindulinio tipo (žr. 2.24 pav.); tinklas, turintis nepriklausomus tiekimo šaltinius (žr. 2.25 pav.); tinklas radialinis, kai tinkle yra daugiau nei vienas elektros tiekimo šaltinis (žr. 2.26 pav.). Tikėtinas atjungimo laikas mazge i , kai vykdomas gedimų šalinimas, gali būti apskaičiuojamas:

$$A_i = \sum \lambda_i \cdot t_r \quad (2.42.)$$



2.24 pav. 1-oji analizuojama schema taikant žaidimų teorijos skaičiavimo metodiką

Vieno elemento techninė apžiūra ar gedimas turės įtakos visos linijos atjungimui, ir visi šios linijos vartotojai neteks elektros energijos tiekimo, iki kol nebus atnaujintas elektros energijos tiekimas darbinio režimu. Kai mazge įvykęs gedimas, tačiau jame nėra jokio jungiklio, tuomet sąlyga gali būti užrašoma:

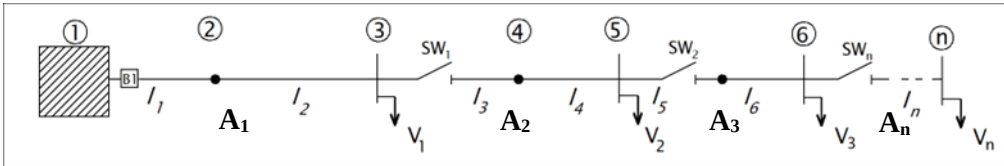
$$A_1 = A_2 = A_n = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_n)t_r. \quad (2.43.)$$

Ši sąlyga tinkama ir taikoma 1-ajai analizuojamai schemai.

$$\sum_i t_i = A_1 + A_2 + A_3 = \lambda(t_r + 2t_s), t_t = 0, \quad (2.44.)$$

čia A_1, A_2, A_n – apkrovos mazgai.

Schemoje, pavaizduotoje 2.25 pav., yra įdiegti perjungikliai, kurie atjungia tinklo dalis įvykus tinklo gedimams, taip pat galimas vykdyti tinklo perjungimas ir elektros energijos maitinimas per kitą tinklo liniją.



2.25 pav. 2-oji analizuojama schema taikant žaidimų teorijos skaičiavimo metodiką

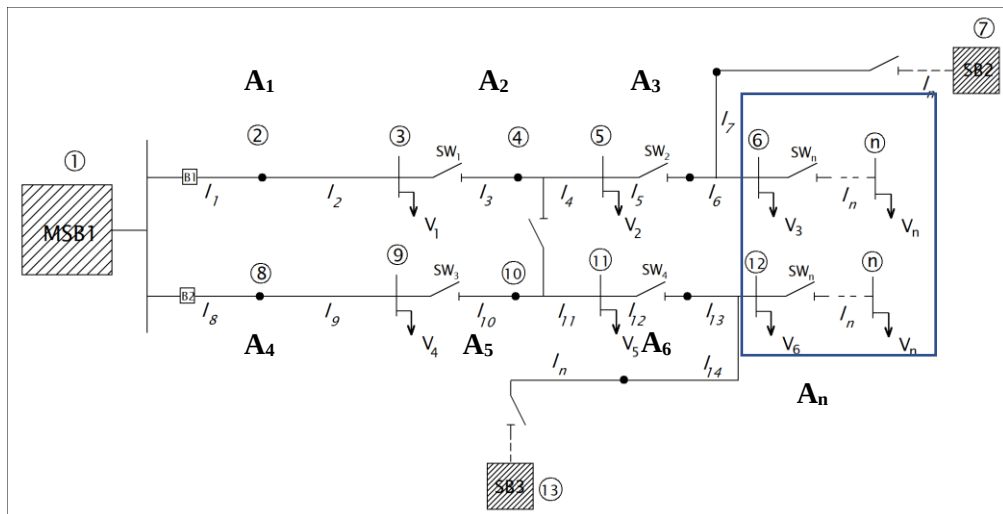
Esant tinklo perjungikliams ir turint papildomus elektros energijos tiekimo šaltinius, galima pagerinti tinklo patikimumą ir užtikrinti greitesnę elektros energijos tiekimo atnaujinimą vartotojams.

$$A_n = \left(\sum_{i=1}^N \lambda_n \right) t_r + (\lambda_n) t_s. \quad (2.45.)$$

Įvertinus skirtingas gedimų lokacijas: $A_1; A_2; A_3$ pateikiama skaičiavimo metodika:

$$\begin{cases} A_1 = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)t_r + (\lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)t_s \\ A_2 = (\lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)t_r + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)t_s \\ A_3 = (\lambda_3 + \dots + \lambda_n)t_r + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)t_s \end{cases}$$

Ši sąlyga teigia: esant gedimui A_1 dalyje, reikia pašalinti pirmoje grandinėse dalyje (l_1) gedimus, o antroje linijos dalyje (l_2) – tik prijungti elektros vartotojus prie elektros tinklo; esant gedimui A_2 ir A_1 dalyje, reikia pašalinti pirmoje grandinės dalyje (l_1) gedimus, įjungti į sistemą, o antroje linijos dalyje (l_2) – pašalinti gedimus.



2.26 pav. 3-ioji analizuojama schema taikant žaidimų teorijos skaičiavimo metodiką

Įvertinus skirtingas gedimų lokacijas, pateikiama skaičiavimo metodika 2.26 pav. pavaizduotai 3-čiai analizuojamajai schemai:

$$\begin{cases} A_1 = \lambda_1 t_r + (\lambda_2 + \lambda_3) \cdot (t_s + t_t) \\ A_2 = \lambda_1 (t_s + t_t) + \lambda_2 (t_r + t_s) + \lambda_3 t_s, \\ A_3 = (\lambda_1 + \lambda_2)(t_s + t_t) + \lambda_3 t_r \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda - \lambda_1 & 0 \\ \lambda_2 & \lambda - \lambda_2 & \lambda_1 \\ \lambda_3 & \lambda - \lambda_3 & \lambda_1 + \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_r \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix},$$

Esant tokio pat tipo linijai ir panašiam gedimų skaičiui, matrica gali būti užrašoma:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \lambda_l \begin{bmatrix} t_r & t_s & t_s \\ t_s + t_t & t_r & t_s \\ t_s + t_t & t_s + t_t & t_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix},$$

čia l_1, l_2, l_3 – linijų ilgiai;

λ_l – gedimų intensyvumas tam tikrame (numatytaime) linijos ilgyje (km / m.).

Patikimumą galima įvertinti ir žinant gedimų skaičių tam tikroje apkrovos zonoje:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_r & t_s & t_s \\ t_s + t_t & t_r & t_s \\ t_s + t_t & t_s + t_t & t_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}.$$

Ši matricos išraiška aprašo visą galimą atjungimų laiką kiekvienam vartotojui atskirai, visų galimų gedimų atvejus numatytoje elektros linijoje. Jeigu priimama, kad perjungimo laikas $t_t = 0$, $t_s < t_r$, persijungimas įvyksta iškart atsijungus vienai linijos daliai, tuomet matrica supaprastėja:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda - \lambda_1 \\ \lambda_2 & \lambda - \lambda_2 \\ \lambda_3 & \lambda - \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_r \\ t_s \end{bmatrix} = \lambda_l \begin{bmatrix} l_1 & l - l_1 \\ l_2 & l - l_2 \\ l_3 & l - l_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_r \\ t_s \end{bmatrix}.$$

Taigi, ši skaičiavimo išraiška parodo, kad kiekvienas vartotojas pasirenka patikimumo lygį. Žinant tinklo situaciją, reikia priimti optimalius sprendimus, kad elektros energijos vartotojas būtų užtikrintas nepertraukiamu elektros energijos tiekimu.

2.5.5. Elektros tinklo modernizavimo priemonių techninis įvertinimas

Techninis ekonominis įvertinimas reikalingas norint apskaičiuoti: vidutinį gedimų skaičių, prastovos laiką, nepatiktos elektros energijos ir galios išlaidas. Ekonominio apskaičiavimo reikia norint parodyti, kiek kainuoja planiniai ir neplaniniai elektros energijos nutrūkimai elektros vartotojui ir valstybei. Šiandien išlaidų dedamoji elektros tinklui prižiūrėti ir atnaujinti auga, o išlaidos Z_n materialinei žalai kompensuoti – mažėja. Pagal faktą tiekimo patikimumo lygtis turi būti: $Z = Z_n$.

Atsijungimų išlaidos, kurios atsiranda dėl įvykusių gedimų elektros skirstomajame tinkle, apskaičiuojamos pagal pateiktą formulę:

$$C_j = \sum_{i \in I} \lambda_i \cdot \{a_j(t_{ij}) + b_j(t_{ij}) \cdot t_{ij}\} \cdot P_j, \quad (2.46.)$$

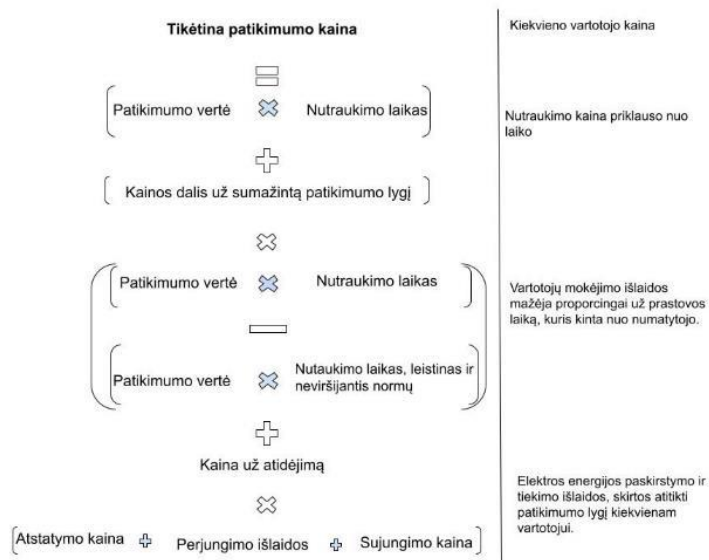
čia C_j – nutrauktos galios kaina P_j ir nepatiktos elektros energija mazge j ;

$a_j(t_{ij})$ – nepatiktos galios vieneto kaina (paklausa kW);

$b_j(t_{ij})$ – nepatiktos energijos vieneto kaina (paklausa kWh);

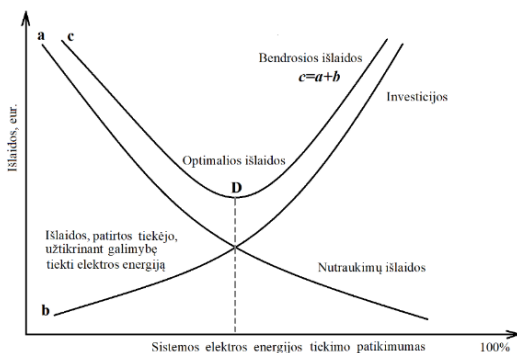
t_{ij} – atjungimo laikas mazge j , įvykus tam tikram i gedimui.

Įvertinus gedimų intensyvumą ir trukmę, pateikiamas kainos ir elektros energijos nepatiekimo santykis per ataskaitinį (1-ųjų metų) laikotarpį (žr. 2.27 pav.).



2.27 pav. Elektros tiekimo ir nutrūkimo kainos

Nutraukimo išlaidos vartotojams – elektros energijos tiekimo praradimo rezultatas. Todėl sistemos elektros energijos tiekimo patikimumas turi tiesioginę sąsają su optimaliomis išlaidomis (žr. 2.28 pav.).



2.28 pav. Išlaidų palyginimas su elektros sistemos patikimumu

Atkūrimo kaina priklauso nuo gedimų dažnio ir atkūrimo laiko. Neįvertinus konkretaus įkainio, atkūrimo kaina gali būti aprašoma atsipirkimo funkcija:

$$C_{r_i} = t_r \cdot \lambda_{r_i}, \quad (2.47.)$$

čia λ_{r_i} – gedimo dažnis, kuris susijęs su atkūrimu;
 t_r – atkūrimo laikas.

Perjungimo išlaidos apskaičiuojamos:

$$C_{s_i} = t_s \cdot \lambda_{s_i}, \quad (2.48.)$$

čia λ_{s_i} – gedimo dažnis, kuris susijęs su perjungimu (elektros maitinimo tiekimu per kitą tinklo sritį ar liniją);
 t_s – perjungimo laikas.

Sujungimo (perjungimo su kita elektros linija) kaina išreiškiama formule:

$$C_{tie_i} = t_{tie} \cdot \lambda_{tie_i}, \quad (2.49.)$$

čia λ_{tie_i} – įvykusio gedimo dažnis, kuris susijęs su perjungimo sujungimu su kita maitinimo linija;
 λ_{tie_i} – perjungimo sujungimo laikas.

Elektros vartotojų nutraukimo išlaidos apkrovos mazge, elektros tinklo dalyje:

$$CIC_{ij} = \lambda_{ij} IC_{ij} L_j, \quad (2.50.)$$

čia IC_{ij} – kaina esant apkrovai j dėl prastovos trukmės r_i dėl gedimo i sekcijoje;
 L_j – vidutinė apkrova j apkrovos mazge.

$$C_U = \sum_i (1 - \gamma_i) \cdot (C_{r_i} + C_{s_i} + C_{tie_i}) - \sum_i (\beta_i (C_{T_i}(T_{0i}) - C_{T_i}(T_i))), \quad (2.51.)$$

čia γ_i – dydis mokamas už patikimumą mazge i (lygi 0,5);
 β_i – sumažinta patikimumo sąnaudų dalis už atidėjimus, mokantys vartotojai, esantys mazge i (lygi 0,5).

γ_i ir β_i dydžiai vadinami koeficientais, siejančiais vartotojus ir EST įrangą. Socialinės patirtos išlaidos apskaičiuojamos:

$$C_U + \sum_i C_i = C_{ur} + C_{us} + C_{ut} + \sum_i C_{ti}(t_i), \quad (2.52.)$$

čia C_{ur} ; C_{us} ; C_{ut} – patikimumą užtikrinančios išlaidos;
 $C_{ti}(t_i)$ – sujungimo kaina.

Sistemos atkūrimo kaina:

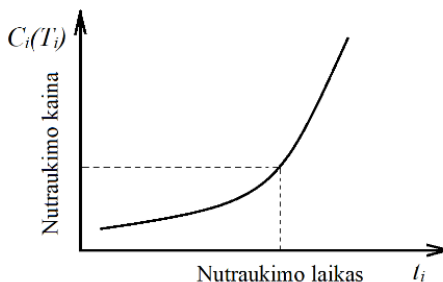
$$C_{U_r} = \sum_i C_{r_i} = \sum_i C_r \cdot \lambda_{r_i}, \quad (2.53.)$$

$$C_{U_s} = \sum_i C_{s_i} = \sum_i C_s \cdot \lambda_{s_i}, \quad (2.54.)$$

$$C_{tie_s} = \sum_i C_{tie_i} = \sum_i C_{tie} \cdot \lambda_{tie_i}. \quad (2.55.)$$

Tikėtina patikimumo kaina:

$$C_i = C_{ti}(t_i) + \alpha_i(C_{ti}(T_{oi})) - C_{ti}(T_i) + \beta_i(C_{ri} + C_{si} + C_{tie_i}). \quad (2.56.)$$



2.29 pav. Nutraukimo laiko ir kainos priklausomybė

$$T_1 = \lambda_1 t_r + \lambda_2 t_s, \quad (2.57.)$$

$$C_1 = \lambda_1 C_r + \lambda_2 C_s, \quad (2.58.)$$

čia λ_i – gedimų dažnis elektros skirstomojo tinklo dalyje i ;

I – komponentų rinkinys, kurio gedimas sukelia tolesnį gedimą tam tikrame tinklo mazge j .

Įvertinus sukurta metodiką ekonominiu aspektu, įvertinamas elektros tiekimo patikimumo pokyčių, įdiegus skirtingus sprendinius, efektyvumas. Pasirinktas optimalus sprendimas leidžia įvertinti pasirinkimų pagrindimus, kurie turi aiškią sąsają su kaštais, susijusiais su elektros tinklo esama būseną, ir tinklo topologijos keitimais, modernizavimais ar elektros įrenginių keitimais.

2.6. Metodinės dalies išvados ir apibendrinimas

1. Išanalizuotas ir įvertintas Lietuvos elektros skirstomojo tinklo patikimumas. Lietuvoje skirstomuosiuose elektros tinkluose kiekvienais metais apkrova didėja (apie 8,5 %), taip pat didėja ir elektros energijos poreikis (apie 6 %). Didžioji Lietuvos EST dalis (98,5 %) yra rajonuose, mažuose miesteliuose ar kaimo vietovėse. Oro linijos sudaro 94 % viso 10 kV OL tinklo. EST įvyksta daugiau kaip 80 % visų gedimų. SAIDI rodiklio vertė nuo 2021 m. pasikeitė nuo 52,12 min. / vartotojui iki 201,95 min. / vartotojui. Statistiniai duomenys aiškiai rodo gedimų skaičiaus didėjimą, o pasikartojančios gedimų priežastys – tinklo sistemos arba komponentų silpnąsias vietas.
2. Siekiant patikimesnio ir saugesnio elektros energijos tiekimo, svarbu, kad: būtų užtikrintas didesnis elektros energijos skirstymo patikimumas; pagerinta elektros energijos tiekimo kokybė ir efektyvumas; atnaujintos nusidėvėjusios ir reikalavimų neatitinkančios elektros tinklo įrenginių konstrukcinės dalys; įdiegtos išmaniosios technologijos, atitinkančios aplinkosaugos reikalavimus ir vartotojų poreikius. Tačiau, nesiimant tinkamų aptarnavimo priemonių (dėl

įrenginių konstrukcinių dalių sudėtingumo), paties įrenginio ir kompleksinis visos sistemos patikimumas gali labai stipriai sumažėti.

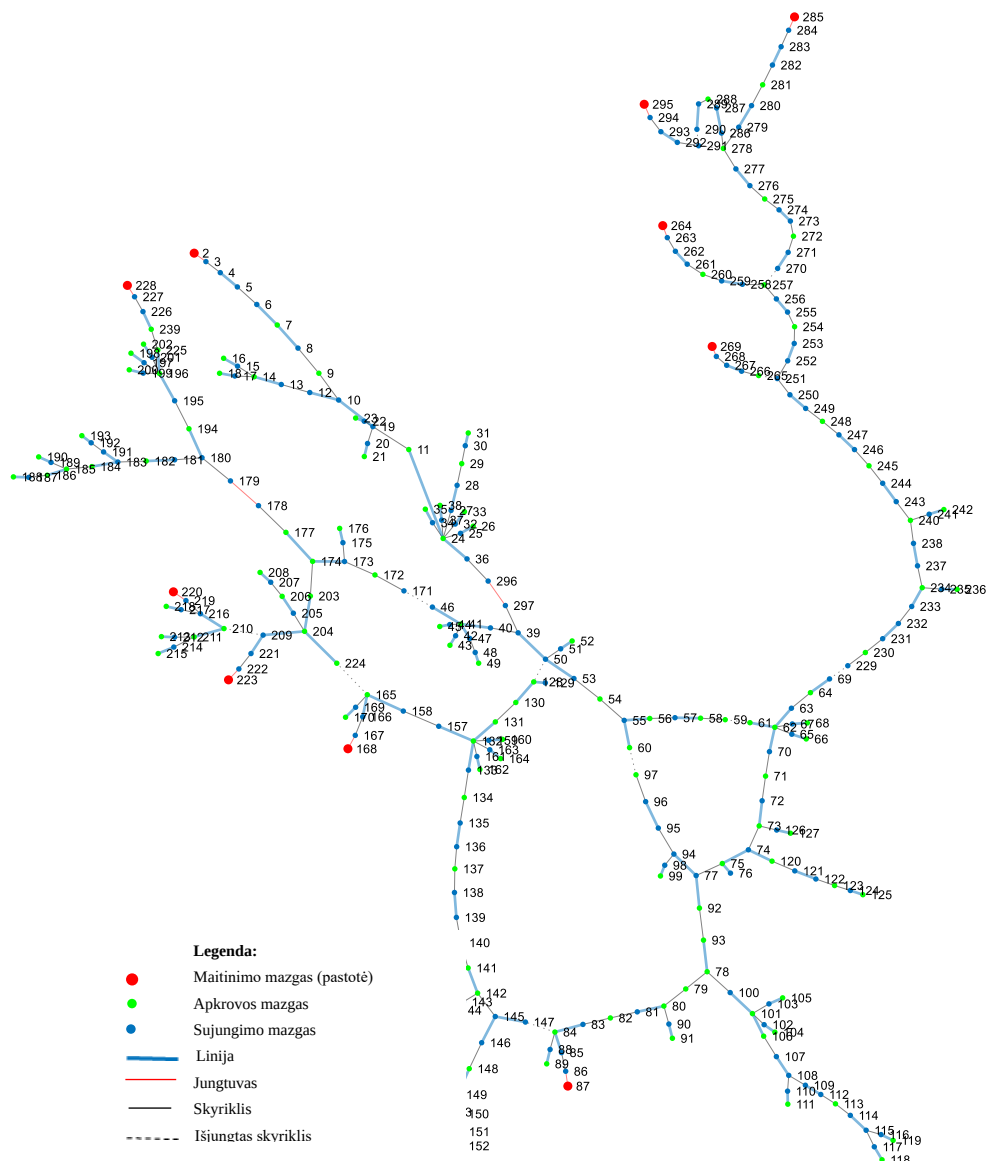
3. Įvertinus tinklo duomenų patikimumą ir tikslumą, sukurtas EST patikimumo skaičiavimo algoritmas. Naudojant Monte Karlo ir maksimalaus srauto metodus, simuliuojamos tinklo būsenos, atsižvelgiant į skirtingas darbo sąlygas ir turimus tinklo duomenimis. Skaičiavimo metodika identifikuoja pažeidžiamiausias tinklo zonas, kurios reikalauja daugiau techninės priežiūros ir investicijų. Metodika gali padėti išvengti elektros energijos pralaidumo trūkumo, sumažinti riziką, susijusią su gedimais. Taip pat sumažinti nepatiktos elektros energijos dydį, nuostolius ir padidinti tinklo efektyvumą, elektros energijos tiekimo patikimumą. Išvados ir rezultatai gali padėti sumažinti elektros tiekimo nutrūkimų tikimybę, pagerinti tinklo veikimą.
4. Tolimesnis EST patikimumo vertinimas ir analizė reikalauja periodiškos peržiūros, kad būtų galima stebėti ir įvertinti pokyčius laikui bėgant. Technologiškai atnaujinti tinklai leidžia greitai lokalizuoti ir izoliuoti gedimus, sumažinti elektros energijos nutrūkimų trukmes, taip sumažinant vartotojų ir valstybės patiriamus nuostolius.
5. Šiandien vienpusiai ESO strateginiai sprendimai dėl EST konfigūracijos, jame įdiegtų papildomų įrenginių, patikimumo įvertinimo, priskiriant vartotoją kaip požymio reikšmę, atkūrimo ir rekonstrukcijų trukmių neįgalina vartotojų poreikių galimybės dalyvauti elektros tiekimo kokybės ir patikimumo, kainos pasirinkime. Taikant žaidimų teorijos metodą, gali būti sudarytos abiem pusėms naudingos taisyklės ir suderintos strategijos, kurios leistų užtikrinti abipusę naudą. Šis bendradarbiavimas padeda pagerinti tinklo patikimumą ir pasiūlą, kartu optimizuojant elektros vartotojų ir STO gerovę. Žaidimų teorijos metodas EST atnaujinimo srityje suteikia galimybę gerinti elektros tiekimo patikimumą, mažinti nuostolius, didinti bendradarbiavimą tarp vartotojų ir STO. Tai leidžia siekti geresnių rezultatų ir ambicingesnių tikslų, užtikrinant abipusę naudą ir geresnį elektros tinklo veikimą.

3. ELEKTROS SKIRSTOMOJO TINKLO PATIKIMUMO TECHNINIŲ SPRENDIMŲ OPTIMIZAVIMAS

Šioje dalyje pateikiama elektros skirstomojo tinklo konfigūracijos, modernizacijos ar elektros įrenginių pakeitimų pokyčio analizė. Vertinimas vykdomas vertinant tinklo patikimumą kaip būseną. Rezultatų analizė ir metodų pritaikymas įgalina vertinti EST patikimumo techninių sprendimų optimizavimą, tinkamiausio sprendimo pasirinkimą, kurį taikant sudaromos geriausios sąlygos atsakingiems už jos skirstymą ir tiekimą, valstybei ir elektros energijos vartotojams.

3.1. Elektros skirstomojo tinklo patikimumo įvertinimas naudojant lyginamąją analizę

Analizei pasirinktas tyrimo objektas – realus 10 kV Lietuvos regiono elektros skirstomasis tinklas (elektros linijų ir pastočių pavadinimai yra nuasmeninti), kurio duomenys pateikti 8 priede. Sudarytas elektros tinklo modelis energijos tiekimo patikimumo rodikliams tirti, kurio elektros linijų suminis ilgis yra 214,2 km, iš jų oro linijos sudaro 172,5 km (80,5 %) ir kabelinės linijos – 41,7 km (19,5 %). Elektros tinklas maitinamas iš 11 transformatorių pastočių (viena pastotė 110/10 kV ir dešimt pastočių 35/10 kV). Elektros tinklas maitina 201 transformatorinių (10/0,4 kV), kurių galios transformatorių suminė įrengtoji galia yra 21 297 kVA. Tinklą sudaro 296 mazgai ir 306 šakos. Tinklo modelyje šakomis modeliuojamos elektros linijos ir komutaciniai aparatai (jungtuvai bei saugikliai), mazgais – apkrovų vietos, linijų atsišakojimai ir modeliuojamų linijų bei komutacinių aparatų sujungimai. Galios transformatoriai nemodeliuojami. Modeliuojamo elektros tinklo grafo medis pavaizduotas 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Analizuojamasis elektros tinklo grafo medis

Remiantis 8 ir 9 prieduose pateikta EST informacija matyti, jog tiriamajame tinkle vyrauja OL AS 50 mm² tipo oro linijos (46 %). Elektros tinkle naudojami skirtingo skerspjūvio laidai, kas gali turėti didelę įtaką tinklo pralaidumo trūkumui, įvykus tinklo gedimams. EST magistralinės linijos yra ilgos (>3 km), todėl tokiose linijose vyrauja didesni elektros energijos nuostoliai, mažėja pralaidumo galimybės. Dėl leistinų įtampos nuostolių arba leistinų išilimo srovių yra didesnė tikimybė avarinėms situacijoms atsirasti.

Analizuojamo tinklo pažymėti plotai (žr. 3.2 pav.) vaizduoja elektros tinklo normalaus režimo sujungimus. Raidėmis pažymėtos vartotojų grupės, suskirstytos pagal modeliavimo rezultatus. Vartotojų mazgai suskirstyti į 9 grupes, nuo A–I, pagal apskaičiuotą atjungimo dažnį. Identifikuotos grupės apima vartotojų mazgus, kurie pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Analizuojamo tinklo vartotojų grupės ir vartotojų mazgai

Nr.	Vartotojų grupės	Vartotojų mazgai
1.	A	128, 130, 156, 155, 164, 144, 160, 141, 142, 162, 131, 132, 148, 150, 149, 165, 140, 137, 134, 170
2.	B	61, 62, 120, 75, 123, 125, 64, 127, 66, 68, 73, 118, 119, 71, 104, 113, 111, 106, 101, 105, 97, 99, 93, 78, 92, 84, 91, 80, 79, 89, 82
3.	C	45, 41, 43, 49, 56, 59, 60, 58, 52, 54
4.	D	194, 182, 184, 190, 186, 185, 188, 193, 225, 196, 202, 200, 239, 198
5.	E	208, 206, 172, 224, 204, 203, 176, 174, 177
6.	F	9, 33, 26, 11, 24, 29, 35, 38, 29, 31, 21, 7, 23, 14, 16, 18
7.	G	211, 210, 218, 213, 215
8.	H	230, 234, 236, 242, 240, 245, 248, 254, 260, 257
9.	I	272, 275, 278, 281, 288, 265

3.2 lentelė. Vartotojų grupių elektros tiekimo patikimumo rodikliai

Vartotojų grupė	f , 1/m	T_a , val.	$W_{nepatiekta}$, %	$W_{nepatiekta}$, kWh	$W_{nepatiekta}$, vartotojų grupei, kWh
A	8,35–8,29	3,21–1,039	0,379–0,027	3070–250	22992
B	7,70–7,66	2,69–1,019	1,328–0,047	6109–225	38153
C	7,00–6,93	3,43–1,045	1,234–0,044	3707–168	12929
D	6,25–6,23	4,58–1,204	0,726–0,009	8192–297	24018
E	4,23–4,21	5,83–1,066	1,442–0,009	2561–125,8	8173
F	3,18–3,17	4,36–1,051	7,728–0,025	3317–374	22284
G	1,38–1,37	8,43–1,056	0,145–0,001	1935–324	3991
H	0,92–0,92	5,62–1,000	0,111–0,001	1600–103,3	3779
I	0,15–0,09	1,030–1,000	0,004–0,001	67–17	219

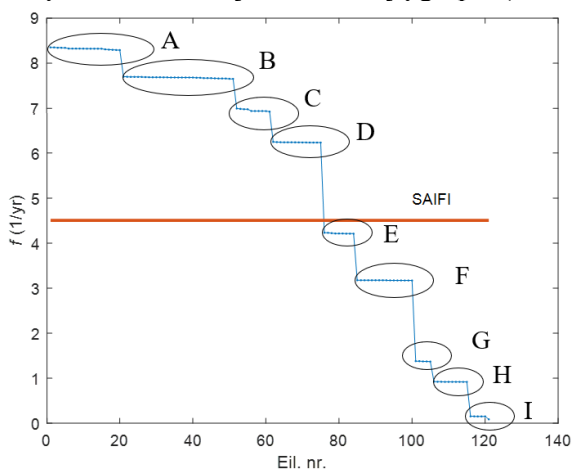
čia f – atjungimų dažnis, 1/m.;

T_a – vidutinė atjungimo trukmė, val.;

ΔW – nepateiktos energijos mazgui sumažėjimas, kWh.

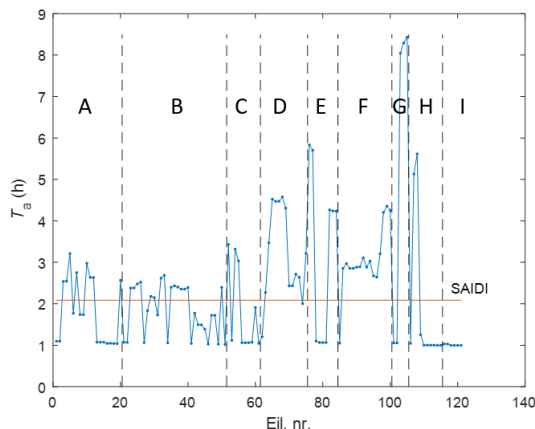
Vartotojų mazgų (transformatorinių) tikėtinas atjungimo dažnis **A** grupės vartotojams yra didžiausias ir gali siekti iki 8,35 karto per metus. Tokį mažą patikimumą lemia ilga elektros linija, siekianti 43,7 km. Apskaičiuotas viso nagrinėjamo tinklo SAIFI rodiklis (4,51 kartai / vartotojui) yra didesnis nei realaus tinklo operatoriaus deklaruojamas (0,62 karto / vartotojui) – neatitikimas gaunamas dėl to, kad šiame modelyje nevertinamas 0,4 kV tinklas ir jame vykdomi greiti (0,1 val.; 0,01 val.) ARĮ perjungimai, padidinantys elektros tiekimo patikimumą galutiniams vartotojams.

Vertinant tinklo vartotojų grupes, remiantis 3.2 lentelėje pateiktais duomenimis, mažiausią galios nepateikimą turi **H** ir **I** vartotojų grupės. SAIDI rodiklio vertinimas taip pat parodo, kad šių vartotojų grupės patiria pakankamai mažą elektros energijos netiekimo laiką, tenkantį vienam vartotojui ar vartotojų grupei (žr. 3.3 pav.).



3.3 pav. Tikėtinas vartotojų atjungimo dažnis, kartais per metus

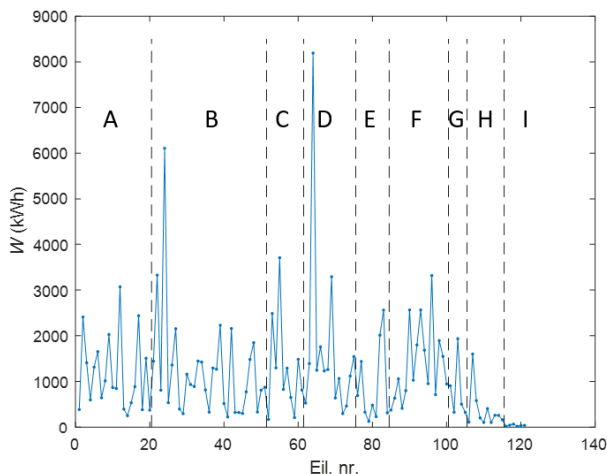
Tikėtinas atjungimo laikas kiekvienam tinklo vartotojui ir vartotojų grupėms pateiktas 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Tikėtinas atjungimo laikas kiekvienam vartotojui, val.

Pateikti rezultatai (žr. 3.4 pav.) parodo labiausiai veikiamas tinklo zonas, pažeidžiamiausias vietas, kuriose labiausiai paveikiami elektros tinklo vartotojai, nutrūkus elektros energijos tiekimui. Vertinant pagal nutraukimo trukmę, didžiausią nutraukimo laiko vertę patirtų **G** grupės vartotojai (8,43 val.), viršijant nustatytą grandinės nutraukimo rodiklių vertę.

Vertinant nepateiktos energijos kiekvienam vartotojui kWh per metus, taip pat įvertinus atjungimo trukmes, didžiausią energijos trūkumą patirs **D** zonos vartotojai (žr. 3.5 pav.). Tikėtina, kad šioje zonoje yra problemų su elektros energijos tiekimo patikimumu dėl elektros energijos nepateikimo.



4.5 pav. Tikėtina nepateikta energija kiekvienam vartotojui, kWh per metus

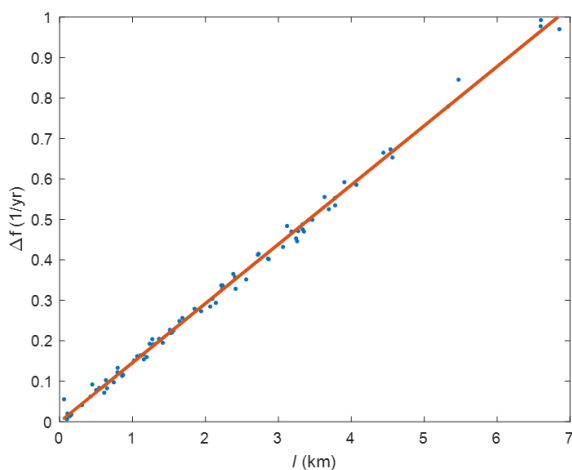
Tikėtina nepatiekta energija kiekvienam vartotojui ir tikėtinas atjungimo laikas yra vieni iš rodiklių, kuriuos pritaikius skaičiavimuose galima vertinti kaip elektros energijos tiekimo sistemos ir tinklo patikimumą. Rodikliai parodo, kaip dažnai ir kiek ilgai vartotojai patiria elektros energijos tiekimo sutrikimus. Tiek atjungimo laikas, tiek nepatiekta elektros energijos kiekis ir šių dydžių didelės reikšmės gali reikšti, kad elektros energijos tiekimo ir paties tinklo patikimumas yra blogas, o vartotojai patiria daugybę elektros energijos tiekimo sutrikimų. Todėl, siekiant nustatyti elektros energijos tiekimo patikimumą tam tikrose zonose, analizuojant elektros energijos tiekimo sutrikimų priežastis, labai svarbu vertinti analizuojamus tinklo patikimumo rodiklius.

3.2. Elektros energijos tiekimo patikimumo užtikrinimo analizė taikant skirtingus scenarijus

Pritaikant maksimalaus srauto metodą, sugeneruojamos tinklo būsenos, apskaičiuojamos optimalios srautų trajektorijos. Skaičiavimams ir vertinimui pasirinkti tokie trys scenarijai:

- **A scenarijus.** Oro linijų atkarpos pakeičiamos kabelinėmis linijomis;
- **B scenarijus.** Įprasti, rankiniu būdu valdomi skyrikliai pakeičiami pasižymintiais greitesniais atjungimais arba / ir perjungimais, nuotoliniu būdu valdomais skyrikliais, siekiant sumažinti komutacijų trukmę;
- **C scenarijus.** Įrengiami išmanieji linijų jungtuvai, leidžiantys greitai izoliuoti pažeistą linijos segmentą.

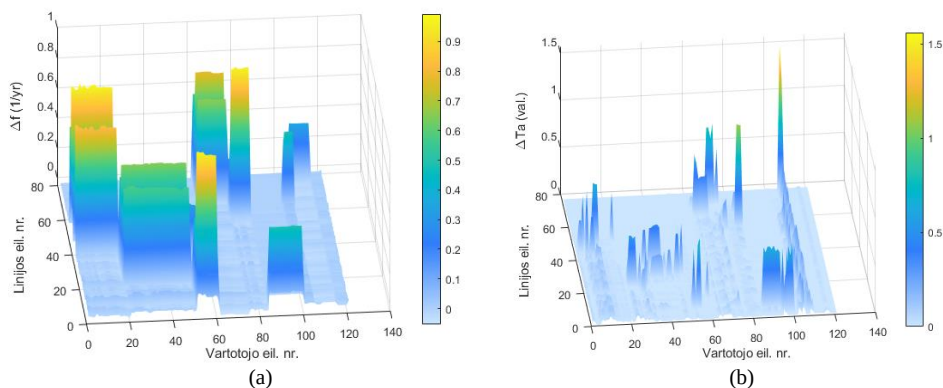
A scenarijus. Oro linijų atkarpas pakeičiant kabelinėmis linijomis, vartotojų atjungimų dažnio pokytis mažėja proporcingai kabeliuojamų linijų ilgiui (žr. 3.6 pav.). Analizuojamajame tinkle tarp modeliujamų mazgų buvo keičiamos linijų atkarpos. Ilgiausia modeliujama atskira linijos atkarpa buvo 6,85 km (OL AS 50 mm² linijos tipas, jungianti 40 ir 41 mazgus). A scenarijaus pokyčių rezultatai pateikti 3.6–3.8 paveiksluose.



3.6 pav. Vartotojų atjungimo dažnio sumažėjimas, priklausomai nuo kabeliuojamos linijos ilgio

3.6 pav. pateikto grafiko apskaičiuoti taškai ir jų aproksimacijos tiesė:
 $y = 0,1464x - 0,0004706$, $R = 0,996$.

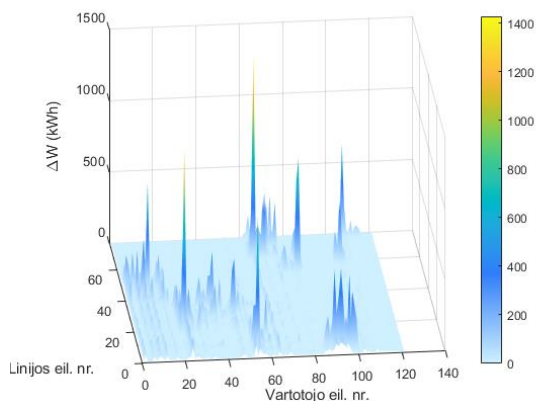
Vartotojų atjungimo dažnio sumažėjimas gali būti viena iš efektyvių priemonių parenkant oro linijas kabeliuoti, jeigu tinklas buvo nusidėvėjęs, nuolat jį veikė oro ir kitos sąlygos. Kabeliuojamos linijos tampa atsparesnės atmosferos veiksniams, kurie tinkle sukelia gedimus ir nutrukimus, kartu sumažinamas vartotojų atjungimo dažnis. Todėl kabeliavimas – vienas iš sprendimų, siekiant pagerinti elektros linijų, zonų patikimumą ir efektyvumą. Kabelinės linijos gali perduoti didesnę elektros energijos kiekį per trumpesnę laiką, o tai pagerintų elektros linijų našumą ir sumažintų energijos nuostolius. 3.7 pav. pavaizduotas tinklo vartotojų atjungimo dažnio pokytis, vartotojų atjungimų trukmės, kai grandinės oro linijos yra pakeičiamos kabelinėmis.



3.7 pav. Vartotojų atjungimo dažnio pokytis (a) ir vartotojų atjungimo trukmės pokytis (b), pakeitus oro linijas kabelinėmis

3.7 pav. vartotojų atjungimo dažnio teigiamą pokytį (a) parodo mažesnis atjungimų dažnis. Atjungimų dažnis labiausiai sumažėtų A, C, D ir E grupių

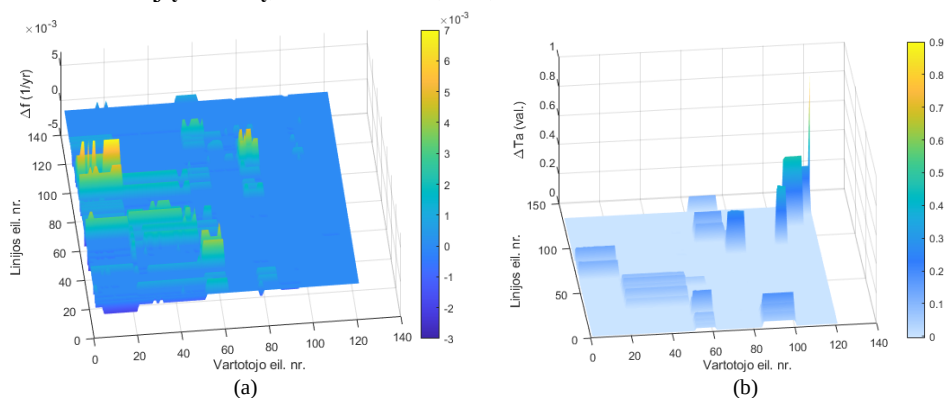
vartotojams, kurie maitinami ilgomis oro linijomis. Tikėtina atjungimo trukmė (žr. 3.7 pav., b) labiausiai sumažėtų **E** ir **G** grupių vartotojams – atitinkamai 1,1 ir 1,5 val. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, pakeitus OL kabelinėmis, pavaizduotas 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, pakeitus oro linijas kabelinėmis

Dėl nepateiktos energijos kiekio pažeidžiamiausios buvo **B** ir **D** vartotojų grupės (ilgiausia linija 4,5 km) (žr. 3.8 pav.). Vieną oro linijos atkarpą pakeitus kabeline, nepateiktos energijos kiekis sumažėtų iki 5 660 kWh per metus.

B scenarijus. Modeliavimo rezultatai rodo, kad linijos skyriklių pakeitimas nuotoliniu būdu valdomais skyrikliais vartotojų atjungimų dažniui įtakos praktiškai neturi (žr. 3.9 pav., a). Priklausomai nuo linijos tipo ir ilgio, gali sumažinti atjungimų dėl komutacijų trukmę, atitinkamai 0,1–0,9 val.

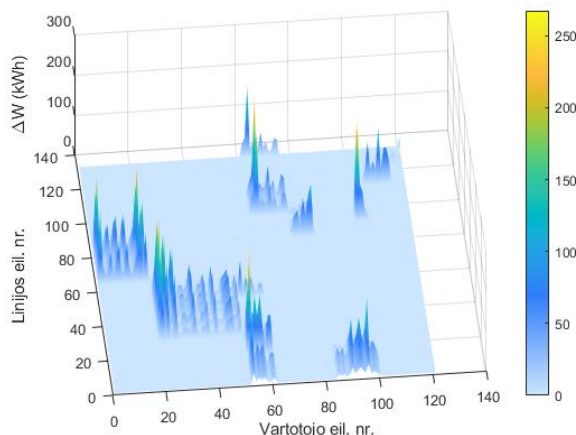


3.9 pav. Vartotojų atjungimo dažnio pokytis (a) ir atjungimo trukmės pokytis (b), įrengus nuotoliniu būdu valdomus linijų skyriklius

Vartotojų atjungimo dažnio pokyčio teigiamas dydis rodo mažesnę atjungimų dažnį (žr. 3.9 pav., a), labiausiai **A** ir **F** vartotojų grupei. Tai parodo, kad elektros

tinklas yra stabilesnis ir dalinai patikimesnis, elektros tinklo vartotojai turi mažiau trikdžių, susijusių su elektros energijos nutrūkimais.

Vartotojų atjungimo trukmės pokytį (žr. 3.9 pav., *b*) išreiškia teigiamas dydis, kuris rodo mažesnę atjungimų trukmę. Didžiausias teigiamas poveikis būtų **E**, **G** ir **H** ir **I** grupių vartotojams. Šių grupių vartotojams tikėtina atjungimo trukmė sumažėtų 0,3–0,5 val. Nepateiktos energijos kiekis, įrengus vieną nuotoliniu būdu valdomą skyriklį, sumažėtų iki 2370 kWh per metus. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, įrengus nuotoliniu būdu valdomus linijų skyriklius, pavaizduotas 3.10 paveiksle.

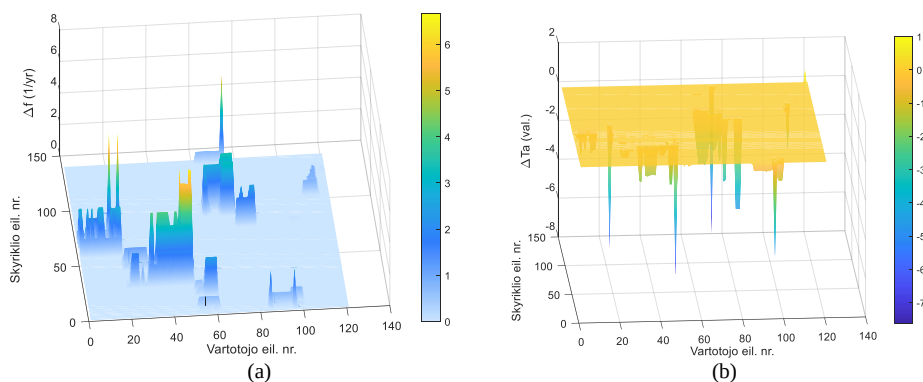


3.10 pav. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, įrengus nuotoliniu būdu valdomus linijų skyriklius

Sumažėjęs nepateiktos energijos kiekis priklauso nuo sutrumpėjusio vartotojų atjungimo laiko. Dalis vartotojų yra perjungiami ir elektros energijos tiekimas yra vykdomas iš kito šaltinio.

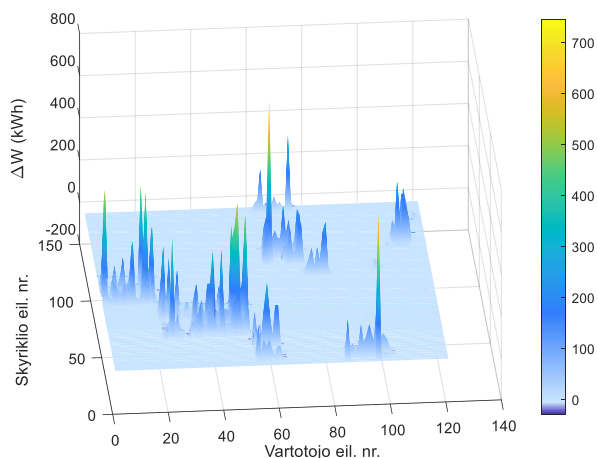
3.10 pav. vaizduojamas vartotojams nepateiktos energijos pokytis, teigiamas dydis rodo mažesnę nepateiktos energijos kiekį. Pokytis labiausiai pasireiškė **A** grupės vartotojams, kurie yra linijos pradžioje ir pabaigoje. **G** vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis pasireiškia dėl prastovos, bet ne dėl gedimų ($T_a = 2,69-1,019$).

C scenarijus. Šiame scenarijuje įrengiami išmanieji linijų jungtuvai. Šios technologijos naudojamos tinkluose, kad būtų galima greitai izoliuoti pažeistą linijos segmentą ir užtikrinti elektros tiekimo tęstinumą. Jungtuvais greitai aptinkamas pažeidimas linijose ir automatiškai atjungiamas pažeistas segmentas nuo pagrindinio elektros tinklo, kartu sumažinant elektros tiekimo sutrikimus, pažeidimų mastą. Vartotojų atjungimo dažnio pokytis ir vartotojų atjungimo trukmės pokytis, įrengus OL jungtuvus, pavaizduoti 3.11 paveiksle.



3.11 pav. Vartotojų atjungimo dažnio pokytis (a) ir vartotojų atjungimo trukmės pokytis (b), įrengus oro linijų jungtuvus

Modeliavimo rezultatai rodo, kad, nagrinėjamame tinkle įrengiant išmaniuosius linijų jungtuvus, galima sumažinti vartotojų, prijungtų linijos pradžioje, tikėtiną atjungimų skaičių (žr. 3.11 pav., a), tačiau tokių vartotojų vidutinė atjungimo trukmė gali ir padidėti (žr. 3.11 pav., b). Tai nereiškia, kad vartotojai bus atjungti ilgiau. Skaičiuojant vidutinę atjungimų trukmę, nevertinami trumpi (apie 1 val.) vartotojų atjungimai, turintys įtakos vidurkio skaičiavimui. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis pavaizduotas 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Vartotojams nepateiktos energijos kiekio pokytis, įrengus oro linijų jungtuvus

Rezultatai rodo, kad išmaniųjų įrenginių įdiegimas turės įtakos ne visiems elektros vartotojams. Didžiausią pokytį nepateiktos energijos kiekiui turės **A, B, C, D** ir **E** grupių vartotojams. Vienos linijos jungtuvo įrengimas nagrinėjamame tinkle leis sumažinti nepateiktos energijos kiekį iki 4220 kWh per metus.

3.3. Elektros skirstomojo tinklo tiekimo patikimumo didinimo scenarijai

Techninių sprendimų priėmimas ir tinklo konfigūracijos keitimas gali užtikrinti tinklo lankstumą, elektros energijos optimizavimą, palengvinti tinklo plėtrą, įgalina valdyti paskirstytą elektros energijos gamybą, kontroliuoti tiekiamos elektros energijos kokybę ir tiekti duomenis apie elektros energijos suvartojimą ir tinklo būklę (Sultan, Alam, Zaid, 2019; Wojciechowski, ir kt., 2020). Siekiant nustatyti tinkamiausias priemones elektros tiekimo patikimumui padidinti, atrinkti charakteringi vartotojų mazgai, kurių patikimumas yra mažesnis, palyginti su kitais vartotojais, duomenys pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Charakteringi vartotojų grupių mazgai

Vartotojų grupės	Vartotojų mazgai
A	128 mazgas – didžiausias atjungimų dažnis (8,35 karto per metus)
	164 mazgas – didžiausia vidutinė atjungimų trukmė A vartotojų grupėje (3,2 val.)
	132 mazgas – didžiausia nepatiekta energija A vartotojų grupėje (3070 kWh / metus)
B	61 mazgas – didžiausias atjungimų dažnis B vartotojų grupėje (7,70 karto per metus)
	75 mazgas – didžiausia nepatiekta energija B vartotojų grupėje (6108 kWh / metus)
D	184 mazgas – didžiausia nepatiekta energija D vartotojų grupėje (8191 kWh / metus)
E	208 mazgas – didžiausia vidutinė atjungimų trukmė E vartotojų grupėje (5,8 val.)
G	215 mazgas – didžiausia vidutinė atjungimų trukmė G vartotojų grupėje (8,4 val.)

Siekiant padidinti 3.3 lentelėje pateiktų mazgų elektros tiekimo patikimumą, išnagrinėtos įvairių techninių priemonių ir jų kombinacijų įtaka patikimumo rodikliams. Analizuojama žemiau išvardintų elektros tinklo elementų pakeitimo įtaka mazgų patikimumui:

- skyriklių su televaldymu įrengimas linijai 132–157;
- ilgiausios oro linijos atkarpos 132–157 (6,6 km) pakeitimas kabeline;
- linijos jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje;
- b ir c variantai;
- trijų ilgiausių oro linijos atkarpų 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje.

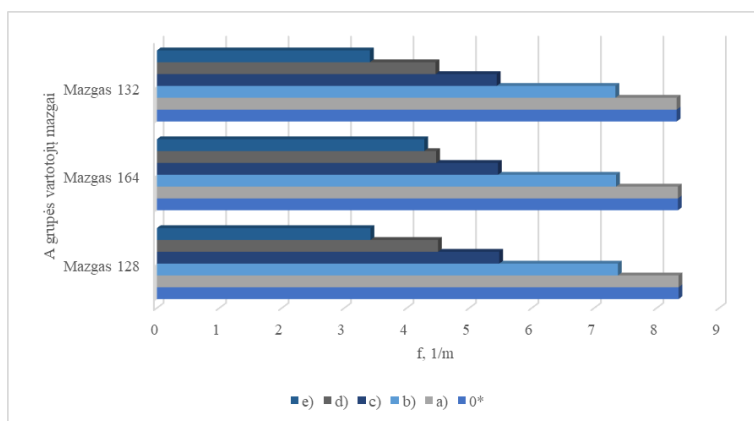
A vartotojų grupės mazgai: 128, 164 ir 132 prijungti prie 43,7 km ilgio linijos, sudarytos iš 41,4 km oro ir 2,3 km kabelinės linijos. Mazgas 128 yra nutolęs per 20,7 km nuo pagrindinės pastotės. Šalia 128 mazgo įrengtas normaliu režimu išjungtas skyriklis, leidžiantis perjungti maitinimą iš kito elektros energijos šaltinio per kitą elektros liniją. Patikimumo rodiklių pokyčiai pateikti 3.4 lentelėje. Pateikti duomenys yra lyginami su pradiniais tinklo konfigūracijos duomenimis.

3.4 lentelė. A grupės vartotojų mazgų: 128, 164 ir 132 patikimumo rodikliai

Var. nr.	Mazgas 128			Mazgas 164			Mazgas 132			Tinklo
	f , 1/m	T_{av} val.	ΔW , kWh	f , 1/m	T_{av} val.	ΔW , kWh	f , 1/m	T_{av} val.	ΔW , kWh	
0*	8,35	1,10	—	8,34	3,21	—	8,32	2,64	—	—
a)	8,35	0,96	48	8,34	3,07	56	8,32	2,50	160	2010
b)	7,38	1,08	52	7,35	2,67	350	7,34	1,98	1035	3420
c)	5,48	1,15	120	5,46	4,39	140	5,44	3,51	400	2415
d)	4,50	1,13	172	4,47	3,75	490	4,46	2,62	1435	5880
e)	3,42	1,14	220	4,28	3,42	600	3,41	2,83	1720	8110

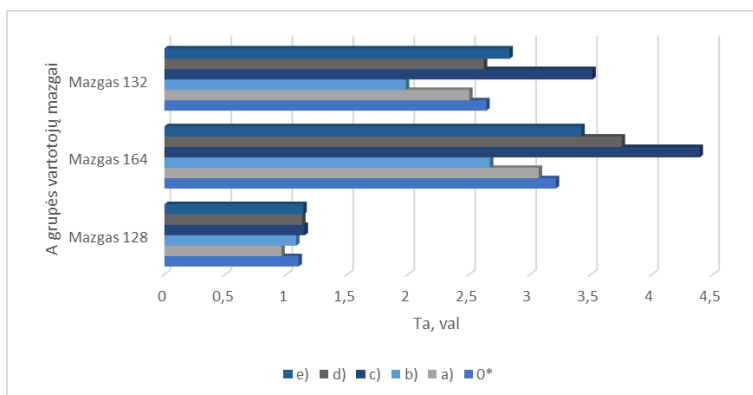
Pastaba: * – pradinė elektros tinklo konfigūracija.

Nagrinėta techninių priemonių ir jų kombinacijų įtaka norint padidinti A grupės vartotojų mazgų patikimumo lygį ir gauti rezultatai pateikti 3.13, 3.14 ir 3.15 pav. grafikuose. 3.13 pav. pateikiami 128, 132 ir 164 mazgų pakeitimų scenarijų rezultatai, turintys įtakos gedimų dažniui.



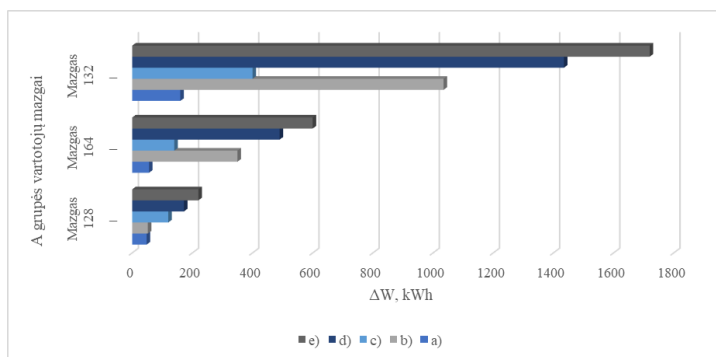
3.13 pav. A grupės vartotojų 128, 132, 164 mazgų elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui

A grupės vartotojų mazgų: 128, 132, 164, gedimų dažnio pokyčiui didžiausią įtaką turėtų trijų ilgiausių oro linijos atkarpų: 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje. Elementų pakeitimo pokytis 128 mazgo patikimumas padidėtų 59,05 %, 132 mazgo – 48,7 %, 164 mazgo – 59,02 %. Mazgų elementų pakeitimo įtakos atkūrimo laikui rezultatai pavaizduoti 3.14 paveiksle.



3.14 pav. A grupės vartotojų 128, 132, 164 mazgų elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui

3.14 pav. grafiko duomenys rodo, jog 128 mazgo atkūrimo laiko sumažėjimui labiausiai įtakos turės 132–157 linijai skyriklių su televaldymu įrengimas. 132 ir 164 mazgų atkūrimo laiko sumažėjimui turės ilgiausios oro linijos atkarpos 132–157 (6,6 km) pakeitimas kabeline. 128 mazgo patikimumo pokytis padidėtų 87,2 %, 132 mazgo – 25 %, 164 mazgo – 16,9 %. A grupės vartotojų mazgų: 128, 132, 164 elementų pakeitimo įtaka nepatiktos galios pasiskirstymui pavaizduota 3.15 paveiksle.



3.15 pav. A grupės vartotojų 128, 132, 164 mazgų elementų pakeitimo įtaka nepatiktai galiai

A grupės vartotojų mazgams: 128, 132, 164 nepatiktos energijos kiekio sumažėjimui turi įtakos linijos 132–157 skyriklių su televaldymu įrengimas. Visi kiti galimi sprendimai, tokie kaip: trijų ilgiausių oro linijos atkarpų 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje; ilgiausios oro linijos atkarpos 132–157 (6,6 km) pakeitimas kabeline; linijos jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje, nėra tinkami dėl padidėjusio tikėtino energijos kiekio nepatiktos elektros energijos vartotojams. Analizė rodo, kad elektros tiekimo patikimumas šiems mazgams labiausiai padidinamas, kai kartu taikomas linijos jungtuvo įrengimas ir oro linijų kabeliavimas.

B vartotojų grupės mazgai: 61 ir 75 prijungti prie 48,4 km ilgio linijos (12,7 km – kabelinės ir 35,7 km oro linijos). Mazgas 61 nuo pagrindinės pastotės nutolęs per 21,8 km, 75 mazgas – per 12,0 km. Linijoje yra dvi atšakos – 10,9 km ir 2,2 km, kuriose vyrauja kabelinės linijos. Apskaičiuojami šių mazgų patikimumo rodikliai, padarius tokius tinklo elementų pakeitimus:

- linijos 83–84 skyrikliai ir skyriklis 69–229 pakeičiami skyrikliais su televaldymo funkcija, siekiant pagreitinoti perjungimus;
- ilgiausios oro linijų atkarpos 84–85, 100–101 ir 74–75 (suminis ilgis 12,3 km) pakeičiamos kabelinėmis;
- skyriklis 78–100 pakeičiamas jungtuvu;
- kartu taikomi *b* ir *c* variantai, papildant antro jungtuvo įrengimu skyriklio 75–77 vietoje;
- trijų ilgiausių oro linijos atkarpų: 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje.

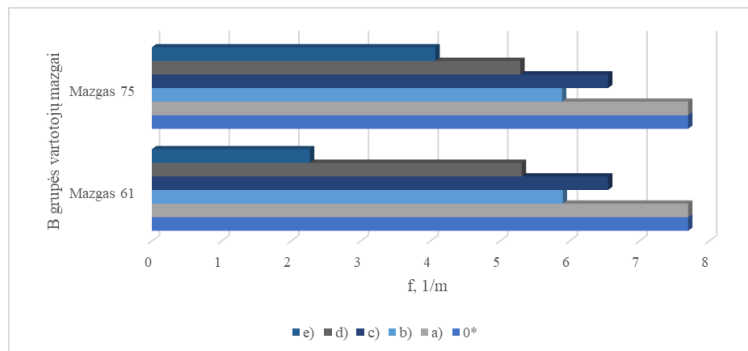
Atliekant tinklo elementų pakeitimus, patikimumo rodiklių pokyčių rezultatai pateikti 3.5 lentelėje. Pateikti duomenys yra lyginami su pradiniais tinklo konfigūracijos duomenimis.

3.5 lentelė. B grupės vartotojų mazgų 61 ir 75 patikimumo rodikliai

Var. nr	Mazgas 61			Mazgas 75			Tinklo
	f , 1/m.	T_{av} , val.	ΔW , kWh	f , 1/m.	T_{av} , val.	ΔW , kWh	ΔW , kWh
0*	7,70	1,07	–	7,70	2,38	–	–
a)	7,70	0,97	140	7,70	2,28	265	2370
b)	5,90	1,05	360	5,89	2,00	2180	9210
c)	6,55	1,08	200	6,55	2,62	380	2795
d)	5,31	1,05	470	5,29	2,11	2380	9210
e)	2,27	1,01	1045	4,07	1,03	4715	20850

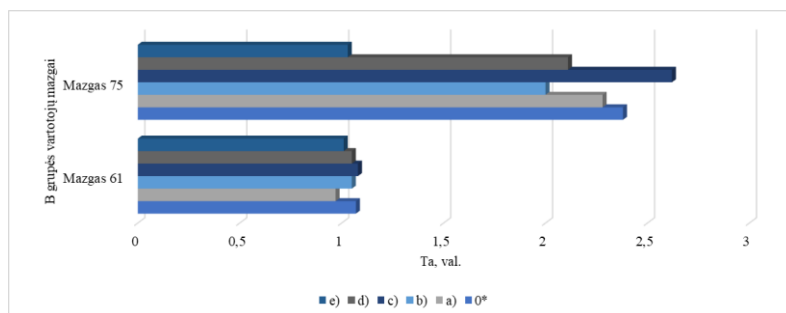
Pastaba: * – pradinė elektros tinklo konfigūracija.

Įvertinti **B** grupės vartotojų mazgų patikimumo rodiklių pokyčiai pateikti 3.16, 3.17 ir 3.18 paveiksluose. 3.16 pav. pateikta B grupės vartotojų 75 ir 61 mazgų elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui.



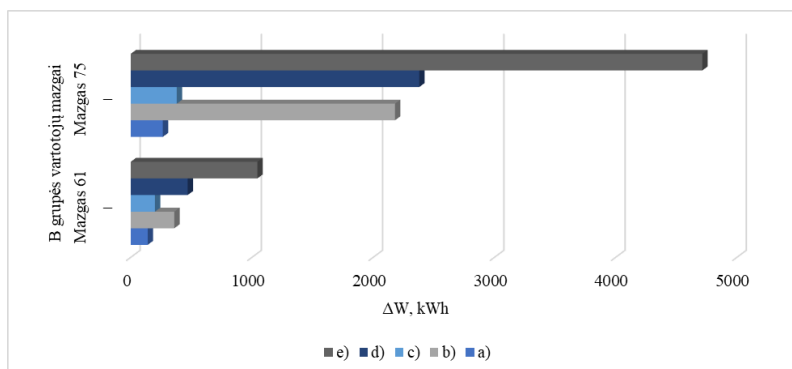
3.16 pav. B grupės vartotojų 75 ir 61 mazgų elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui

B grupės vartotojų mazgams 61 ir 75 didžiausią įtaką turėtų trijų ilgiausių oro linijos atkarpų 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje. Patikimumo rodikliai pagerėtų 70,52 % 61 mazge ir 47,2 % 75 mazge. B grupės vartotojų 61 ir 75 mazgų patikimumo rodiklių pokyčiai, kai atliekami elementų pakeitimai, pavaizduoti 3.17 paveiksle.



3.17 pav. B grupės vartotojų 61 ir 75 mazgų elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui

Atkūrimo laikui B grupės vartotojų mazgams įtakos turi skirtingi technologiniai sprendimai: 61 mazgo atkūrimo laiko sumažėjimui didžiausią įtaką turės linijos 83–84 skyrikliai ir skyriklis 69–229, kurie pakeičiami skyrikliais su televaldymo funkcija, siekiant pagreitinoti perjungimus, 75 mazgui – trijų ilgiausių oro linijos atkarpų: 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje. 61 mazgo atkūrimo laiko pagerėjimo pokytis – 9,3 %, 75 mazgo – 56,7 %. B grupės vartotojų 61 ir 75 mazgų elementų pakeitimo įtaka nepatiktos galios rodikliams pavaizduota 3.18 paveiksle.



3.18 pav. B grupės vartotojų 61 ir 75 mazgų elementų pakeitimo įtaka nepatiktai galiai

Nepatiktos galios pokyčiui 61 ir 75 mazguose patikimumo rodikliams pagerėti turės įtakos trijų ilgiausių oro linijos atkarpų: 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje.

Apibendrinus reikia pastebėti, jog kadangi nagrinėjami variantai elektros tiekimo patikimumą pagerina nedaug (3.5 lentelė), siūloma linijos pertraukimą 69–229 daryti kitoje vietoje, pvz., 70–71, o esamo skyriklio 69–229 vietoje įrengti jungtuvą, kuris nesumažintų esamos linijos (maitinamos iš 264 mazgo) patikimumo. Nustatyta, kad pastarasis tinklo konfigūracijos pakeitimas labiausiai pagerintų 61 ir 75 mazgų elektros tiekimo patikimumą (variantas e), t. y. trijų ilgiausių oro linijos atkarpų: 132–157, 128–130 ir 131–132 (suminis ilgis 13,4 km) pakeitimas kabelinėmis ir jungtuvo įrengimas skyriklio 134–135 vietoje.

D ir E grupių mazgai: 184 ir 208 prijungti prie 52,8 km ilgio linijos (4,8 km – kabelinės ir 48,0 km oro linijos). Linija normaliu režimu maitinama iš dviejų 223 ir 228 pastočių, joje įrengtas linijos jungtuvas 178–179. Nagrinėjami tokie tinklo elementų pakeitimai:

- a) oro linijos atkarpa 195–196 (5,3 km) keičiama kabeline;
- b) oro linijos atkarpos 195–196, 181–182, 185–186 ir 180–194 (suminis ilgis 14,5 km) keičiamos kabelinėmis;
- c) oro linijos atkarpos 173–174–177 (suminis ilgis 8,4 km) keičiamos kabelinėmis;
- d) b ir c variantai.

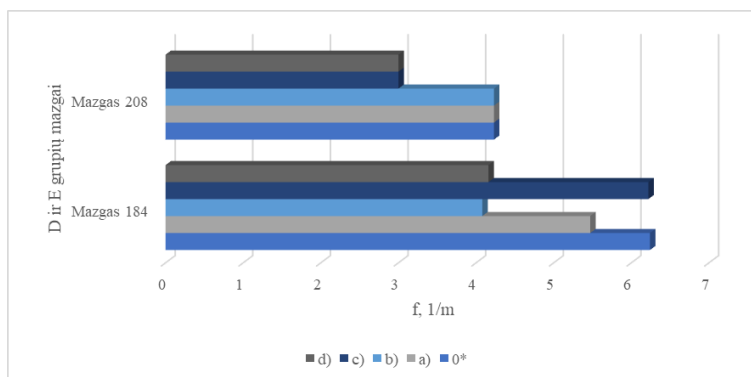
Patikimumo rodiklių rezultatai pateikti 3.6 lentelėje. Pateikti duomenys yra lyginami su pradiniais tinklo konfigūracijos duomenimis.

3.6 lentelė. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų patikimumo rodikliai

Var. nr.	Mazgas 184			Mazgas 208			Tinklo
	$f, 1/m.$	T_{av}, val	$\Delta W, kWh$	$f, 1/m.$	T_{av}, val	$\Delta W, kWh$	$\Delta W, kWh$
0*	6,24	3,47	–	4,23	5,83	–	–
a)	5,47	3,82	300	4,23	5,83	0	2090
b)	4,08	3,49	2810	4,23	5,83	0	8560
c)	6,22	3,52	-80	3,00	7,93	25	2740
d)	4,16	3,56	2600	3,00	7,94	25	11340

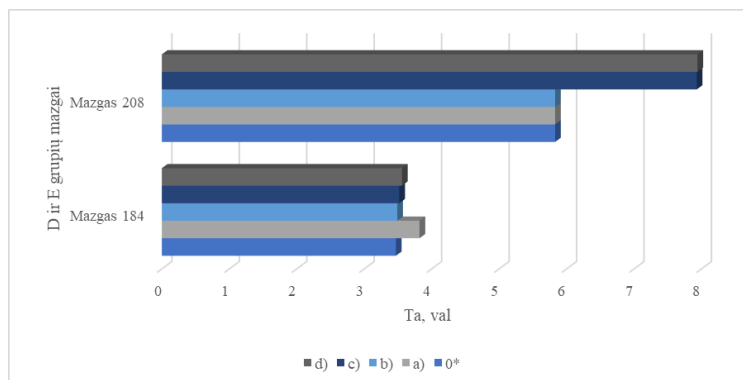
Pastaba: * – pradinė elektros tinklo konfigūracija.

D ir E grupių vartotojų mazgų 184 ir 208 patikimumo rodiklių pokyčių rezultatai, turintys įtakos gedimų dažniui (žr. 3.19 pav.), atkūrimo laikui (žr. 3.20 pav.), nepatiktos galios sumažėjimui (žr. 3.21 pav.).



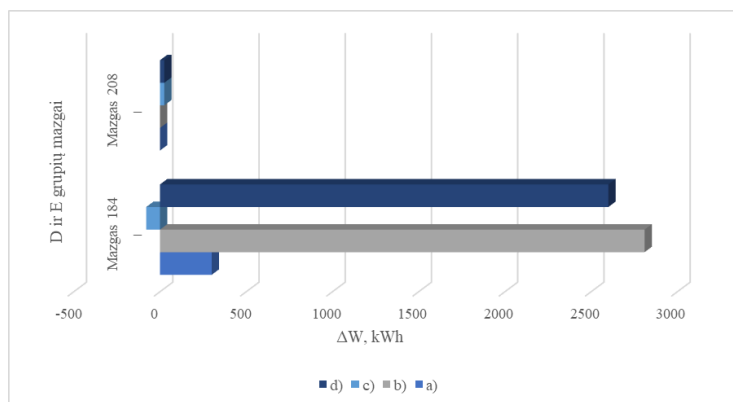
3.19 pav. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui

184 mazgo patikimumo rodikliams turėtų didžiausią įtaką oro linijos atkarpos: 195–196, 181–182, 185–186 ir 180–194 (suminis ilgis 14,5 km) keičiamos kabelinėmis. 208 mazgo gedimų dažnio sumažėjimui turėtų įtakos oro linijos atkarpos: 173–174–177 (suminis ilgis 8,4 km) keičiamos kabelinėmis. 184 mazgo patikimumo rodiklis pagerėtų 34,6 %, 208 mazgo gedimų dažnis sumažėtų 29,07 %. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui vaizduojama 3.20 paveiksle.



3.20 pav. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui

Atkūrimo laikui pagerinti 184 mazgui įtakos turėtų oro linijos atkarpos: 195–196, 181–182, 185–186 ir 180–194 (suminis ilgis 14,5 km), kurios keičiamos kabelinėmis. Tačiau šio mazgo atkūrimo laiko rodiklį pagerintų oro linijos atkarpos: 195–196 (5,3 km) keitimas kabeline. 208 mazgo pokyčiams, kad sumažėtų atkūrimo laiko dedamoji, nėra nė vieno pateikto varianto. Šiam mazgui tik pablogintą situaciją, jeigu oro linijos atkarpos 173–174–177 (suminis ilgis 8,4 km) būtų keičiamos kabelinėmis. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų pakeitimų scenarijų įtaka nepateiktai galiai pavaizduota 3.21 paveiksle.



3.21 pav. D ir E grupių vartotojų 184 ir 208 mazgų elementų pakeitimo įtaka nepatiekamai galiai

184 mazgo pralaidumo trūkumą fiksuoja oro linijos atkarpos 173–174–177 (suminis ilgis 8,4 km), keičiamos kabelinėmis. Tačiau 208 mazgo nepatiektos galios reikšmės visais techniniais sprendimais išlieka pakankamai mažų verčių.

Rezultatai ir jų analizė rodo, kad linijų kabeliavimas gali smarkiai sumažinti nutraukimų dažnį ir nepatiektos energijos kiekį. Varianto c) atveju, kabeliuojant vieną dvipusio maitinimo linijos galą su linijiniu skyrikliu, gali šiek tiek pablogėti patikimumo rodikliai. Tačiau bendras poveikis elektros tiekimo patikimumui yra teigiamas. Be to, linijų kabeliavimas gali padidinti vidutinę atjungimo trukmę dėl ilgesnio kabelinių linijų remonto laiko. Siekiant sumažinti atjungimo trukmę, galima siūlyti kitokius energijos tiekimo užtikrinimo būdus, pvz., svarbiems vartotojams įrengti rezervinį maitinimo šaltinį.

G grupės mazgas: 215 yra maitinamas palyginti trumpos (8,3 km) linijos, sudarytos iš 2,0 km kabelinių ir 6,3 km oro linijų atkarpų. Nors bendras patikimumo lygis, vertinant tikėtiną atjungimų dažnį ir neperduotos energijos kiekį, yra aukštas, tačiau vidutinė maitinimo atkūrimo trukmė siekia 8,4 val. ir yra aukščiausia iš visų nagrinėtų variantų. Dėl tinklo konfigūracijos ypatumų nagrinėjami tik tokie elektros tinklo konfigūracijos pakeitimai:

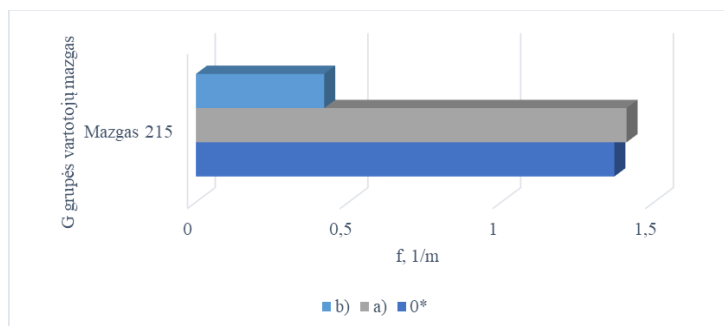
- a) skyriklių su televaldymu įrengimas, siekiant greičiau izoliuoti pažeistas atšakas 212–213 ir 217–218;
- b) viso tinklo iki atskyrimo vietos pakeitimas kabeliniu.

Patikimumo rodiklių rezultatai pateikti 3.7 lentelėje. Pateikti duomenys yra lyginami su pradiniais tinklo konfigūracijos duomenimis. 3.7 lentelės gauti rezultatai, G grupės vartotojų 215 mazgo patikimumo pokyčiai interpretuojami grafiškai (žr. 3.22–3.24 pav.).

3.7 lentelė. G grupės mazgo 215 patikimumo rodikliai

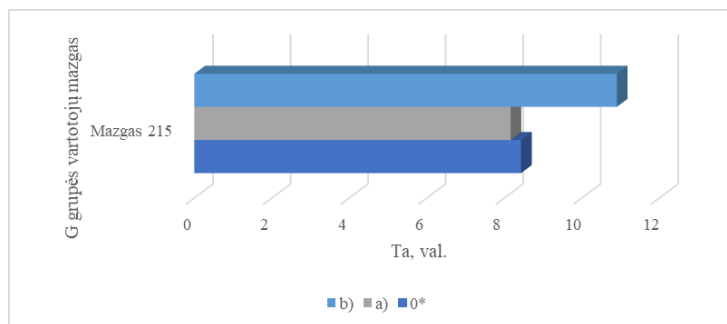
Var. nr	Mazgas 215			Tinklo
	$f, 1/m.$	$T_a, val.$	$\Delta W, kWh$	$\Delta W, kWh$
0*	1,37	8,43	–	–
a)	1,41	8,16	0	0
b)	0,42	10,9	180	1100

Pastaba: * – pradinė elektros tinklo konfigūracija.



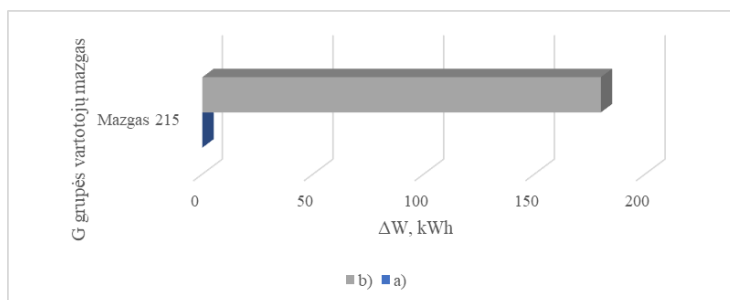
3.22 pav. G grupės vartotojų 215 mazgo elementų pakeitimo įtaka gedimų dažniui

215 mazgo gedimų dažniui sumažėti įtakos turi tik viso tinklo iki atskyrimo vietos pakeitimas kabeliniu. Kitu atveju skyriklių su televaldymu įrengimas, siekiant greičiau izoliuoti pažeistas atšakas: 212–213 ir 217–218, padidintų rodiklio vertę. Gedimų dažnio rodiklis pagerėtų 69,3 %. Tačiau, kad pagerėtų atkūrimo laikas, viso tinklo pakeitimas kabeliniu tik pablogintų rodiklio vertę (žr. 3.23 pav.).



3.23 pav. G grupės vartotojų 215 mazgo elementų pakeitimo įtaka atkūrimo laikui

Kad pagerėtų atkūrimo laikas, tiktų skyriklio su televaldymu įrengimas, siekiant greičiau izoliuoti pažeistas atšakas: 212–213 ir 217–218. Rodiklio vertė pagerėtų tik 3,2 %. G grupės vartotojų 215 mazgo tiekiamos galios kiekis pradinio laiko momentu nėra vertinamas, elementų pakeitimai ir gauti nepatiktos galios rezultatai vaizduojami 3.24 paveiksle.



3.24 pav. G grupės vartotojams 215 mazgo nepatiekta galia

Analizės rezultatai rodo, kad, įrengus skyriklius su televaldymu, vidutinę atjungimo trukmę galima sumažinti iki 8,2 val., tačiau šiek tiek padidėtų atjungimų dažnis. Viso tinklo kabeliavimas atjungimų dažnio rodiklio pokytį sumažintų iki 0,42 karto per metus, tačiau vidutinė atjungimų trukmė dar labiau padidėtų – iki 10,9 val. Siekiant sumažinti atjungimo trukmę, tikslinga būtų įrengti rezervinį maitinimo šaltinį.

Atliekant taikomojo pobūdžio tyrimus, įvertinant elektros tinklo modernizavimo tikslingumą, pritaikyta metodika leidžia priimti optimalius sprendimus, atsižvelgiant į EST ir elektros energijos tiekimo įtaką patikimumui. Taigi, gauti rezultatai aiškiai parodo EST modernizavimo įvertinimo reikiamybę visoms tinklo zonoms, o ne bendrai elektros sistemai.

3.4. Žaidimų teorijos taikymo rezultatai taikant žaidimų teorijos metodą

Žaidimų teorijos sprendimų teorija pritaikyta Lietuvos EST ir elektros vartotojų interesų sprendimams vertinti. Šiuo metodu vertinamos skirtingos tinklo topologijos, jų patikimumas, siekiant optimalaus sprendimo pasirinkimo. Pritaikant žaidimų teoriją Lietuvos EST, daroma prielaida, jog visi žaidėjai teikia teisingą informaciją. Vyrauja bendros taisyklės, vieno žaidėjo taisyklių pakeitimas nėra galimas. Tai reiškia, kad žaidimas kartu pagerina ir socialinę gerovę, garantuojamas rinkos efektyvumas. Tačiau reikia suprasti, kad dalyvaujant žaidime reikia įvertinti ir galimas rizikas.

Žaidime dalyvauja du žaidėjai: STO ir elektros energijos vartotojas. Žaidime pagrindinės sąlygos tampa elektros tinklas ir investicijos, mokama kaina už elektros energijos tiekimą. Žaidėjų vertinimo sritys pateiktos 3.8 lentelėje. Vienas iš žaidėjų, nesilaikantis bendrų taisyklių, nukenčia. Vyraujant bendroms taisyklėms, nuobaudų sistemai, tikėtinas žaidėjo finansinis nukentėjimas, kai taisyklės yra pažeidžiamos.

3.8 lentelė. STO ir elektros vartotojų vertinimo sritys

STO		
Investuojama į tinklo kokybę	Samdoma papildoma darbo jėga	+
Vartotojas		
Gauna kokybišką elektros energijos tiekimą	Vartotojui užtikrinamas greitas tinklo atkūrimas, elektros energijos atkūrimas vykdomas pagal numatytas sutartis	+

Remiantis 3.8 lentelėje pateiktomis vertinimo sritimis, ieškant optimalių sprendimų, reikia įvertinti tinkamiausią strategijos pasirinkimą, kai yra žinomi priešinio pasirinkimai (žr. 3.9 lentelę):

- STO keičia elektros tinklą, kaip numatyta. Investuoja į tinklo struktūrą, taiko naujus technologinius sprendimus, pasamdo papildomą darbo jėgą. Vartotojas moka didesnę (nei įprasta) kainą už elektros energijos tiekimą ir jos patikimumą, greitą tinklo atkūrimą.
- STO nekeičia elektros tinklo, kaip numatyta, neinvestuoja į tinklo struktūrą ir nusidėvėjusius, reikalingus keisti įrenginius, bet samdo papildomą darbo jėgą, kad sumažintų elektros tinklo nutrūkimus. Vartotojas moka įprastinę, žemesnę kainą, negauna tinkamos elektros energijos tiekimo kokybės.
- STO investuoja į tinklo struktūrą, papildo naujais technologiniais sprendimais, tačiau nesprendžia esminių tinklo problemų, nesamdo darbo jėgos. Vartotojas moka didelę kainą, gauna inovatyvias technologijų paslaugas, tačiau atkūrimo ir taisymo laikas ilgi.
- STO nieko nedaro. Vartotojas moka pakankamai mažą kainą, tačiau turi nepatikimą ir prastą elektros energijos tiekimą.

3.9 lentelė. Tikimybinės tinklo būsenos

	Tinklo būsena							
	1-oji būsena		2-oji būsena		3- ioji būsena		4-oji būsena	
	Keičiamas elektros tinklas	Užtikrinta darbo jėga	Investuojama ir keičiamas elektros tinklas / tinklo elementai, tinklo dalis	Užtikrinta darbo jėga	Investuojama ir keičiamas elektros tinklas / tinklo elementai, tinklo dalis	Užtikrinta darbo jėga	Investuojama ir keičiamas elektros tinklas / tinklo elementai, tinklo dalis	Užtikrinta darbo jėga
STO	+	+	-	+	+	-	-	-
	Gaunamas kokybiškas elektros energijos tiekimas	Greitas atkūrimas	Gaunamas kokybiškas elektros energijos tiekimas	Greitas atkūrimas	Gaunamas kokybiškas elektros energijos tiekimas	Greitas atkūrimas	Gaunamas kokybiškas elektros energijos tiekimas	Greitas atkūrimas
Vartotojai	+	+	-	+	+	-	-	-

Lietuvos EST dažniausiai yra trijų tipų: spindulinio tipo (žr. 2.24 pav.); tinklas turi nepriklausomus tiekimą šaltinius (žr. 2.25 pav.); tinklas radialinis, kuriame elektros energijos tiekimas galimas tiekti iš kitų elektrinių pastočių (žr. 2.26 pav.). Analizuojant visas: 2.24–2.26 pav. vaizduojamas schemas, vyraujant skirtingoms tinklo būsenoms (žr. 3.9 lentelę), sudaromi 3 toliau analizuojami scenarijai:

- **1 scenarijus.** Vertinamos 2.25 pav. ir 2.26 pav. pateiktos schemas;
- **2 scenarijus.** Vertinamos 2.25 pav. ir 2.27 pav. pateiktos schemas;
- **3 scenarijus.** Vertinamos 2.26 pav. ir 2.27 pav. pateiktos schemas.

Primama sąlyga, kad apkrovos yra panašios visuose apkrovų mazguose: $V_1 = V_2 = V_n$, linijinių apkrovų išdėstymas yra toks pats. Atsižvelgiant į tinklo būsenas (žr. 3.9 lentelę) ir skirtingas tinklo topologijas, įvertinti galimi elektros tinklo gedimų ir atkūrimo scenarijai, vyraujant įvairiems gedimų intensyvumų pasiskirstymams, skaičiavimų rezultatai pateikti 3.10 lentelėje.

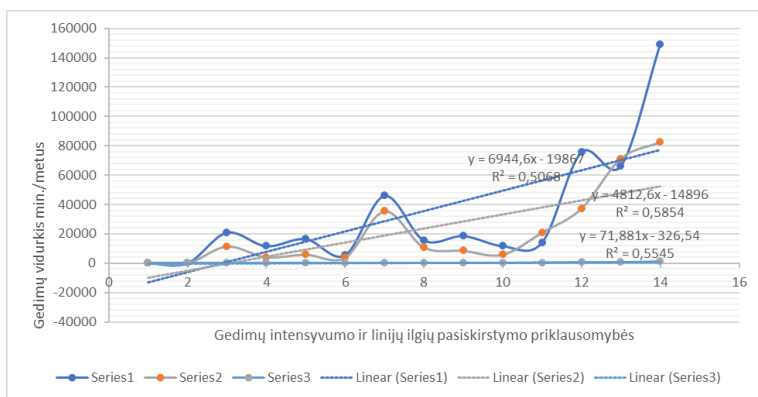
3.10 lentelė. Žaidimų teorijos metodo taikymas skirtingų jungimo tipų EST

Tinklo būsena	$\lambda/m.$			l, km			$MTTR, min.$			<i>Schema</i>		
	L	M	H	l_1	l_2	l_3	t_1	t_2	t_3	1	2	3
0	0,02	0,1	0,3	0,1	3	5	120	240	640	20844	11330	0
2	0,02	0,1	0,3	0,1	3	5	100	220	360	11616	4082	0
3	0,02	0,1	0,3	0,1	3	5	100	120	320	16514	5893	0
4	0,02	0,07	0,1	0,1	3	5	100	120	320	5454	3803	0
1	0,2	0,3	0,5	0,1	3	5	120	240	640	45912	35283	0
0	0,02	0,1	0,3	0,1	3	15	120	240	640	15574	10814	0
2	0,02	0,1	0,3	0,1	3	15	100	220	360	18554	8472	0
3	0,02	0,1	0,3	0,1	3	15	100	120	320	11694	5818	0
4	0,02	0,1	0,3	0,1	3	15	240	360	640	14106	20819	404
1	0,2	0,3	0,5	0,1	3	15	120	240	640	75627	37128	533
1.1.*	0,2	0,5	0,7	0,1	3	5	240	360	640	66247	71069	677
1.1.*	0,2	0,5	0,7	0,1	3	15	240	360	640	148902	82270	1359

* *Paaškinimas:* tinklas yra nusidėvėjęs, gedimų intensyvumas siekia apie 50 %/1 km
čia *L* (angl. *low*) – žemas;
M (angl. *medium*) – vidutinis;
H (angl. *high*) – aukštas.

Remiantis 3.10 lentelėje pateiktais rezultatais, patikimumas gali labai pagerėti, nuo 15 % iki 70 %, kai elektros tinklas yra keičiamas (pradiniu tinklu laikomas spindulinis elektros tinklas). Vertinant skirtingas tinklo topologijas, skirtingas elektros tinklo schemas, priklausomai nuo gedimų intensyvumo, pastebėta, jog patikimumas gali būti atitinkamai 70 % mažesnis. Patikimumui įtakos turi: tinklo topologija, gedimų intensyvumas ir atkūrimo laikas.

Vidutinis nutraukimų dažnis yra įvertinamas pagal įvykusius elektros tiekimo nutrūkimus elektros grandinėje. Skaičiavimai vertinami taikant *Python* programą. Simuliacijos metai – 50 m. Remiantis 3.10 lentelėje pateiktais duomenimis, sudarytas grafikas (žr. 3.25 pav.). Skirtingų elektrinių schemų atkūrimo laikas skiriasi, priklausomai nuo atstumo, atjungtų mazgų skaičiaus, kai tinklo dalyje įvyksta nors vienas gedimas. Skaičiavimuose vertinami ir gedimų persidengimai.



3.25 pav. Gedimų intensyvumo tikimybinis pasiskirstymas skirtingose elektros schemose

3.25 pav. pateiktos linijinių tiesių lygtys, kiekvienai kreivei pateikiama R^2 reikšmė, kuri vadinama determinacijos koeficientu. Iš grafiko matyti, jog skirtinga tinklo topologija reiškia skirtingas ryšių struktūras, kintamumą ir sąveiką tarp tinklo elementų. Visose elektrinės schemose atjungimo laikas skiriasi dėl tinklo struktūros ir jame įdiegtų įrenginių. Trečiosios schemos gedimų tikimybė aiškiai pasimato, kai gedimų intensyvumas didesnis nei $\lambda = 0,5$, kitu atveju per 50 simuliuojamų metų gedimų skaičius labai mažas ir nesiekia 1 %/1 km.

Remiantis 3.10 lentelės ir 3.25 pav. duomenimis, trečioji elektros tinklo schema yra daug geriau sumodeliuota nei 1-oji ir 2-oji. Vyraujant gedimams, schemos galimybės perjungti maitinimą iš kitų elektros šaltinių garantuoja patikimesnį elektros energijos tiekimą ir paties tinklo patikimumą. Įvertinus tinklo nusidėvėjimą, grafiko aukščiausios vertės parodo tinklo gedimų dažnį, kai gedimai užtrunka 148902 min./metus, o tai reiškia, kad 71 % per metus, tinklas neveikia.

Žaidimas, remiantis 3.9 lentelėje pateiktomis tinklo būsenomis, vykdomas tarp dviejų žaidėjų, jų galimų pasirinkimų. Remiantis 2.1.5. poskyryje pateiktomis formulėmis, įvertinus elektros energijos visas laiko (atjungimo, perjungimo, atkūrimo) kainas (žr. 3.11 lentelę), skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.12–3.14 lentelėse.

3.11 lentelė. Atjungimų, perjungimų ir atkūrimo preliminarios kainos, Eur

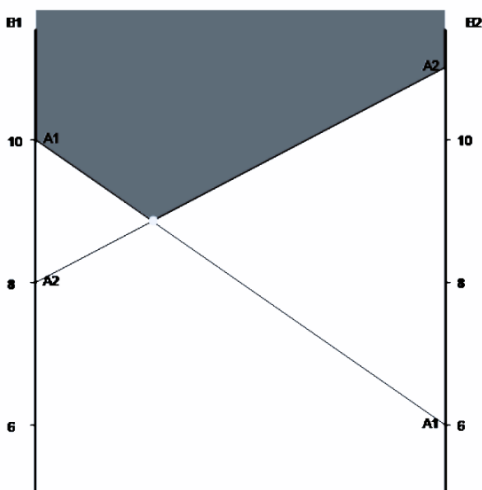
Laikai	Laikas, min.	Preliminari kaina, Eur
t_s	0,1; 60; 120; 240	2
t_t	0,1; 30; 60; 120	6
t_r	60; 120; 240; 360; 480; 640; 720	15
Jungtuvai	< 2	30

1 scenarijus. Remiantis 3.9 lentelėje pateiktomis žaidimo sąlygomis, kai tinklo būsenos keičiasi, esant elektros tinklo įrenginių pakeitimams, modernizavimui ar elektros tinklo topologijos pakeitimams, vyksta žaidimas. Žaidimo scenarijų pasiskirstymas ir rezultatai pateikti 3.12 letelėje.

3.12 lentelė. Elektros energijos nutraukimo, atkūrimo laiko vertinimas taikant žaidimų teorijos metodo 1 scenarijų

teorijos metodo 1 schemą					
	Strategijų lygiai	Strategijos pasirinkimas		Kainos pasiskirstymas, Eur.	
		B			
A	L_1	L	H	L	H
		9,6	6	240 Eur	122,4 Eur
	H_1	L	H	L	H
		8	10,8	200 Eur	242,4 Eur

$MiniMax = (10)$; $MaxiMin = [8]$, stulpelio $MiniMax \neq$ eilutės $MaxiMin$, šiame žaidime nėra susikirtimo (balno) taško. Nė viena veiksmų kryptis nėra svarbesnė už kitas. Naudojant žaidimų grafinį metodą, jeigu žaidėjas A pasirenka L_1 , tuomet žaidėjas B gali laimėti pasirinkdamas 10,8 arba 6 (iš galimų H pasirinkimų), tai priklauso nuo B žaidėjo pasirinktos strategijos. Gaunamas grafikas, kurio žemiausia V vertė rodo žaidimo vertę (8,86) (žr. 3.26 pav.)



3.26 pav. Žaidimo strategijos vertė taikant 1-ąjį scenarijų

Remiantis ekonominiu įvertinimu, $V = 210$, todėl tinkamiausias strategijos pasirinkimas abiem žaidėjams išlieka, kai kainos pasirinkimas 200 Eur. Šioje strategijoje vyrauja greitesnis atkūrimo laikas, reiškiasi elektros tinkle keičiami įrenginiai, samdoma papildoma darbo jėga, kainai smarkiau nekintant. Tinklo topologija išlieka spindulinio tipo, tačiau kitas elektros tinklo žaidėjas garantuoja greitesnį ir efektyvesnį elektros energijos atkūrimą.

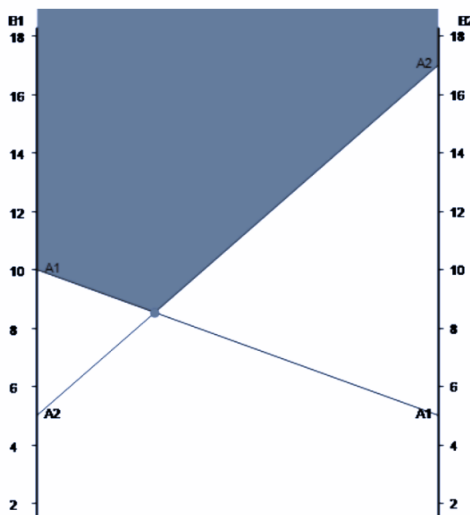
2 scenarijus. Analizuojant situaciją iš vieno žaidėjo perspektyvos, atsiranda galimybė siekti didesnio aprūpinimo darbo jėga arba daugiau investuoti į EST, diegiant naujas technologijas ar keičiant tinklo topologiją. Tai gali leisti pagerinti bendrą žaidimo rezultatą ir pasiekti strateginius tikslus. Pavyzdžiui, jei žaidimo metu pastebima, kad tinklas yra perpildytas ar nepakankamas elektros galios aprūpinimas, gali būti pravartu investuoti į technologijas, kurios padidintų tinklo talpumą arba pagerintų energijos efektyvumą. Taip pat, atsižvelgiant į esamus ir prognozuojamus

elektros poreikius, galima perplanuoti elektros tinklus, kad būtų efektyviau panaudoti turimi ištekliai. Vertinamos 2.25 ir 2.27 pav. pateiktos elektrinės schemos, jų atjungimų, perjungimų ir remonto laikas, rezultatai pateikti 3.13 lentelėje.

3.13 lentelė. Elektros energijos nutraukimo, atkūrimo laiko vertinimas taikant žaidimų teorijos metodo 2 scenarijų

Žaidėjas	Strategijų lygiai	Strategijos pasirinkimas		Kainos pasiskirstymas, Eur.	
		B			
A	L_1 H_1	L	H	L	H
		9,6	4,92	240 Eur	120,12 Eur
		8	16,8	200 Eur	134,52 Eur

$MiniMax = (10)$, $MaxiMin = [5]$; stulpelis $MiniMax \neq Eilutės MaxiMin$. Nė viena veiksmų kryptis nėra svarbesnė už kitas. Žaidimo vertė $V=8,53$ (žr. 3.27 pav.). Vertinant prastovų kainas ir remonto išlaidas, rezultatai rodo, jog tinkamiausias strategijos pasirinkimas yra, kai elektros tinklo dalies nutraukimo ir atkūrimo kaina – 134,52 Eur. 2.27 pav. pateikta schema yra patikimesnė, kai įvyksta elektros tinklo nutrūkimai, gedimai. Galimi tinklo linijų maitinimai iš kitų elektros energijos šaltinių. Tokio tipo tinklas būtų ne tik efektyvus, siekiant užtikrinti vartotojų poreikius, bet ir sumažintų kaštus, kurie atsirastų dėl netinkamos tinklo būklės ar nuolatinio darbo jėgos reikalavimo.



3.27 pav. Žaidimo strategijos vertė taikant 2-ą scenarijų

3 scenarijus. Šiame scenarijuje naudojamos 2.26 ir 2.27 pav. pavaizduotos elektrinės schemos. 2.27 pav. pateiktoje schemoje gedimų intensyvumo pasiskirstymas tinkle yra labai mažas (žr. 3.9 lentelę). Esant senam, nusidėvėjusiam elektros tinklui, žinoma, kad gedimų intensyvumo lygis kyla, tačiau šio tinklo linijų nutrūkimai turėtų daug mažesnę poveikį, palyginti su 2.25 pav. pateikta tinklo topologija. Tokiame tinkle, norint vertinti atsijungimų skaičių, gedimų intensyvumas

turi būti daugiau kaip 50 % 1 elektros linijos kilometre. Žaidimo galimų scenarijų pasiskirstymas pateiktas 3.14 lentelėje.

3.14 lentelė. Elektros energijos nutraukimo, atkūrimo laiko vertinimas taikant žaidimų teorijos metodo 3 scenarijų

Žaidėjas	Strategijų lygiai	Strategijos pasirinkimas		Kainos pasiskirstymas, Eur.	
		B			
A	L_1 H_1	L	H	L	H
		6	4,802	122,4 Eur	120 Eur
		10,8	16,8	242,4 Eur	134,52 Eur

Stulpelis *MiniMax* = *Eilutė MaxiMin* = 11. Todėl tokiaime žaidime grafinis metodas netaikomas. Optimalus sprendimas, remiantis ekonominiais skaičiavimais, būtų 120 Eur (žr. 3.14 lentelę). Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad perjungimo laikas yra tiesiogiai susijęs su tinklo veikimu ir atkūrimo laiku. Sumažinus bet kurį laiką, galima greičiau atkurti elektros tiekimą po elektros energijos nutrūkimo ar gedimo.

Strategijos optimalus pasirinkimas, nekeičiant kainų dydžio, įvertinus elektros energijos nutraukimų laiką, atskleidžia, jog tinklo topologija ir struktūra turi didelę įtaką tinklo patikimumo rodikliams. Be to, didelę kainos dalį sudaro tiek vartotojų, kurie patiria gedimus kitose linijose, tiek jų prastovos laikas, kuris turi ekonominį poveikį ne tik vartotojams, bet ir valstybei.

Žaidimo scenarijai gali būti pasirenkami įvairiai, priklausomai nuo to, kokius rezultatus norima gauti. Žaidimų metodu galima priimti tinkamus sprendimus, kurie užtikrintų elektros energijos tiekimo užtikrintumą ir patikimumą, kartu įvertinant kaštus, atsižvelgiant į nutraukimų, atkūrimo ir perjungimo laiką, kuris turi didelę įtaką paveikti elektros energijos kainų lygiams. Viena iš didžiausių taikant šį metodą atsirandančių problemų – tai, kad kiekvienas dalyvis turi apsvarstyti, kaip kiti dalyviai veikia priimdami sprendimus. Žaidimų teorijos metodas labai naudingas siekiant suprasti ir prognozuoti elektros vartotojų elgsenos modelius, atsižvelgiant į kainų svyravimus ir kitus veiksnius; tiekėjams nustatyti optimalius kainų nustatymo ir elektros energijos tiekimo planus, kad būtų patenkinti žaidėjų abipusiai interesai.

3.5. Skyriaus apibendrinimas

1. Sukurtas algoritmas leidžia įvertinti rezervinio maitinimo charakteristikų įtaką elektros tinklo patikimumo vertėms. Nustatyta, kad patikimumo lygis suprastėja esant vienam rezerviniam šaltiniui. Išanalizavus EST, įvertinus pažeidžiamiausias tinklo zonas, kurios turi įtakos ir gedimo nepatyrusiems vartotojams, nustatyta esama tinklo būklė įvertinama patikimumo rodikliais.
2. Remiantis išanalizuota ir ištirta moksline literatūra, teisine informacija, kokybiniais ir kiekybiniais duomenimis, galima teigti, kad Lietuvos EST gedimų skaičius auga. Didėjanti tinklo apkrova ir elektros energijos poreikiai reikalauja Lietuvos EST technologinių, modernizavimo sprendimų. EST vyraujantys gedimai apsunkina EES darbą, o ateityje tai gali sukelti didelių ekonominių nuostolių. Siekiant patikimesnio ir saugesnio elektros energijos

tiekimu, svarbu, kad būtų užtikrintas: didesnis elektros energijos skirstymo patikimumas; pagerinta elektros energijos tiekimo kokybė ir efektyvumas; atnaujintos nusidėvėjusios ir reikalavimų neatitinkančios elektros tinklo įrenginių konstrukcinės dalys; įdiegtos išmaniosios technologijos, atitinkančios aplinkosaugos reikalavimus, vartotojų poreikius.

3. Sukurtas EST patikimumo vertinimo algoritmas, kuris buvo pritaikytas realiam 10 kV Lietuvos elektros skirstomajam tinklui. Nustatytos tinklo pažeidžiamiausios zonos, kurioms atlikus tinklo topologijos pakeitimus arba tinklo modernizavimą, tinklo patikimumo rodikliai pakito. Atjungimų dažnis sumažėjo nuo 8,35 karto / m. iki 3,42 karto / m., kai OL buvo pakeista kabeline. Nepateiktos energijos kiekio sumažinimui įtakos turėjo linijos jungtuvo įrengimas skyriklio vietoje (sumažėjo nuo 3070 kWh / m. iki 2010 kWh / m.). Vidutinės atjungimų trukmės vertė nuo 3,2 val. pakito iki 2,67 val., kai OL linija keičiama kabeline, atsižvelgiant į atskiras tinklo zonas. Patikimumo rodiklių verčių gerėjimui taip pat turėjo įtakos skyriklių su televaldymu įrengimas.
4. Reikia atsižvelgti į tinklo optimizavimą atnaujinant nusidėvėjusias EST dalis ir įrenginius bei įdiegiant skaitmenines automatines technologijas. Būtina įvertinti modernizavimo tikslingumą ir atsižvelgti į vartotojų perspektyvą. Naudojant optimizavimo skaičiavimus, galima nustatyti tinklo dalis, kuriose verta keisti įrenginius naujais arba keisti elektros tinklo topologiją, atsižvelgiant į kintančius patikimumo rodiklius.
5. Gauti rezultatai rodo, kad esama tinklo dalis turi būti technologiškai atnaujinta, siekiant sumažinti elektros energijos nuostolius ir užtikrinti efektyvų elektros energijos tiekimą. Šioje sistemoje STO ir vartotojų bendradarbiavimas gali padidinti abipusę naudą ir kartu gerinti tinklo patikimumą. Žaidimų teorija gali padėti optimizuoti elektros vartotojų ir STO pasirinkimus, o bendradarbiaujant galima siekti ambicingesnių tikslų ir geresnių rezultatų, užtikrinančių tinklo patikimumą.
6. EST modernizavimas ir nuolatinis tobulinimas leidžia greičiau pašalinti gedimus, kartu sumažinti elektros energijos nutraukimų trukmes ir nepateiktos elektros energijos kiekį, patirtas nepateiktos galios išlaidas. Įvertinant tinklo topologijos keitimo, modernizavimo efektyvumą, tinklo patikimumo rodiklių verčių pagerėjimus, būtina priimti optimalius sprendimus, kurie pagerintų tinklo būseną ir jo patikimumą. Esant elektros energijos nutrūkimams, tinklo vartotojai patirs mažesnius nuostolius, elektra gali būti tiekiama ne viena kryptimi, palaikomas elektros gamybos balansas, greitai ir efektyviai lokalizuoti ir izoluoti gedimai, padidintas tinklo patikimumas ir stabilumas bei ekonomiškumas.

IŠVADOS

1. Sudaryta elektros skirstomojo tinklo patikimumo vertinimo metodika, apimanti tinklo patikimumą vertinančius kriterijus, leidžia įvertinti ir identifikuoti elektros tinklo būseną, tiekimo patikimumą ir tikėtina nepateiktos elektros energijos kiekį kiekvienam elektros energijos vartotojui. Siekiant padidinti tinklo patikimumą ir norint gauti optimalų sprendinį, reikia įvertinti elektros skirstomojo tinklo konkrečias topologijų zonas ir jų techninius išpildymus, o elektros tinklo modifikavimo tikslingumas grindžiamas atsižvelgiant į techninę ir ekonominę įtaką elektros tiekimo patikimumui.
2. Algoritmas, pagrįstas Monte Karlo ir maksimalaus srauto metodais, kurie nereikalauja detalių duomenų apie elektros tinklą, supaprastina elektros tiekimo patikimumo ir energijos prieinamumo vartotojams rodiklių nustatymą. Naudojant šį algoritmą ir elektros skirstomojo tinklo techninius duomenis, jo elementų apibendrintus patikimumo bei pralaidumo rodiklius ir vartotojų elektros energijos poreikį, keičiant tinklo topologiją ir atliekant tinklo modernizavimą, patikimumo rodiklių vertės galima pagerinti iki 87 %.
3. Algoritmas, skirtas optimaliems sprendimams priimti dėl elektros tinklo modifikavimo tikslingumo, naudojant žaidimų teoriją, leidžia įvertinti įvairių veiksmų svarbą, atsižvelgiant į elektros vartotojo poreikį turėti pakankamą elektros energijos kiekį ir jo tiekimo patikimumą. Elektros skirstomojo tinklo sprendimų priėmimas modifikuoti elektros tinklą patikimumą padidintų iki 70 %.
4. Pritaikius sukurta patikimumo vertinimo metodiką nagrinėjamam 10 kV elektros skirstomajam tinklui, nustatyta, kad: 1 km oro linijos pakeitimas kabeline leidžia sumažinti tikėtiną vartotojų atjungimo intensyvumą iki 14 %, o nepateiktos energijos kiekį per metus – iki 3,2 %; didžiausias elektros energijos tiekimo patikimumas gaunamas kompleksiskai optimizuojant tinklo topologiją, keičiant oro linijas kabelinėmis ir įrengiant išmaniuosius oro linijų jungtuvus. Tikėtina atjungimo trukmė gali būti sumažinama iki 1,5 val., nepateiktos energijos kiekis sumažėtų iki 51 % per metus, o komutacijų trukmė – 0,9 val.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- AB ELEKTROS SKIRSTYMO OPERATORIUS. 2019–2028 m. investicijų planas. 2018. [žiūrėta 2020-10-05]. Prieiga per internetą: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:F6E4PuMP414J:https://www.eso.lt/download/178990/lt%2520eso%252010%2520mip%25202019-2028.pdf+%cd=1&hl=lt&ct=clnk&gl=lt>
- AB ENERGIJOS SKIRSTYMO OPERATORIUS. Elektros skirstomojo tinklo technologinės plėtros strategija [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2022-07-13]. Prieiga per internetą: <https://www.eso.lt/stream/26171/strategija%202016.pdf>
- KHAN A. H., T.R. JAN. Reliability Evaluation of Engineering System Using Modified Weibull Distribution. Research Journal of Mathematical and Statistical Sciences [interaktyvus]. J&K, India., July 2015. vol. 3(7), 1-8 [žiūrėta 2022-07-13]. Prieiga per internetą: http://www.isca.me/MATH_SCI/Archive/v3/i7/1.ISCA-RJMSS-2015-017.pdf
- AKHIKPEMELO A., N. EYIBO A. ADEYI. Reliability analysis of power distribution network. Power network-planning optimization considering average power not supplied reliability index: Modified by chance-constrained programming [interaktyvus]. 2016, vol. 11(2), 53 – 63 [žiūrėta 2022-07-13]. Prieiga per internetą: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.cie.2021.107900>
- ALAM, A., et al. Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates. Science Direct [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2022-07-13]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.epr.2016.05.012
- ALAVIAN P., Y. EUN, K. LIU, S. M. MEERKOV, L. ZHANG. The (α, β) -Precise Estimates of MTBF and MTTR: Definition, Calculation, and Observation Time. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering [interaktyvus]. 2021, vol. 18(3), 1469-1477 [žiūrėta 2022-01-11]. Prieiga per doi: 10.1109/TASE.2020.3017134
- AMINI M. R., M. MAHDAVI, M. J. OMIDI. Discrete – Time Markov Chain Analysis of Energy Efficiency in a CR Network Regarding Primary and Secondary Traffic with Primary User Returns. IEEE Access [interaktyvus] 6 (2018): 22305–23 [žiūrėta 2022-01-11]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2018.2825291
- GOLDBERG A. V., E. R. TARIAN. Efficient Maximum Flow Algorithms. Communications of the ACM 57 [interaktyvus], no. 8, August 2014. P. 82–89 [žiūrėta 2020-07-12]. Prieiga per doi: 10.1145/2628036
- APYNYA A. Lošimų teorija. Vilniaus universitetas: Vilniaus universiteto leidykla. 2007.
- ARMBRUSTER A., M. GOSNELL, B. MCMILLIN, M. CROW. The maximum flow algorithm applied to the placement and distributed steady-state control of UPFCs. Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium [Interaktyvus], 25-25 Oct. 2005 [žiūrėta 2013-03-01]. Prieiga per doi: 10.1109/NAPS.2005.1560505
- ASHTARI H. What Is Network Topology. Definition, Types With Diagrams, and Selection Best Practices for 2022. Network topology is the physical arrangement of the endpoints and links in an enterprise network. March 10, 2022. [žiūrėta 2022-04-04]. Prieiga per internetą: <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-network-topology/>
- ASLAN Y., Y.E. YAĞAN. Artificial neural-network-based fault location for power distribution lines using the frequency spectra of fault data. Electrical Engineering 99 [interaktyvus], no. 1, March 2017, 301–11 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1007/s00202-016-0428-8
- AUGUTIS J., et al. Avarinių būvių elektros tinkluose rizikos įvertinimo ir valdymo metodologija. Energetika [interaktyvus]. 2005, Nr. 2., 14-19 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per internetą: <<http://www.elibrary.lt/resursai/LMA/Energetika/E-014.pdf>>
- AVIS D., G. D. ROSENBERG, R. SAVANI, B. VON STENGEL. Enumeration of Nash Equilibria for Two-Player Games. Economic Theory [interaktyvus]. January 1, 2010, vol. 42(1), 9–37 [žiūrėta 2016-05-03]. Prieiga per doi: 10.1007/s00199-009-0449-x.
- BAE M., et al. Toward electricity retail competition: Survey and case study on technical infrastructure for advanced electricity market system. Applied Energy [interaktyvus], 2014, vol. 133, 252-273 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1016/j.apenergy.2014.07.044
- BAUBLYS, J., et al. Izoliacija ir viršįtampiai. Kaunas: Technologija., 2008.

- BIYUN, C., et al. A Reliability Forecasting Method for Distribution Network Based on Data Mining. China International Conference on Electricity Distribution (CICED) [interaktyvus], 2018, 2503-2506 [žiūrėta 2019-05-11]. Prieiga per doi: 10.1109/CICED.2018.8592536
- BILLINTON, R., Allan, R. N. (1996). Reliability evaluation of Power Systems. Springer New Boston, MA: Springer US. eBook. 1984 [žiūrėta 2016-07-13]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1860-4>
- BILLINTON, R., Wenyuan, L. Reliability Assessment of Electric Power System Using Monte Carlo Methods. Cham: Springer International Publishing, n.d., 1994.
- BOSISIO A., A. BERIZZI, A. MOROTTI, B. GRECO, G. IANNARELLI. Reliability evaluation for meshed distribution networks based on minimal cut sets method. In 2020 AEIT International Annual Conference, Catania, Italy: IEEE (AEIT) [interaktyvus], 2020, 1–6 [žiūrėta 2022-06-13]. Prieiga per doi: 10.23919/AEIT50178.2020.9241128
- BROWN R. E., S. GUPTA, R. D. CHRISTIE, S. S. VENKATA, R. FLETCHER. Distribution system reliability assessment using hierarchical Markov modeling. IEEE Transactions on Power Delivery [interaktyvus], Oct. 1996, vol. 11(4), 1929-1934 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/61.544278
- BROWN, R. E. Electric Power Distribution Reliability. Taylor & Francis Group, NW, 2009.
- CARLOS G., F.J. RODRIGUEZ, L. GIMENEZ DE URTASUM, S. BORROY. Assessing the contribution of automation to the electric distribution network reliability. Electrical Power and Energy Systems. 2018, vol. 97, 120-126.
- CHEN W., M. GUO, Q. JIN, Z. YAO. Reliability Analysis Method of Power Quality Monitoring Device based on Non-Parametric Estimation. 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) [interaktyvus], Xi'an, China, 2019, 1526-1529 [žiūrėta 2019-09-13]. Prieiga per doi: 10.1109/ICIEA.2019.8833999
- CHENG L., T. YU. Game-Theoretic Approaches Applied to Transactions in the Open and Ever-Growing Electricity Markets From the Perspective of Power Demand Response: An Overview. IEEE Access [interaktyvus], 2019, vol. 7, 25727-25762 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900356
- CHENG L., T. YU. Nash Equilibrium-Based Asymptotic Stability Analysis of Multi-Group Asymmetric Evolutionary Games in Typical Scenario of Electricity Market. IEEE Access [interaktyvus], 2018, vol. 6, 32064-32086 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2018.2842469
- CHENG L. F., T. YU. Typical scenario analysis of equilibrium stability of multi-group asymmetric evolutionary games in the open and evergrowing electricity market. Proceedings China Social Electric Engineering [interaktyvus], Oct. 2018, vol. 38(19), 5687-5703 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.172219
- CHENG L. F., T. YU. Exploration and exploitation of new knowledge emergence to improve the collective intelligent decision-making level of Web-of-cells with cyber-physical-social systems based on complex network modeling. IEEE Access [interaktyvus], Oct. 2018, vol. 6, 74204-74239 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879025
- CHENG, L. F., YU, T. A new generation of AI: A review and perspective on machine learning technologies applied to smart energy and electric power systems. Int. J. Energy Res., to be published [žiūrėta 2021-01-12]. Prieiga per doi: 10.1002/er.4333
- CHERNENKO I. V. Effect of Switchgear Failures in Calculations of Structural Reliability of Power Supply Circuits at Industrial Facilities. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) [interaktyvus], Moscow, Russia, 2018, 1-4 [žiūrėta 2019-06-14] prieiga per doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728587
- CHOMA, A. M., J. H. C. PRETORIUS, A. L. MARNEWICK. Reliability Evaluation of an Electric Power Distribution System: A Case Study in a Gauteng Metropolitan Municipality. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) [interaktyvus]. 2019, 1-6 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994466
- CHOWDHURY, A., KOVAL D. Power Distribution System Reliability: Practical Methods and Applications. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2011

- COLE M., et al. Installation, operation and maintenance considerations for electrical equipment in hazardous location. IEEE IAS Electrical Safety Workshop [interaktyvus], 2010, 68-72 [žiūrėta 2016-10-28]. Prieiga per doi: 10.1109/ESW.2010.6164452
- COUNCIL OF EUROPEAN ENERGY REGULATORS. 6th Ceer Benchmarking report on the Quality of Electricity and gas supply. Brussels, 2016.
- CUZANAUSKAS, T., A. ANSKAITIS. Application of game theory in IEEE 802.11 networks. Telecommunications engineering T180. 2015, 345-349.
- ČEKANA VIČIUS, V., G. MURAUSKAS. Statistika ir jos taikymas. Vilnius: TEV. I SBN 9789986546931.
- DUGAN R. C., M. F. MCGRANAGHAN, H. W. BEATY. Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill, 1996, 61-67; R. Billinton, R. Allan. Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd ed., New York and London: Plenum Press, 1996, 220-243.
- EDIMU M., C. T. GAUNT, R. HERMAN. Using probability distribution functions in reliability analyses. Electric Power Systems Research [interaktyvus], 2011, vol. 81(4), 915-921, ISSN 0378-7796 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.11.022>.
- ELEKTROS ENERGIJOS TIEKIMO IR NAUDOJIMO TAISYKLĖS. Patvirtinta 2010 m. vasario 11 d. įsakymu Nr. 1-238. Lietuvos Respublikos energetikos ministro 2020 m. birželio 29 d. įsakymo Nr. 1-163 redakcija.
- ENERGETIKOS SĄJUNGOS DOKUMENTŲ RINKINYS. Komisijos komunikatas Europos Parlamentu, Tarybai, Europos ekonomikos ir socialinių reikalų komitetui, regionų komitetui ir Europos investicijų bankui. Atsparios energetikos sąjungos ir perspektyvios klimato kaitos politikos pagrindų strategija. 2015 Briuselis, COM (2015) final. [interaktyvus], [žiūrėta 2022-03-11]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/DOC/?uri=CELEX:52015DC0080&from=LT>.
- EURELECTRIC. Power Distribution in Europe. [žiūrėta 2022-09-25]. Prieiga per internetą: <https://www3.eurelectric.org/powerdistributionineurope/>.
- EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. Direktyva 2009/72/EB dėl elektros energijos vidaus rinkos bendrųjų taisyklių. [žiūrėta 2020-11-01]. Prieiga per internetą <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/lt/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0072>
- EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. Direktyva 2012/27/ES dėl energijos vartojimo efektyvumo. [žiūrėta 2020-11-01]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0027>
- EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA 2011/83/ES dėl vartotojų teisių, kuria iš dalies keičiamos Tarybos direktyva 93/13/EEB ir Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 1999/44/EB bei panaikinamos Tarybos direktyva 85/577/EEB ir Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 97/7/EB (OL L 304, 2011 11 22, p. 64). 2011 m. spalio 25 d. [žiūrėta 2020-11-01].
- FANG J., et al. Power System Structural Vulnerability Assessment Based on an Improved Maximum Flow Approach. IEEE Transactions on Smart Grid. [interaktyvus], vol. 9(2), March 2018. 777 – 785.
- FERREIRA G. D., A. S. BRETAS, G. CARDOSO. Optimal distribution protection design considering momentary and sustained reliability indices. Modern Electric Power Systems, Wroclaw, 2010, 1-8.
- FURSE, et al. Fault Diagnosis for Electrical Systems and Power Networks: A Review. IEEE Sensors Journal [interaktyvus], January 15 2021, vol. 21(2), 888-906 [žiūrėta 2022-06-27]. Prieiga per doi: 10.1109/JSEN.2020.2987321
- GABER A., et al. PMUs placement with max-flow min-cut communication constraint in smart grids. IEEE Wireless Communications and Networking Conference [interaktyvus], 3-6 April 2016, [žiūrėta 2019-06-15]. Prieiga per doi: 10.1109/WCNC.2016.7565122
- GAUR, et al. Handbook of Research on Engineering Innovations and Technology Management in Organizations. IGI Global, 2020-04-17, p. 459.
- GEČYS S. Elektros mašinų patikimumas ir eksploatacija. Kaunas: Technologija. 2011, 266. ISBN 978-609-02-0152-7
- GHOEISHI H., et al. Optimal placement of tie points and sectionalizers in radial distribution network in presence of DGs considering load significance. Smart Grid Conference (SGC), Tehran

- [interaktyvus], 2013, 160-165, [žiūrėta 2014-03-13]. Prieiga per doi: 10.1109/SGC.2013.6733787
- GLOWACKI, M. System Average Interruption Duration Index (SAIDI). 2018 [žiūrėta 2021-01-12] Prieiga per internetą: <https://fortcollins.clearpointstrategy.com/economic-health/electric-system-average-interruption-duration-index-saidi-in-minutes/>
- GOHEN T. Electric Power Distribution System Engineering. Second edition. Florida: University of West Florida Pensacola, 2008.
- GONO R., S. RUSEK, M. KRATKY. Reliability analysis of distribution networks. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation [interaktyvus], Barcelona, 2007, 1-5, [žiūrėta 2012-10-20]. Prieiga per doi: 10.1109/EPQU.2007.4424180
- GONO R., et al. Reliability analysis of electric distribution system. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering [interaktyvus], Rome, 2011, 1-4, [žiūrėta 2012-12-12]. Prieiga per doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874842
- GUDZIUS, S., et al. Characteristics of Fault Detection System for Smart Grid Distribution Network. Electronic and electrical engineering [interaktyvus], 2011, 6(112), 123-126 [žiūrėta 2020-10-10]. Prieiga per doi: 10.5755/J01.EEE.112.6.461
- GULDBRAND A. Reliability Engineering Methods for Distribution Systems. Influence of differences between cable system and overhead lines. Lund University, 2007 [žiūrėta 2020-05-02]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.lth.se/publications/Reports/LTH-IEA-7218.pdf>.
- HE J. et al., Application of Game Theory in Integrated Energy System Systems: A Review. in IEEE Access [interaktyvus], 2020, vol. 8, 93380-93397 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994133
- HERNANDO-GIL I., I. ILIE and S. Z. DJOKIC. Reliability planning of active distribution systems incorporating regulator requirements and network-reliability equivalents. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, vol. 10(1), pp. 93-106, [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0292
- HUGHES, M. How the Weibull Distribution Is Used in Reliability Engineering. April 18, 2019. [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per internetą: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-the-weibull-distribution-is-used-in-reliability-engineering/>
- HUSAIN M. J. A. S., et al. LOLP and LOLE Calculation for Smart Cities Power Plants. International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT) [interaktyvus], 2019, 1-6 [žiūrėta 2020-05-07]. Prieiga per doi: 10.1109/3ICT.2019.8910296
- YASSINE A., A. A. Nazari Shirehjini and S. Shirmohammadi. Smart Meters Big Data: Game Theoretic Model for Fair Data Sharing in Deregulated Smart Grids. IEEE Access [interaktyvus], 2015, vol. 3, 2743-2754 [žiūrėta 2020-05-07]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2015.2504503
- IEEE 1366TM. (2004). Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE Power Engineering Society Sponsored by the Transmission and Distribution Committee. USA: New York.
- IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE Standards Association [interaktyvus]. [žiūrėta 2020.07.02]. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6209381>.
- IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. IEEE [interaktyvus]. Accessed June 19, 2023 [žiūrėta 2023-01-05]. Prieiga per doi: 10.1109/IEEESTD.2001.94438
- IEEE GUIDE for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems. IEEE Std 1250-2018 (Revision of IEEE Std 1250-2011) [interaktyvus]. 16 Nov. 2018, 1-63, [žiūrėta 2020-04-07], Prieiga per doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8532376
- YINGLONG D., et al. A Distribution Network Identification of Cause of Line Loss Method Based on Markov Random Field. China International Conference on Electricity Distribution (CICED) [interaktyvus], 2018, 2599-2603 [žiūrėta 2020-05-07]. Prieiga per doi: 10.1109/CICED.2018.8592109
- YUAN Y., Y. et al. Reliability analysis of power distribution systems based on hybrid method into account of voltage sags. International Power Engineering Conference [interaktyvus], Singapore, 2005, Vol. 2, 945-949 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/IPEC.2005.207044

- YUAN, M. Y. LIU, R. LIU AND X. NIU. Monitoring and Analysis of Power Supply Reliability of Low Voltage Consumers. International Conference on Power System Technology [interaktyvus], Chongqing, 2006, 1-4 [žiūrėta 2012-12-20]. Prieiga per doi: 10.1109/ICPST.2006.321772
- YUQIN X., W. YINGCHAO. Reliability Evaluation for Distribution System with Distributed Generators. 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS) [interaktyvus], Beijing, China: IEEE, 2010, 1-5 [žiūrėta 2012-12-13]. Prieiga per doi: 10.1109/CRIS.2010.5617483
- JAECH, A., B. ZHANG, M. OSTENDORF AND D. S. KIRSCHEN. Real-Time Prediction of the Duration of Distribution System Outages. IEEE Transactions on Power Systems, Jan. 2019, vol. 34(1), 773-781 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per doi: 10.1109/TPWRS.2018.2860904
- JAMSHID, S. and M. ABRAR. Evaluation of Load Point and Customer Point Indices of a Distribution Generation System. 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) [interaktyvus]. 2020, 1-5 [žiūrėta 2022-06-20]. Prieiga per doi: 10.1109/REEPE49198.2020.9059194
- JIANPING, G. et al. Power supply reliability analysis and improvement measures of regional power grid. China International Conference on Electricity Distribution, Guangzhou, 2008, 1-7 [žiūrėta 2022-07-10]. Prieiga per doi: 10.1109/CICED.2008.5211657
- KAPOURCHALI M. HEIDARI, M. SEPEHRY, V. ARAVINTHAN. Fault Detector and Switch Placement in Cyber-Enabled Power Distribution Network. IEEE Transactions on Smart Grid [interaktyvus], March 2018, vol. 9(2), 980-992 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/TSG.2016.2573261
- KARIMZADEH M., A. EBRAHIMI, G. R. YOUSEFI. An improved method for hourly reliability ranking of distribution network zones. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering [interaktyvus], Rome, 2011, 1-4 [žiūrėta 2013-03-11]. Prieiga per doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874749
- KLEMENTAVIČIUS A. Aprūpinimo elektra patikimumo lygio techninė – ekonominė analizė, rekomendacijų dėl aprūpinimo elektra patikimumo teisinio reglamentavimo, įvertinant ES šalių patirtį, parengimas. Galutinė ataskaita. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2006
- KONSTANTINAVIČIŪTĖ I., et al. Energijos poreikių prognozavimo metodai. Kaunas: Technologija. 2019, p.104, ISBN 978-609-02-1657-6
- KORNATKA, M. Distribution of SAIDI and SAIFI indices and the saturation of the MV network with remotely controlled switches. 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2017.
- KUMAR, G., N. M. PINDORIYA. Outage management system for power distribution network. 2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG) [interaktyvus], 2014, 1-8 [žiūrėta 2020-04-07]. Prieiga per doi: 10.1109/ISEG.2014.7005598
- KUTJUNS, A., Krishans, Z. Method of transmission power networks reliability estimation. Riga Technical University. Institute of Physical Energetic Kronvalda boulevard. Latvia, 2007.
- LI D. F., Yin-Fang Ye. Interval-valued least square pre-nucleolus of interval-valued cooperative games and a simplified method. Operational Research, Springer, April 2018, vol. 18(1), 205-220.
- LI W., W. ZHAO, X. MOU. A technique for network modeling and reliability evaluation of complex radial distribution systems. IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB [interaktyvus], 2009, 1-5 [žiūrėta 2013-02-15]. Prieiga per doi: 10.1109/PES.2009.5275389
- LIETUVOS RESPUBLIKOS ELEKTROS ENERGETIKOS ĮSTATYMAS Lietuvos Respublikos Seimas. (2012). (Nr. XI-1919, 2012-01-17). [žiūrėta 2020-11-01]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.F57794B7899F/mxsJqfJzHX>.
- LIETUVOS RESPUBLIKOS ELEKTROS ENERGETIKOS ĮSTATYMAS. 2000 m. liepos 20 d. Nr. VIII-1881. Vilnius. [žiūrėta 2020-11-01]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.F57794B7899F>.
- LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS Įstatymas. 2002 gegužės 16 d. Nr. IX-884. [žiūrėta 2020-11-01]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.167899>
- LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS ministro įsakymas. Dėl elektros tinklų naudojimo taisyklių patvirtinimo. 2012 birželio 18 d., Nr. 1-116. Vilnius. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-08-20]. Prieiga per internetą: [122](https://e-</p>
</div>
<div data-bbox=)

- seimas.lrs.lt/portal/legalActPrint/lt?jfwid=32wf6nee&documentId=TAIS.428001&category=TAD.
- LIETUVOS RESPUBLIKOS ŪKIS. Elektros energijos persiuntimo patikimumo ir elektros energijos perdavimo, skirstymo bei tiekimo paslaugų kokybės reikalavimai. 2005 m. liepos 15d. Nr. 4-265. Vilnius. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-08-20]. Prieiga per internetą: [4-265 Dėl Elektros energijos persiuntimo patikimumo ir elektros energijos perdavimo, skirstymo bei tiek... \(lrs.lt\)](https://seimas.lrs.lt/portal/legalActPrint/lt?jfwid=32wf6nee&documentId=TAIS.428001&category=TAD)
- LIU H., Z. WANG, M. HAN. Reliability Analysis of Solenoid Valve Power Supply Based on Time-Varying Fault Rate. 4th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE) [interaktyvus], Hohhot, China, 2019, 154-1543 [žiūrėta 2020-09-20]. Prieiga per doi: 10.1109/ICMCCE48743.2019.00044
- LIU Huijia, Hanmei Hu, Jingguang Huang. A method of reliability evaluation for complex medium-voltage distribution system based on simplified network model and network-equivalent. 2008 China International Conference on Electricity Distribution [interaktyvus], Guangzhou, 2008, 1-6 [žiūrėta 2013-02-14]. Prieiga per doi: 10.1109/CICED.2008.5211798
- LIU Y., G. JIN, M. YANG, Z. YUAN. Fault classification and treatment mechanism of AC-DC hybrid distribution network by integrated considering reliability and economy. 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) [interaktyvus], Chengdu, China, 2020, 1507-1511 [žiūrėta 2019-06-13]. Prieiga per doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136299
- LIU, Y., et al. Reliability Evaluation of Load Points in Distribution Networks Considering Blackout Coefficient of Load Point. 9th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES) [interaktyvus], 2019, 1-6 [žiūrėta 2022-06-12]. Prieiga per doi: 10.1109/ICPES47639.2019.9105367
- LIU, N., et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers. IEEE Trans. Power System [interaktyvus], 2017, vol. 32(5), 3569-3583 [žiūrėta 2019-10-12]. Prieiga per doi: 10.1109/TPWRS.2017.2649558
- LR ENERGETIKOS MINISTRO įsakymas, Nr. 1-116. Dėl elektros tinklų naudojimo taisyklių patvirtinimo. 2012 m. birželio 18 d. Nr. 1-116, Vilnius. [interaktyvus]. [žiūrėta 2022-08-20]. Prieiga per internetą: <https://seimas.lrs.lt/portal/legalActPrint/lt?jfwid=32wf6nee&documentId=TAIS.428001&category=TAD>.
- LU Q., L. CHEN, S. MEI. Typical applications and prospects of game theory in power system. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering 34 [interaktyvus], October 15, 2014, 5009-17 [žiūrėta 2016-03-12]. Prieiga per doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.002
- MARNAY C. Microgrids and Heterogeneous Security, Quality, Reliability, and Availability. Power Conversion Conference [interaktyvus], Nagoya, 2007, 629-634 [žiūrėta 2012-12-12]., Prieiga per doi: 10.1109/PCCON.2007.373031
- MEI, S., W. WEI, F. LIU. On engineering game theory with its application in power systems. Control Theory and Technology 15 [interaktyvus], February 2017, no. 1, 1-12 [žiūrėta 2020-02-11]. Prieiga per doi: 10.1007/s11768-017-6186-y
- MOHAMMADI, M. A Game Theory Approach to Distribution System Reliability Improvement Based on Customer Requests. Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering [interaktyvus]. 2019, vol. 15(1), 1-13 [žiūrėta 2021-12-12]. Prieiga per internetą: <http://ijeee.iust.ac.ir/article-1-1270-en.pdf>.
- MOLOI K. B. T., A. F. Abe. Nnachi and J. A. Joraaan. Root Cause Analysis and Performance Enhancement For Power System Network: A Case Study. IEEE AFRICON [interaktyvus], Accra, Ghana, 2019, 1-5 [žiūrėta 2021-01-06]. Prieiga per doi: 10.1109/AFRICON46755.2019.9133913
- MONIS L., B. N. KUNJUMON. Guruprasad. Implementation of Maximum Flow Algorithm in an Undirected Network. Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology [interaktyvus], edited by V. Sridhar, M.C. Padma, and K.A. Radhakrishna Rao, 545:195-202. Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019. Prieiga per doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5802-9_18

- MONTOYA D. P., J. M. Ramirez. A minimal spanning tree algorithm for distribution networks configuration. IEEE Power and Energy Society General Meeting [interaktyvus], San Diego, CA, USA, 2012, 1-7 [žiūrėta 2014-02-17]. Prieiga per doi: 10.1109/PESGM.2012.6344718
- MORA F., et al. K-means algorithm and mixture distributions for locating faults in power systems. Electric Power Systems Research [interaktyvus], 2009, vol. 79 (5), 714-721 [žiūrėta 2013-01-17]. Prieiga per doi: 10.1016/j.epsr.2008.10.011
- NAHMAN J., D. PERIĆ. Path-set based optimal planning of new urban distribution networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems [interaktyvus], 2017, vol. 85, 42-49 [žiūrėta 2021-04-19]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijepes.2016.08.001
- NASH J., Non-cooperative games. Ann. Math., 1951, vol. 54(2), 286-295.
- NAVICKAS, A. Elektros energetikos sistemų patikimumas. Kanaus: Technologija, 2007.
- NEMATI H. M., et al. Network representation of meaningful patterns in electricity distribution grids. IEEE International Energy Conference (ENERGYCON) [interaktyvus], Leuven, Belgium, 2016, 1-6 [žiūrėta 2022-05-02]. Prieiga per doi: doi: 10.1109/ENERGYCON.2016.7513929
- OTTESSEN S., A. TOMASGARD, S.-E. FLETEN. Prosumer bidding and scheduling in electricity markets. Energy [interaktyvus]. Jan. 2016, vol. 94, 828-843 [žiūrėta 2022-02-01]. Prieiga per doi: doi: 10.1016/j.energy.2015.11.047
- PAROL M. et al. Reliability Analysis of MV Electric Distribution Networks Including Distributed Generation and ICT Infrastructure. Energies [interaktyvus], 2022, vol. 15, 5311 [žiūrėta 2022-07-24]. Prieiga per doi: 10.3390/en15145311
- PILGRIM, James. Insulation Systems and the Smart Grid [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2022-07-22]. Prieiga per ieee.org: <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/july-2019/insulation-systems-and-the-smart-grid>
- PILKAUSKAS, V. 2011. Procesų modeliavimas ir nuotolinis valdymas. Kaunas: KTU informatikos fakultetas. ISBN 978-609-433-067-4. [žiūrėta 2020-12-07]. Prieiga per internetą: http://www.esparama.lt/documents/10157/490675/Procesu_modeliavimas.pdf/4dc2f3a3-308f-41ab-a2fb-dcd98d14ef91
- POUDEL S., A. DUBEY. Critical Load Restoration Using Distributed Energy Resources for Resilient Power Distribution System. in IEEE Transactions on Power Systems [interaktyvus]. Jan. 2019, vol. 34(1), 52-63 [žiūrėta 2021-01-12]. Prieiga per doi: 10.1109/TPWRS.2018.2860256.
- PUŠKORIUS, S. (2009). Sprendimų priėmimo teorija. Operacijų tyrimų metodai. Vilnius: Mykolo Romerio universitetas.
- QAMBER, ISA S. Loss of Load Expectation Calculation for Power Plant. Conference: 2nd Smart Cities Symposium (SCS 2019) [interaktyvus]. January 2019. [žiūrėta 2020-05-07]. Prieiga per doi: 10.1049/cp.2019.0213
- SEKHAR P. C., R. A. Deshpande and V. Sankar. Evaluation and improvement of reliability indices of electrical power distribution system. National Power Systems Conference (NPSC) [interaktyvus], Bhubaneswar, India, 2016, 1-6 [žiūrėta 2022-04-12]. Prieiga per doi: doi: 10.1109/NPSC.2016.7858838
- SEPEHRY M., M. HEIDARI-KAPOURCHALI, A. BANAJIGER, V. ARAVINTHAN. A new algorithm for reliability evaluation of radial distribution networks. North American Power Symposium (NAPS) [interaktyvus]. Pullman, WA, 2014, 1-6 [žiūrėta 2015-03-12]. Prieiga per doi: doi: 10.1109/NAPS.2014.6965483
- SEPEHRY M., et al. A New Algorithm for Reliability Assessment of Distribution System Based on Reliability Network Equivalent Technique. IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) [interaktyvus]. Boise, ID, 2018, 1-5 [žiūrėta 2022-03-03]. Prieiga per doi: 10.1109/PMAPS.2018.8440226
- SINDARAVIČIUS, D., A. KAVOLYNAS. 10 kV skirstomųjų elektros tinklų rajono (N) elektros energijos tiekimo patikimumo tyrimas. Agroinžinerija ir energetika [interaktyvus]. 2019, 132-137 [žiūrėta 2020-04-07]. ISSN1392-8244_2019_N_24.PG_132-137. Prieiga per internetą: https://www.vdu.lt/cris/bitstream/20.500.12259/111391/1/ISSN1392-8244_2019_N_24.PG_132-137.pdf.

- SKALNY, P. An Application of Graph Theory in Marcov Chains Reliability Analysis. Statistics [interaktyvus], 2014 vol. 12(2). 154-159 [žiūrėta 2015-02-06]. Prieiga per internetą: 8eda90881db90d041830cb920d5adf4c0ea3.pdf (semanticscholar.org)
- SMITH J. M., G. R. PRICE. The logic of animal conflict. Nature [interaktyvus]. November 1973, vol. 246, no. 5427, 15-18 [žiūrėta 2021-01-12]. Prieiga per doi: 10.1038/246015a0
- SOUSA B. De O., Millar J., A. Pihkala, M. Lehtonen. Layered Reliability Assesment of a Realistic Urban Medium Voltage Network under Multiple Weather and Load Scenarios. 23rd International Conference. 15-18 June 2015, [žiūrėta 2016-10-10]. Prieiga per internetą: http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015_0731_final.pdf.
- STOJKOV M., S. NIKOLOVSKI, V. MIKULICIC. Estimation of electrical energy not supplied in reliability analysis of distribution networks. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.04CH37521) [interaktyvus]. Dubrovnik, Croatia, 2004, vol. 3, 967-970 [žiūrėta 2014-02-03]. Prieiga per doi: 10.1109/MELCON.2004.1348214
- SU Y. , et al. Explicit Formula Based Reliability Estimation Method for Distribution Feeder. IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia) [interaktyvus]. Chengdu, China, 2019, pp. 3305-3309 [žiūrėta 2021-01-12]. Prieiga per doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881294
- SUCITA, T., Y. Mulyadi, C. Tomotius. Reliability Evaluation of Power Distribution System with Reliability Index Assessment (RIA). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 384 [interaktyvus]. July 1, 2018, no. 1, 012072 [žiūrėta 2021-01-12]. Prieiga per doi: 10.1088/1757-899X/384/1/012072
- TAYLOR P. D., L. B. JONKER. Evolutionary stable strategies and game dynamics. Mathematical Biosciences 40 [interaktyvus]. July 1978, vol. 40(1-2), 145-156 [žiūrėta 2013-01-12]. Prieiga per doi: 10.1016/0025-5564(78)90077-9
- TALUKDAR B.K., B.C. DEKA. An Approach to Reliability, Availability and Maintainability Analysis of a Plug-In Electric Vehicle. World Electric Vehicle Journal [interaktyvus]. March 1, 2021, vol. 12(1), 34 [žiūrėta 2022-07-14]. Prieiga per <https://doi.org/10.3390/wevj12010034>
- TARYBOS DIREKTYVA 93/13/EEB dėl nesažiningų sąlygų sutartyse su vartotojais (OL L 95, 1993 4 21, p. 29). 1993 m. balandžio 5 d. Prieiga per internet: EUR-Lex - 31993L0013 - EN - EUR-Lex (europa.eu)
- TEN, C. W., T.YACHEN. Electric Power: Distribution Emergency Operation. Boca Raton: Taylor and Francis, a CRC title, part of the Taylor and Francis imprint, a member of the Taylor and Francis Group, the academic division of T&F Informa, plc, 2018.
- TERMINŲ BANKAS. [žiūrėta 2020-10-05] Prieiga per internetą: Terminų bankas (vlkk.lt).
- TISDELL J. G., S. R. HARRISON. Game Theory and Economic Modelling. Oxford, U.K.: Clarendon Press, 1990.
- TREBOLLE, D., T. GOMEZ. Reliability Options in Distribution Planning Using Distributes Generation. IEEE Latin America Transactions. September 2010. vol. 8(5), 557- 564.
- TRIPATHI, A., S. Sisodia. 2014. Comparative Study of Reliability Assessment Techniques for Composite Power System Planning & Applications. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). ISSN: 2248-9622. 8-13.
- VAINIENĖ, R. (2005). Ekonomikos terminų žodynas. psl. 328. ISBN 9789986164180. Vilnius: Tyto alba.
- VALSTYBINĖ ENERGETIKOS REGULIAVIMO TARYBA. Lietuvos Elektros energetikos sistemos patikimumo įvertinimo ataskaita už 2018 metus. 2019. Vilnius. [žiūrėta 2020-06-01]. Prieiga per internetą: <https://www.regula.lt/SiteAssets/elektra/LEESP%20ataskaita_2018.pdf.
- VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. Pažyma dėl minimalių elektros energijos persiuntimo patikimumo lygių nustatymo. 2012. Nr. O5-232. [žiūrėta 2020-06-01]. Prieiga per internetą:< http://www.vkekk.lt/SiteAssets/Puslapiai/OldPosedziai/2012-09-27/Patikimumo%20lygiai_pazyma.pdf.
- VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. Elektros energijos persiuntimo patikimumo ir paslaugų kokybės reikalavimai. Nauja redakcija nuo 2012 06 17. Patvirtinta 2009m. [žiūrėta 2020-06-01]. Prieiga per internetą: O3-134 Dėl Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos 2009 m. birželio 11 d. nutarimo Nr. O3-7... (Irs.lt)

- VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. Elektros energijos įrenginių prijungimo prie elektros tinklų įkainių nustatymo metodika. 2011 m., liepos 29 d. Nr. O3-235. Vilnius. [žiūrėta 2020-06-01]. Prieiga per internetą: O3-235 Dėl Elektros energijos įrenginių prijungimo prie elektros tinklų įkainių nustatymo metodikos patv... (lrs.lt)
- VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA. Lietuvos Elektros Energetikos sistemos patikimumo įvertinimo ataskaita už 2016 metus. 2017, Vilnius. [žiūrėta 2020-06-01]. Prieiga per internetą: VALSTYBINĖ KAINŲ IR ENERGETIKOS KONTROLĖS KOMISIJA (lrs.lt)
- VISUOTINĖ LIETUVIŲ ENCIKLOPEDIJA. [žiūrėta 2020-12-30]. Prieiga per internetą: <https://www.vle.lt/straipsnis/patikimumo-teorija/>
- VISUOTINĖ LIETUVIŲ ENCIKLOPEDIJA. [Interaktyvus]. [žiūrėta 2021-01-17]. Prieiga per internetą: <https://www.vle.lt/straipsnis/monte-carlo-metodas/>
- VIŠNIAKAS, I., SLIVINSKAS, K. Patikimumo teorija. Objektų kokybės vertinimo ir patikimumo skaičiavimų metodikos nurodymai. Vilnius: „Technika“, 2015 m. Prieiga per internetą: <http://elibrary.lt/resursai/Mokslai/VGTU/Leidiniai/Leidinukai/10.pdf>
- VOROPAI N., Z. STYCZYNSKI, I. SHUSHPANOV, K. SUSLOV. Mathematical model and topological method for reliability calculation of distribution networks. 2013 IEEE Grenoble Conference [interaktyvus], Grenoble, France, 2013, 1-4 [žiūrėta 2014-07-09]. Prieiga per doi: 10.1109/PTC.2013.6652129
- WADI M., W. ELMASRY, I. KUCUK, H. SHAHINZADEH. Sensitivity Reliability Analysis of Power Distribution Networks Using Fuzzy Logic. 12th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE) [interaktyvus]. Mashhad, Iran, Islamic Republic of, 2022, 190-195 [žiūrėta 2022-09-12]. Prieiga per doi: 10.1109/ICCKE57176.2022.9959978
- WANG L. The Fault Causes of Overhead Lines in Distribution Network. MATEC Web of Conferences 61, 2016. State Grid Nanchong Power Supply Information & Telecommunication Co. Ltd., Sichuan, China.
- WANG X., et al. Location of Single Phase to Ground Faults in Distribution Networks Based on Synchronous Transients. IEEE Transactions on Smart Grid PP [interaktyvus]. August 30, 2019, 1–1 [žiūrėta 2022-01-12]. Prieiga per doi: 10.1109/TSG.2019.2938667
- WEIQING M., et al. Reliability Analysis of Power Supply Based on Recursive Algorithm. IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science [interaktyvus]. Beijing, China: IEEE, 2014, 327–30 [žiūrėta 2016-05-06]. Prieiga per doi: <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2014.6933574>
- WISEMAN M. Conditional failure probability, reliability, and failure rate. October 2014. [žiūrėta 2020-04-07] Prieiga per internetą: <https://www.livingreliability.com/en/posts/conditional-failure-probability-reliability-and-failure-rate/>
- XIAOCHEN Z., B. Zhaohong, L. Gengfeng. Reliability Assessment of Distribution Networks with Distributed Generations Using Monte Carlo Method. Energy Procedia [interaktyvus]. 2011, vol. 12, 278-286 [žiūrėta 2013-03-01]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211018649>.
- XIE Y. H., C. S. WANG. Reliability Evaluation of Medium Voltage Distribution System Based of Feeder Partition Method. Proceedings of the Csee, 24.5, 35-39, 2004.
- XIONG L., et al. Reliability Analysis of Service Routing for a Power System Communication Network Based on MCS-RBD: RELIABILITY ANALYSIS OF SERVICE ROUTING BASED ON MCS-RBD. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering [interaktyvus]. November 2018, vol. 13(11), 1642–48 [žiūrėta 2017-08-08]. Prieiga per doi: 10.1002/tee.22781.
- XU, Y., WU Y. Reliability evaluation for distribution system with distributed generators. 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS) [interaktyvus], 2010. 1-5 [žiūrėta 2022-03-14]. Prieiga per doi: 10.1109/CRIS.2010.5617483.
- ZENG J. Z., et al. Game among multipl entities in electricity market with liberalization of power demand side market. Autom. Electr. Power Syst. [interaktyvus], Dec. 2017, vol. 41(24), 129-136 [žiūrėta 2019-04-01]. Prieiga per doi: doi: 10.7500/AEPS20170616005.
- ZHANGA X., Zhaohong Bieb, Gengfeng Lib. Reliability Assessment of Distribution Networks with Distributed Generations Using Monte Carlo Method. Energy Procedia; 2011, Volume 12, 278-

- ZHOU Z. Y. et al. Game-theoretical energy management for energy Internet with big data-based renewable power forecasting. IEEE Access [interaktyvus]. Feb. 2017, vol. 5, 5731-5746 [žiūrėta 2019-07-01]. Prieiga per doi: 10.1109/ACCESS.2017.2658952.
- ZHU, G., et al. Failure Distribution of Nuclear Power Station DC Power Supply Modules and Maintenance Benefit Analysis. International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE) [interaktyvus]. Zhangjiajie, China. 2019, 489-494 [žiūrėta 2020-10-10]. Prieiga per doi: 10.1109/QR2MSE46217.2019.9021266.
- ZULIANTI P., A. Lomi, E. Nurcahyo. Reliability Analysis of Distribution Network Based on Reliability Index Assessment Method: A Case Study. International Journal of Smart Grid and Sustainable Energy Technologies [interaktyvus]. December 17, 2019, vol. 1(1), 24–27 [žiūrėta 2019-09-17]. Prieiga per doi: 10.36040/ijsgset.v1i1.186

PRIEDAI

1 priedas. ES šalių elektros energijos trumpų ir ilgų nutraukimų vertinimas

Šalis	Trumpieji nutraukimai, Neapibrėžusios šalys	Trumpieji nutraukimai $T < 3 \text{ min}$	Trumpieji nutraukimai $T \leq 3 \text{ min}$	Trumpieji nutraukimai $1 \text{ sec} < T \leq 3 \text{ min}$	Trumpieji nutraukimai $1 \text{ sec} \leq T \leq 3 \text{ min}$	Ilgieji nutraukimai $T \geq 3 \text{ min}$
Austrija	+			+		
Belgija		+				
Bulgarija		+				
Kroatija	+					
Kipras						
Čekija				+		
Danija						
Estija	+					+
Suomija		+				+
Prancūzija					+	
Vokietija				+		+
Graikija	+		+			
Vengrija				+		
Airija	+					
Italija				+		
Latvija	+		+			+
Lietuva	+	+				+
Liuksemburgas			+			
Malta						
Nyderlandai	+					
Norvegija			+			
Lenkija					+	+
Portugalija	+				+	
Slovakija	+	+				
Slovėnija	+		+			
Rumunija				+		
Ispanija	+	+				
Švedija						+
Šveicarija					+	

Šaltinis: sudarytas autorės, remiantis Europos energetikos reguliavimo tarybos ataskaita, 2016.

2 priedas. IEEE 1366-2003 patikimumo rodiklių analizė

Rodiklio paskirtis	Rodiklis ir jo reikšmė	Paiškinimai
Ilgalaikio vartotojų nutraukimo trukmės rodikliai	SAIFI – (angl. <i>System average interruption frequency index</i>) sistemos nutraukimų vidutinio dažnumo rodiklis.	Jis nurodo, kaip dažnai vidutinis klientas patiria ilgalaikę elektros energijos pertraukimą iš anksto numatyto laikotarpio (IEEE Standard 1366, 2012) Šis rodiklis taikomas perdavimo ir skirstymo tinkluose.
	Skaiciavimo formulė	
	$\Sigma \frac{\text{Vartotojų, kuriems nutrauktas el.en.persiuntimas, skaičius}}{\text{Visi vartotojai, prijungti prie elektros tinklo}} = \frac{\Sigma N_i}{N_T} = \frac{CI}{N_T} [\text{Nutraukimų skaičius, vartotojui / m.}]$	
	SAIDI – (angl. <i>System average interruption duration index</i>) sistemos vidutinės nutraukimų trukmės rodiklis.	Rodiklis nusako vidutinę nutraukimų trukmę minutėmis vienam vartotojui, elektros tinkle. Remiantis IEEE (IEEE Standard 1366, 2012) standartais, šis rodiklis yra apibrėžiamas kaip visų nutraukimų skaičius vartotojams, kuriems buvo nutraukta elektros energija. Šis rodiklis yra naudojamas kaip našumo rodiklis, kuris naudojamas perjungimo strategijoms (Chee-Wooi Ten, Yachen Tang, 2018). Rodiklis skaičiuojamas įvertinant metinius rodiklius. Rodiklis naudojamas tiek perdavimo, tiek skirstomajame elektros tinkle.
	Skaiciavimo formulė	
	$\Sigma \frac{\text{Vartotojų, kuriems nutrauktas el.en.persiuntimas, skaičius} * \text{Nutraukimo trukmė (min)}}{\text{Vartotojų skaičius}} = \frac{\Sigma r_i N_i}{N_T} = \frac{\Sigma U_i N_i}{\Sigma N_i} = \frac{CMI}{N_T} [\text{min. vartotojui / m.}]$	
	CAIDI – vartotojų vidutinis nutraukimo trukmės rodiklis.	CAIDI rodiklis yra labai panašus į SAIFI rodiklį. Skirtumas yra tik tas, jog SAIFI rodiklio mažiausia galima vertė yra nulis, o CAIDI rodiklio mažiausia galima vertė – vienas.
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\Sigma \text{vartotojams nutrauktos el. en. trukmė}}{\text{Iš viso elektros nutraukimą patyrusių vartot. skaičius}} = \frac{\Sigma r_i \cdot N_i}{\Sigma N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} [\text{val.}]$	
	CAIFI – (angl. <i>Customer Average Interruption Frequency Index</i>) vartotojų vidutinis elektros tiekimo nutraukimo dažnio rodiklis.	

Rodiklio paskirtis	Rodiklis ir jo reikšmė	Paiškinimai
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Visų vartotojų, patyrusių nutraukimus, skaičius}}{\text{Maitinimo netekusių vartotojų skaičius}} = \frac{\sum N_i}{CN}$	
	CTAIDI – (angl. <i>Customer Total Average Interruption Duration Index</i>) visų klientų vidutinės nutraukimo trukmės rodiklis.	<i>Pažymima</i> – skaičiuojant CTAIDI kiekvienas vartotojas turi būti skaičiuojamas tik vieną kartą, neatsižvelgiant į pertraukimų skaičių per ataskaitinį laikotarpį.
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\sum \text{El.en. nutraukimo trukmė}}{\text{Vartotojai, kurie patyrė 1 ar daugiau nutraukimų}} = \frac{\sum r_i N_i}{CN} = \frac{CMI}{CN}$	
	CEMI_n – vartotojų, patyrusių elektros tiekimo nutraukimus, rodiklis.	<i>Pažymima</i> – šis rodiklis dažniausiai naudojamas skaičiavimų serijoje su <i>n</i> , kuris padidinamas nuo vienos didžiausios vertės prieaugio – kita verte.
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Vartotojai, kurie patiria bent } n \text{ nutraukimų}}{\text{Bendras aptarnautų vartotojų skaičius}} = \frac{CN_{(k>n)}}{N_T}$	
Apkrovos ir energijos suvartojimo rodikliai	CEMSMI_n – (angl. <i>Customer Experiencing Multiple Sustained and Momentary Interruptions</i>) vartotojai, patyrę ilgalaikius ir momentinius nutraukimus.	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Momentiniai ir ilgalaikiai nutraukimai}}{\text{Bendras aptarnaujamų vartotojų skaičius}} = \frac{CNT_{(k>n)}}{N_T}$	
	ASAI – (angl. <i>Average Service Availability Index</i>) vidutinis elektros tiekimo patikimumo rodiklis (tikimybinis).	<i>Pažymima</i> – 8760 val. ne keliamaisiais metais, 8784 val. keliamaisiais metais.
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{N_T \cdot (\text{Val./metus}) \cdot \sum r_i N_i}{N_T \cdot (\text{Val./metus})} = \frac{8760 \cdot 2692 - (\text{trukmė} \cdot \text{vartotojų sk.})}{8760 \cdot 2692} = \frac{8760 \cdot N_i - (U_i \cdot N_i)}{8760 \cdot \sum N_i}$	

Rodiklio paskirtis	Rodiklis ir jo reikšmė	Paiškinimai
	ASIFI – (angl. <i>Average System Interruption Frequency Index</i>) vidutinis sistemos nutraukimų dažnio rodiklis.	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Prijungtos el.en.netekusių vartotojų}}{\text{Tiekiamą galia}} = \frac{\sum L_i}{L_T}$	
	ASIDI – (angl. <i>Average System Interruption Duration Index</i>) vidutinis sistemos nutraukimų trukmės rodiklis.	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\sum r_i L_i}{L_T}$	
	AIT – (angl. <i>Average Interruption Time</i>) vidutinis nutraukimo laikas, kuris parodo vidutinę nutraukimų trukmę per ataskaitinį laikotarpį.	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Nepersiusios elektros energijos kiekis (MWh)}}{\text{persiusios elektros energijos kiekis (MWh) per ataskaitinį laikotarpį (dienų skaičius (min.))}}$	
	ASUI – (angl. <i>Average Service Unavailability Index</i>) vidutinis paslaugų netiekimo rodiklis (Dugan, McGranaghan, 1996).	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Nepatiektos elektros energijos kiekis valandomis}}{\text{Vartotojų el.en.valandinis poreikavimas}} = 1 - ASAI$	
	ACCI – (angl. <i>Average Customer Curtailment Index</i>) vidutinis klientų apribojimo rodiklis.	Šis rodiklis yra naudojamas stebėti nepatiektos energijos pasikeitimams tarp kalendorinių metų.

Rodiklio paskirtis	Rodiklis ir jo reikšmė	Paiškinimai
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Bendras energijos kiekis, kuris nebuvo tiekiamas}}{\text{Bendras vartotojų skaičius, kuris buvo paveiktas}} = \frac{\sum L_{vid.i} \cdot r_i}{CN}$	
	AENS – (angl. <i>Average Energy Not Supplied</i>) – vidutinė netiekta energija (Sekhar, 2016).	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\sum U_i L_i}{\sum N_i} [kWh/m., vartotojai]$	
Trumpalaikiai elektros nutraukimai	MAIFI – (angl. <i>Momentary average interruption frequency index</i>) – vidutinis elektros energijos persiuntimo trumpų nutraukimų dažnumo rodiklis (IEEE Std 1366, 2001).	Rodiklis yra orientuotas į trumpalaikių nutraukimų dažnį. Šis rodiklis yra labai panašus kaip ir SAIFI, bet jis labiau traktuoja kaip vidutinį momentinio elektros nutraukimo dažnį. MAIFI yra naudojamas trumpiems elektros energijos nutraukimams.
	Skaiciavimo formulė	
	$\sum \frac{\text{Vartot., kuriems el. en. persiuntimas nutrauktas dėl trumpo nutraukimo, skaičius}}{\text{Visų aptarnaujamų vartotojų skaičius}} = \frac{\sum IM_i \cdot N_{mi}}{N_T}$	
	MAIFI _E – (angl. <i>Momentary Event Average Interruption Frequency Index</i>) trumpalaikis vidutinis trumpų nutraukimų dažnio rodiklis (Ferreira, Bretas, 2010).	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Vartotojų, patyrusių nutraukimus, skaičius}}{\text{Visų aptarnaujamų vartotojų skaičius}} = \frac{\sum IM_E \cdot N_{mi}}{N_T}$	
	MAIFET _x – (angl. <i>Momentary Average Interruption Frequency Exceeding Threshold</i>) vidutinis trumpalaikis nutraukimo įvykis, viršijantis normą (Gohen, 2008).	Šis rodiklis nėra priimtas jokiuose reikalavimuose. Gohen (2008) teigia, kad tai paties pasiūlyti nauji rodikliai, kurie yra pateikiami, atsižvelgus į kai kurių standartinių rodiklių apribojimus. Naujų patikimumo rodiklių pagrindiniai tikslai: labai paprasta suprasti; išvengiama žinomų problemų, kurios atsiranda taikant standartinius rodiklius; suderinami su vartotojų patenkinimo lygiu; naudojami planuojant; valdant veiklą; naudinga reguliavimo ataskaitoms; tinkamas reguliuojant pagrindinius veiklos rezultatus.

Rodiklio paskirtis	Rodiklis ir jo reikšmė	Paiškinimai
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\sum_{\text{vartotojai}} \text{trumpalaikis vidutinis nutraukimų dažnis, viršijantis vidutinę nutraukimų trukmę } X}{\text{Visų aptarnaujamų vartotojų skaičius}} [\text{dažnis} / \text{metus}]$	
Akro- v os	LOLP – (angl. <i>Loss of Load Probability</i>) Tikėtinos apkrovos netekimas (Husain, Saleh, 2019).	
	LOLE – (angl. <i>Loss of Load Expectation</i>) laukiamos apkrovos praradimas (Husain, Saleh 2019).	
Galios kokybės rodikliai	SARFI_x – (angl. <i>System Average RMS Variation Frequency Index</i>) sistemos vidutinis RMS svyravimų dažnio rodiklis.	Patikimumas yra energijos kokybės poaibis, yra daug patikimumo sprendimų, kurie veikia arba kažkaip kitaip paveikia kitas galios kokybės sritis. Viršįtampių sukelti sunkumai priklauso nuo jų trukmės, taip pat, kaip ir SARFI _x rodiklis. Šis rodiklis negali suteikti pakankamai informacijos ir būti naudojamas visais atvejais.
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Vartotojai, kurie patyrė daugkartinius el. en. nutraukimus } x\%}{\text{Vartotojų skaičius}}$	
	SIARFI_x – (angl. <i>System Instantaneous Average RMS Variation Frequency Index</i>) sistemos vidutinis momentinis RMS nukrypimo dažnio rodiklis.	
	Skaiciavimo formulė	
	$\frac{\text{Vartotojai, kurie patyrė daugkartinius el. en. nutraukimus } x\%(0,5 - 30 \text{ s})}{\text{Vartotojų skaičius}}$	
	SMARFI_x – (angl. <i>System Momentary Average RMS Variation Frequency Index</i>) sistemos vidutinis momentinis RMS svyravimų dažnio rodiklis.	
	Skaiciavimo formulė	

Rodiklio paskirtis	Rodiklis ir jo reikšmė	Paaīškinimai
	<u>Vartotojai, kurie patyrė daugkartinius el.en.nutraukimus x%(30 – 3 s)</u> Vartotojų skaičius	
	STARFI _x – (angl. System Temporary Average RMS Variation Frequency Index) sistemos laikinas vidutinis RMS svyravimų dažnio rodiklis	
	Skaičiavimo formulė	
	<u>Vartotojai, kurie patyrė daugkartinius el.en.nutraukimus x%(3 – 60 s)</u> Vartotojų skaičius	
Nepatiektos elektros energijos kiekis	EENS – (angl. Expexted Energy not Supplied) – nepatiektas elektros energijos kiekis (Stojkov, ir kt., 2004).	
	Skaičiavimo formulė	
	$\sum U_i L_i$ [kWh/m.]	
	ENS – (angl. Average Energy not Supplied) vidutinis nepatiektos elektros energijos kiekis	
	Skaičiavimo formulė	
	$\sum L_{vid.i} \cdot r_i$	
	END – (angl. Energy not delivered) nepatiektos elektros energijos kiekis.	
	Skaičiavimo formulė	
Σ Nutraukimo metu nepatiekta elektros energija (MW) · Nutraukimo trukmė (val.)		
Paaīškinimai:		
čia CI – (angl. Customer Interruption) vartotojai, kuriems nutrauktas elektros energijos tiekimas;		
N _i – vartotojų skaičius mazge i;		
N _T – iš viso vartotojų, priskiriamų mazge, kuriame buvo tiekta elektros energija;		
CMI – (angl. Customer minutes of Interruption) vartotojui nutrauktos elektros energijos trukmė (minutėmis);		

Rodiklio paskirtis	Rodiklis ir jo reikšmė	Paaiškinimai
CN – bendras paveiktas vartotojų, per ataskaitinį laikotarpį patyrusių n ar daugiau ilgalaikių ir trumpalaikių nutraukimų, skaičius; U_i – vartotojų skaičius apkrovos mazge i ; L_i – vidutinė apkrovos paklausa, apkrovos mazge i ; $L_{vid,i}$ – vidutinė galia, prijungta prie tiekiamos galios mazgo i .		

3 priedas. Gedimų skaičius EST įrenginiuose 2012–2018 m., vnt.

Įtampa, kV	KL gedimų skaičius	OL gedimų skaičius	PAS gedimų skaičius	Viso gedimų
0,4	8781	75601	12462	96844
10	5049	7096	8956	21101
35	2	7	12	21
Iš viso 2018 m.	2743	10195	1445	14383
Iš viso 2017 m.	2603	9963	1577	14143
Iš viso 2016 m.	1852	9121	1444	12417
Iš viso 2015 m.	1602	9815	1301	12718
Iš viso 2014 m.	1593	11832	1608	15033
Iš viso 2013 m.	2181	14677	5816	22674
Iš viso 2012 m.	1258	17101	8239	22674

Šaltinis: Valstybinė energetikos reguliavimo taryba. Vilnius, 2019, 32 p.

4 priedas. VKEKK 2016–2019 m. ataskaitose pateiktų duomenų palyginimai

	2016 metų ataskaita		2018 metų ataskaita		2019 metų ataskaita
	Vartotojui elektros energijos vidutinė nutraukimo trukmė neturėtų būti ilgesnė nei 52,12 min./ metus		Vartotojui elektros energijos vidutinė nutraukimo trukmė neturėtų būti ilgesnė nei 52,12 min. / metus		Vartotojui elektros energijos vidutinė nutraukimo trukmė neturėtų būti ilgesnė nei 52,12 min. / metus
	Vartotojui tenkantis vidutinis nutraukimų skaičius neturi būti didesnis nei 0,93 karto/metus (išskyrus nutraukimu dėl „Force majeure“ ir išorinio poveikio priežasčių tik ilgiems ir neplanuotiems nutraukimams).		0,72 karto / metus		0,72 karto / metus
SAIDI faktinis	47,49 min./ vart.		42,00 min./ vart.		AB „Energijos skirstymo operatorius“ teikė VERT klaidingą informaciją, dėl to buvo nustatyti neteisingi elektros energijos persiuntimo patikimumo ir paslaugų kokybės rodikliai (SAIFI, SAIDI)
Vidutinė neplanuotų elektros energijos persiuntimo skirstomajame elektros tinkle nutraukimų trukmė dėl nenustatytų priežasčių	4,27 min.		1,52 min.		
Dėl operatoriui priskiriamos atsakomybės	43,66 min.		40,48 min.		
	SAIDI	SAIFI	SAIDI	SAIFI	
VĮ išorinis poveikis	18,2015	0,2209	24,98	0,336	
VĮ „Force majeure“	78,1385	0,2956	6,25	0,04	
Nenustatytos	1,811	0,045	1,37	0,029	
Priskiriama operatoriaus atsakomybei	35,4963	0,4654	34,03	0,555	
Faktinis SAIDI rodiklis	37,9598	0,5104	35,40	0,584	
SAIDI rodiklio minimalus rodiklis	52,12	0,72	52,12	0,72	
SAIFI faktinis rodiklis	0,62 karto / vart.		0,68 karto / vart.		
Dėl nenustatytų priežasčių	0,06 karto / vart.		0,03 karto / vart.		
Dėl operatoriui priskiriamų priežasčių	0,56 karto / vart.		0,65 karto / vart.		

5 priedas. Elektros tinklo duomenys

Apkrovos mazgai	Vartotojai, vnt.	Apkrova mazguose	Vidutinė apkrova vartotojui, kW
3	83	250	4
4	63	250	4
5	6	25	4
8	10	40	4
9	20	60	4
11	40	160	4
13	63	250	4
14	10	40	4
15	16	63	4
16	40	160	4
17	25	100	4
18	25	100	4
19	10	40	4
21	40	160	4
23	25	100	4
25	16	63	4
27	40	160	4
28	100	400	4
29	63	250	4
31	25	100	4
32	16	63	4
33	40	160	4
34	25	100	4
36	16	63	4
38	63	250	4
40	32	160	4
42	40	160	4
43	40	160	4
45	21	63	4
46	16	63	4
48	53	160	4
49	40	160	4
50	53	160	4
53	21	63	4
54	83	250	4
56	13	40	4
57	21	63	4
59	10	40	4
60	10	40	4
62	15	60	4
63	10	40	4
64	16	63	4
66	25	100	4
68	25	100	4
69	63	250	4

6 priedas. ES šalių SAIDI (min. / vartotojui) rodiklio planuotų ir neplanuotų nutraukimų vertinimas

Šalis	SAIDI	Metai														
		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Lietuva	Planuoti nutraukimai SAIDI (min/vart.)				134,05	125,70	80,75	74,77	74,03	160,90	157,93	179,23	212,76	217,45	194,18	173,04
Estija												84,93	86,84	65,76	69,32	73,75
Latvija							237	261	254	219	236	265	280	256	206	156
Lenkija							121	149,05	140,31	129,70	153,05	147,32	139,12	119,40	95,86	80,17
Rumunija								386,00	323,0	324	333	246	270	230	211	184
Norvegija												40,95	37,64	43,05	44,05	41,15
Švedija												16,93	18,87	18,17	16,66	18,80
Danija								5,37	4,94	4,74	4,70	5,05	4,65	4,24		
Portugalija		52,21	62,39	49,16	39,16	18,70	7,31	2,07	2,0	1,57	2,05	1,68	1,46	2,59	2,44	1,99
Lietuva	Neplanuoti SAIDI, įskaitant išimtinis įvykius (min. / vart.)				146,21	164,59	245,61	156,73	182,60	260,74	302,57	288,10	153,93	144,04	106,53	172,92
Estija												170,86	378,48	117,06	168,42	148,48
Latvija							269	236	424	1073	708	371	341	210	144	130
Lenkija							410	440,64	378,35	386,18	325,76	263,19	281,82	205,41	267,46	191,83
Rumunija													491,00	480,00	371,00	371,00
Norvegija												65,81	143,77	118,07	128,77	87,68
Švedija												88,18	151,94	83,73	118,15	75,62
Danija										15,05	17,04	14,75	15,86	11,59	15,86	15,14
Portugalija		467,98	406,18	217,79	198,73	243,19	136,00	162,67	280,03	276,04	131,43	94,15	258,80	94,75	75,03	75,74

7 priedas. Patikimumo rodiklių naudojimas skirtingose ES šalyse ilgiems elektros energijos nutraukimams

Šalis	Rodikliai skirstomajam elektros tinklui	Rodikliai perdavimo elektros tinklui	Bendriniai rodikliai, naudojami: skirstomajam ir perdavimo elektros tinklams	Teikiama reikšmė skaičiavimams atlikti
Austrija			SAIDI, SAIFI, ASIDI, ASIFI, CAIDI, (CML, ENS)	Transformatorinės ir vartotojų skaičius
Belgija	SAIDI		AIT	Vartotojų skaičius
Bulgarija			SAIDI, SAIFI	Vartotojų skaičius
Kroatija			SAIDI, SAIFI	
Kipras			SAIDI, SAIFI, priežastis, įtampa, procentiniai rodikliai, MVA praradimo priežastys, paveikti vartotojai, gedimai pagal tipą, gedimo vieta, gedimai pastotėje/ tiekтуve, vidutinė tiekimo atkūrimo trukmė, laiko intervalas, tiekimo atkūrimas	Paveiktos galios
Čekija	SAIDI, SAIFI, CAIDI (trukmės suma, padalinta iš pertraukimų skaičiaus)	ENS, AID		
Danija			SAIDI, SAIFI	Vertina pagal nutraukimo tipą, elektros tinklo kilo metražą, vartotojų skaičių.
Estija			SAIDI, SAIFI, kasmetiniai laiko nutraukimai, kai nebuvo tiekiama elektros energijos kiekvienam praradusiam elektros energiją vartotojui	Vartotojų skaičius
Suomija	1-70kV: T-SAIDI; T-SAIFI <1kV: nutraukimų skaičius	Kasmetinis nutraukimų laikas (110 kV) 110kV, 220 kV, 400 kV: nutraukimų		Pagal metines energijos sąnaudas

Šalis	Rodikliai skirstomajam elektros tinklui	Rodikliai perdavimo elektros tinklui	Bendriniai rodikliai, naudojami: skirstomajam ir perdavimo elektros tinklams	Teikiama reikšmė skaičiavimams atlikti
		trukmė ir nutraukimų skaičius.		
Prancūzija	SAIFI, SAIDI, nepatenkintų tiekimo kokybė vartotojų procentinis dydis. Priklauso nuo: planuotas/ neplanuotas nutraukimas; įtampos lygis; įvykio reikšmė (išskirtinis įvykis ar ne)			SAIDI (VĮ) – vartotojų skaičius SAIDI (AI) – kiek buvo paveikta apkrovos mazgų
Vokietija	SAIDI (ŽĮ), ASIDI (VĮ), SAIFI			ŽĮ – vartotojų skaičius VĮ – nominalios paveiktos galios
Graikija			SAIDI, SAIFI	Vartotojų skaičius
Vengrija	IEEE std. 1366-2003, SAIDI, SAIFI, CAIDI (tiek planuotų, tiek neplanuotų pertraukimų), ENS/ES	AIT; ENS/ES (Outage rate)		Vartotojų skaičius
Airija	Laikas, kai nebuvo tiekama elektros energija vartotojams			Skirstomajame elektros tinkle: CIs, CMLs, pateikia vienetinių klientų pagrindu. Perdavimo tinkle – galios
Italija	SAIDI, SAIFI, vartotojų skaičius, kuriems buvo nutraukta elektros energija daugiau nei 8 valandas	ENS, ENW, AIT, SAIFI		Skirstomajame elektros tinkle – vartotojų skaičius, kurie buvo paveikti. Perdavimo elektros tinklas – skaičius rodiklių, kurie priskiriami perdavimo vartotojams
Latvija			SAIDI, SAIFI, CAIDI, ENS	Vartotojų skaičius
Lietuva	SAIDI, SAIFI	ENS, AIT		Vartotojų skaičius
Liuksemburgas			SAIDI, SAIFI	Vartotojų skaičius

Šalis	Rodikliai skirstomajam elektros tinklui	Rodikliai perdavimo elektros tinklui	Bendriniai rodikliai, naudojami: skirstomajam ir perdavimo elektros tinklams	Teikiama reikšmė skaičiavimams atlikti
Malta	SAIDI, SAIFI, kiekvienam pertrūkiui, bet neklasifikuojami ar ilgi ar trumpi pertrūkimai.			Nutraukimams priskiriami nutrauktų transformatorių (kVA) galia.
Nyderlandai			SAIDI, SAIFI, CAIDI	Vartotojų skaičius
Norvegija			Atsižvelgiant į galutinius vartotojus (pagal įtampų lygius). SAIDI, SAIFI, CAIDI, CTAIDI, CAIFI, nutraukta galia dėl elektros energijos nutraukimo ir jo priežasties. Energija, kuri nebuvo tiekiama ENS	Vartotojų skaičius. ENS suma, suminė galia, kuri buvo nepatiekta
Lenkija	IEEE std. 1366-2003 SAIDI, SAIFI.	ENS, AIT. IEEE std. 1366-2003 SAIDI, SAIFI		Vartotojų skaičius
Portugalija	END, AIT, SAIDI, SAIFI	ENS, AIT, SAIFI, SARI		SAIFI, SAIDI svertiniai tiekimo, skirstymo mazgai Vartotojų skaičiaus END – instaliuotai galiai ENS (perdavimo tinklui)
Slovakija	N220 (vidutinės neplanuotų pertraukimų skaičius, susijęs su vienu transformatoriumi, įtampos lygyje)			TSO – transformatorių skaičius
Slovėnija	SAIDI, SAIFI, CAIDI, CAIFI	SAIDI, SAIFI (implicitiški: ENS, AIT, AIF, AID)		Vartotojų skaičiaus
Ispanija	TIEPI, NIEPI. Procentinė dalis TIEPI ir 80 proc. NIEPI			Paveikta galia

Šalis	Rodikliai skirstomajam elektros tinklui	Rodikliai perdavimo elektros tinklui	Bendriniai rodikliai, naudojami: skirstomajam ir perdavimo elektros tinklams	Teikiama reikšmė skaičiavimams atlikti
	zonuojamajame lygyje arba individualiame lygyje			
Švedija			Priklausomai nuo vartotojų lygio, kuriems buvo nutrauktas elektros energijos tiekimas. NIS – perduodama informacija. Perduota elektros energija, kokia įvykdyta žala; ASIDI, ASIFI, SAIDI, SAIFI, CEMI; patikrintas intervalas, kuris atspindi geriausiai ir blogiausiai aptarnautus klientus; klientų, kurie patiria skirtingą metinę pertraukimo trukmę, skaičius.	Vartotojų skaičius
Šveicarija	SAIDI, SAIFI	SAIDI, SAIFI, ENS		Vartotojų skaičius

Šaltinis: sudaryta autorės remiantis 6 CEER elektros energijos ir dujų tiekimo kokybės lyginamosios analizės ataskaita, 2016.

8 priedas. Lietuvos elektros skirstomojo tinklo duomenys

Eil. nr.	Mazgas Ni	Mazgas Nj	Tipas (KL – kabelinė linija, OL – oro linija)	Linijos/kabelio ilgis, m	Pralaidumas, kVA	Ijungtas (1)/išjungtas (0)
1	1	2	Šaltinis	-	99999	1
2	1	87	Šaltinis	-	99999	1
3	1	152	Šaltinis	-	99999	1
4	1	168	Šaltinis	-	99999	1
5	1	220	Šaltinis	-	99999	1
6	1	223	Šaltinis	-	99999	1
7	1	228	Šaltinis	-	99999	1
8	1	264	Šaltinis	-	99999	1
9	1	269	Šaltinis	-	99999	1
10	1	285	Šaltinis	-	99999	1
11	1	295	Šaltinis	-	99999	1
12	2	3	Jungtuvas	-	99999	1
13	3	4	Skyriklis	-	99999	1
14	4	5	KL Al 120 mm2	3110	5369	1
15	5	6	Skyriklis	-	99999	1
16	6	7	OL AS 50 mm2	1683	3637	1
17	7	8	OL AS 35 mm2	1561	3092	1
18	8	9	Skyriklis	-	99999	1
19	9	10	Skyriklis	-	99999	1
20	10	12	OL AS 70 mm2	542	4590	1
21	10	19	OL AS 35 mm2	2404	3092	1
22	11	24	OL AS 50 mm2	2381	3637	1
23	12	13	Skyriklis	-	99999	1
24	13	14	OL AS 50 mm2	3330	3637	1
25	14	15	Skyriklis	-	99999	1
26	14	17	Skyriklis	-	99999	1
27	15	16	KL Al 50 mm2	900	2858	1
28	17	18	KL Al 70 mm2	160	3637	1
29	19	11	Skyriklis	-	99999	1
30	19	20	Skyriklis	-	99999	1
31	19	22	Skyriklis	-	99999	1
32	20	21	KL Al 120 mm2	500	5369	1
33	22	23	KL Al 50 mm2	3600	2858	1
34	24	25	Skyriklis	-	99999	1
35	24	27	Skyriklis	-	99999	1
36	24	32	Skyriklis	-	99999	1
37	24	34	Skyriklis	-	99999	1
38	24	36	OL AS 50 mm2	1019	3637	1
39	24	37	Skyriklis	-	99999	1
40	25	26	KL Al 70 mm2	635	3637	1
41	27	28	KL Al 50 mm2	215	2858	1
42	28	29	Skyriklis	-	99999	1
43	29	30	Skyriklis	-	99999	1
44	30	31	KL Al 70 mm2	780	3637	1
45	32	33	KL Al 50 mm2	42	2858	1
46	34	35	KL Al 70 mm2	123	3637	1
47	36	296	Skyriklis	-	99999	1
48	37	38	KL Al 50 mm2	1464	2858	1
49	39	40	Skyriklis	-	99999	1
50	39	50	OL AS 50 mm2	857	3637	1
51	39	297	Skyriklis	-	99999	1
52	40	41	OL AS 50 mm2	6853	3637	1
53	41	42	Skyriklis	-	99999	1
54	41	44	Skyriklis	-	99999	1
55	41	46	OL AS 50 mm2	1523	3637	1
56	41	47	OL AS 35 mm2	447	3092	1
57	42	43	OL AS 35 mm2	1538	3092	1
58	44	45	OL AS 50 mm2	2233	3637	1

Eil. nr.	Mazgas Ni	Mazgas Nj	Tipas (KL – kabinēnē līnija, OL – oro līnija)	Linijas/kabeli o ilgis, m	Pralaidumas, kVA	Ijungtas (1)/ išjungtas (0)
59	46	171	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
60	47	48	Skyriklis	-	99999	1
61	48	49	OL AS 50 mm2	100	3637	1
62	50	51	Skyriklis	-	99999	1
63	50	53	OL AS 35 mm2	3242	3092	1
64	50	128	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
65	51	52	KL Al 70 mm2	275	3637	1
66	53	54	Skyriklis	-	99999	1
67	54	55	Skyriklis	-	99999	1
68	55	56	OL AS 35 mm2	870	3092	1
69	56	57	Skyriklis	-	99999	1
70	57	58	OL AS 50 mm2	100	3637	1
71	58	59	Skyriklis	-	99999	1
72	59	61	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
73	60	55	OL AS 50 mm2	2217	3637	1
74	61	62	OL AS 50 mm2	611	3637	1
75	62	63	OL AS 50 mm2	2413	3637	1
76	62	65	Skyriklis	-	99999	1
77	62	67	Skyriklis	-	99999	1
78	62	70	OL AS 70 mm2	2065	4590	1
79	63	64	Skyriklis	-	99999	1
80	64	69	OL AS 35 mm2	1233	3092	1
81	65	66	KL Al 50 mm2	600	2858	1
82	67	68	KL Al 50 mm2	77	2858	1
83	69	229	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
84	70	71	Skyriklis	-	99999	1
85	71	72	Skyriklis	-	99999	1
86	72	73	OL AS 50 mm2	3063	3637	1
87	73	74	Skyriklis	-	99999	1
88	73	126	Skyriklis	-	99999	1
89	74	75	OL AS 35 mm2	4069	3092	1
90	74	120	OL AS 35 mm2	160	3092	1
91	75	76	OL AS 25 mm2	2142	2460	1
92	75	77	Skyriklis	-	99999	1
93	77	92	OL AS 70 mm2	649	4590	1
94	77	94	OL AS 50 mm2	1150	3637	1
95	78	79	Skyriklis	-	99999	1
96	78	100	Skyriklis	-	99999	1
97	79	80	Skyriklis	-	99999	1
98	80	81	OL AS 50 mm2	3256	3637	1
99	80	90	Skyriklis	-	99999	1
100	81	82	Skyriklis	-	99999	1
101	82	83	Skyriklis	-	99999	1
102	83	84	OL AS 50 mm2	1940	3637	1
103	84	85	OL AS 50 mm2	4564	3637	1
104	84	88	Skyriklis	-	99999	1
105	85	86	Skyriklis	-	99999	1
106	86	87	Jungtuvas	-	99999	1
107	88	89	KL Al 50 mm2	445	2858	1
108	90	91	KL Al 50 mm2	27	2858	1
109	92	93	Skyriklis	-	99999	1
110	93	78	OL AS 70 mm2	2229	4590	1
111	94	95	Skyriklis	-	99999	1
112	94	98	Skyriklis	-	99999	1
113	95	96	KL Al 120 mm2	1258	5369	1
114	96	97	Skyriklis	-	99999	1
115	97	60	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
116	98	99	OL AS 50 mm2	2095	3637	1
117	100	101	OL AS 35 mm2	3691	3092	1

Eil. nr.	Mazgas Ni	Mazgas Nj	Tipas (KL – kabinė linija, OL – oro linija)	Linijos/kabelio ilgis, m	Pralaidumas, kVA	Ijungtas (1)/išjungtas (0)
118	101	102	Skyriklis	-	99999	1
119	101	103	Skyriklis	-	99999	1
120	101	106	OL AS 35 mm2	423	3092	1
121	102	104	KL Al 50 mm2	792	2858	1
122	103	105	KL Al 50 mm2	740	2858	1
123	106	107	Skyriklis	-	99999	1
124	107	108	KL Al 50 mm2	665	2858	1
125	108	109	Skyriklis	-	99999	1
126	108	110	Skyriklis	-	99999	1
127	109	112	KL Al 50 mm2	520	2858	1
128	110	111	KL Al 50 mm2	45	2858	1
129	112	113	Skyriklis	-	99999	1
130	113	114	Skyriklis	-	99999	1
131	114	115	KL Al 50 mm2	1900	2858	1
132	115	116	Skyriklis	-	99999	1
133	115	117	Skyriklis	-	99999	1
134	116	119	KL Al 70 mm2	1600	3637	1
135	117	118	KL Al 50 mm2	533	2858	1
136	120	121	Skyriklis	-	99999	1
137	121	122	KL Al 70 mm2	1725	3637	1
138	122	123	Skyriklis	-	99999	1
139	123	124	Skyriklis	-	99999	1
140	124	125	KL Al 70 mm2	315	3637	1
141	126	127	KL Al 50 mm2	1430	2858	1
142	128	129	OL AS 35 mm2	60	3092	1
143	128	130	OL AS 50 mm2	5470	3637	1
144	130	131	Skyriklis	-	99999	1
145	131	132	OL AS 35 mm2	1363	3092	1
146	132	133	OL AS 70 mm2	633	4590	1
147	132	157	OL AS 35 mm2	6600	3092	1
148	132	159	Skyriklis	-	99999	1
149	132	161	Skyriklis	-	99999	1
150	132	163	Skyriklis	-	99999	1
151	133	134	Skyriklis	-	99999	1
152	134	135	Skyriklis	-	99999	1
153	135	136	OL AS 50 mm2	742	3637	1
154	136	137	Skyriklis	-	99999	1
155	137	138	Skyriklis	-	99999	1
156	138	139	OL AS 50 mm2	1110	3637	1
157	139	140	Skyriklis	-	99999	1
158	140	141	Skyriklis	-	99999	1
159	141	142	OL AS 50 mm2	3331	3637	1
160	142	143	Skyriklis	-	99999	1
161	142	145	Skyriklis	-	99999	1
162	143	144	KL Al 50 mm2	402	2858	1
163	145	146	OL AS 50 mm2	142	3637	1
164	145	147	OL AS 70 mm2	1193	4590	1
165	146	148	Skyriklis	-	99999	1
166	147	84	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
167	148	149	OL AS 50 mm2	2856	3637	1
168	149	150	OL AS 50 mm2	1280	3637	1
169	149	153	Skyriklis	-	99999	1
170	150	151	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
171	151	152	Jungtuvas	-	99999	1
172	153	154	Skyriklis	-	99999	1
173	153	156	OL AS 50 mm2	3778	3637	1
174	154	155	KL Al 120 mm2	100	5369	1
175	157	158	Skyriklis	-	99999	1
176	158	165	OL AS 35 mm2	2717	3092	1

Eil. nr.	Mazgas Ni	Mazgas Nj	Tipas (KL – kabelinė linija, OL – oro linija)	Linijos/kabelio ilgis, m	Pralaidumas, kVA	Ijungtas (1)/išjungtas (0)
177	159	160	KL AI 120 mm2	1790	5369	1
178	161	162	OL AS 35 mm2	1642	3092	1
179	163	164	OL AS 16 mm2	3179	1923	1
180	165	166	OL AS 70 mm2	4537	4590	1
181	165	169	Skyriklis	-	99999	1
182	165	224	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
183	166	167	Skyriklis	-	99999	1
184	167	168	Jungtuvas	-	99999	1
185	169	170	OL AS 25 mm2	795	2460	1
186	171	172	Skyriklis	-	99999	1
187	172	173	Skyriklis	-	99999	1
188	173	174	OL AS 35 mm2	6596	3092	1
189	173	175	Skyriklis	-	99999	1
190	174	177	OL AS 50 mm2	1850	3637	1
191	174	203	Skyriklis	-	99999	1
192	175	176	KL AI 50 mm2	50	2858	1
193	177	178	Skyriklis	-	99999	1
194	178	179	Jungtuvas	-	99999	1
195	179	180	Skyriklis	-	99999	1
196	180	181	Skyriklis	-	99999	1
197	180	194	OL AS 50 mm2	793	3637	1
198	181	182	OL AS 50 mm2	4439	3637	1
199	182	183	Skyriklis	-	99999	1
200	183	184	OL AS 50 mm2	3632	3637	1
201	183	191	OL AS 35 mm2	1063	3092	1
202	184	185	Skyriklis	-	99999	1
203	185	186	OL AS 50 mm2	3904	3637	1
204	185	189	Skyriklis	-	99999	1
205	186	187	Skyriklis	-	99999	1
206	187	188	KL AI 70 mm2	960	3637	1
207	189	190	KL AI 50 mm2	760	2858	1
208	191	192	Skyriklis	-	99999	1
209	192	193	OL AS 35 mm2	3417	3092	1
210	194	195	Skyriklis	-	99999	1
211	195	196	OL AS 50 mm2	5326	3637	1
212	196	197	Skyriklis	-	99999	1
213	196	199	Skyriklis	-	99999	1
214	196	201	Skyriklis	-	99999	1
215	196	225	OL AS 50 mm2	107	3637	1
216	197	198	OL AS 35 mm2	3270	3092	1
217	199	200	KL AI 50 mm2	1961	2858	1
218	201	202	OL AS 25 mm2	1154	2460	1
219	203	204	OL AS 50 mm2	3350	3637	1
220	204	205	Skyriklis	-	99999	1
221	204	209	OL AS 35 mm2	3466	3092	1
222	205	206	OL AS 35 mm2	1511	3092	1
223	206	207	Skyriklis	-	99999	1
224	207	208	KL AI 50 mm2	1095	2858	1
225	209	210	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
226	209	221	OL AS 50 mm2	1270	3637	1
227	210	211	OL AS 35 mm2	3118	3092	1
228	210	216	OL AS 50 mm2	2728	3637	1
229	211	212	Skyriklis	-	99999	1
230	211	214	Skyriklis	-	99999	1
231	212	213	OL AS 50 mm2	500	3637	1
232	214	215	KL AI 50 mm2	1260	2858	1
233	216	217	Skyriklis	-	99999	1
234	216	219	Skyriklis	-	99999	1
235	217	218	KL AI 50 mm2	730	2858	1

Eil. nr.	Mazgas Ni	Mazgas Nj	Tipas (KL – kabelinė linija, OL – oro linija)	Linijos/kabelio ilgis, m	Pralaidumas, kVA	Ijungtas (1)/išjungtas (0)
236	219	220	Jungtuvas	-	99999	1
237	221	222	Skyriklis	-	99999	1
238	222	223	Jungtuvas	-	99999	1
239	224	204	OL AS 50 mm2	2867	3637	1
240	225	239	Skyriklis	-	99999	1
241	226	227	Skyriklis	-	99999	1
242	227	228	Jungtuvas	-	99999	1
243	229	230	Skyriklis	-	99999	1
244	230	231	Skyriklis	-	99999	1
245	231	232	OL AS 50 mm2	306	3637	1
246	232	233	Skyriklis	-	99999	1
247	233	234	OL AS 50 mm2	2558	3637	1
248	234	235	Skyriklis	-	99999	1
249	234	237	Skyriklis	-	99999	1
250	235	236	KL Al 50 mm2	657	2858	1
251	237	238	OL AS 50 mm2	1414	3637	1
252	238	240	Skyriklis	-	99999	1
253	239	226	OL AS 50 mm2	3776	3637	1
254	240	241	Skyriklis	-	99999	1
255	240	243	Skyriklis	-	99999	1
256	241	242	KL Al 120 mm2	295	5369	1
257	243	244	KL Al 120 mm2	162	5369	1
258	244	245	Skyriklis	-	99999	1
259	245	246	Skyriklis	-	99999	1
260	246	247	KL Al 95 mm2	113	4503	1
261	247	248	Skyriklis	-	99999	1
262	248	249	Skyriklis	-	99999	1
263	249	250	KL Al 120 mm2	224	5369	1
264	250	251	Skyriklis	-	99999	1
265	251	252	Skyriklis	-	99999	1
266	251	265	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
267	252	253	KL Al 120 mm2	302	5369	1
268	253	254	Skyriklis	-	99999	1
269	254	255	Skyriklis	-	99999	1
270	255	256	KL Al 95 mm2	612	4503	1
271	256	257	Skyriklis	-	99999	1
272	257	258	Skyriklis	-	99999	1
273	257	270	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
274	258	259	KL Al 120 mm2	172	5369	1
275	259	260	Skyriklis	-	99999	1
276	260	261	Skyriklis	-	99999	1
277	261	262	KL Al 120 mm2	29	5369	1
278	262	263	Skyriklis	-	99999	1
279	263	264	Jungtuvas	-	99999	1
280	265	266	Skyriklis	-	99999	1
281	266	267	KL Al 120 mm2	1750	5369	1
282	267	268	Skyriklis	-	99999	1
283	268	269	Jungtuvas	-	99999	1
284	270	271	KL Al 95 mm2	344	4503	1
285	271	272	Skyriklis	-	99999	1
286	272	273	Skyriklis	-	99999	1
287	273	274	KL Al 70 mm2	650	3637	1
288	274	275	Skyriklis	-	99999	1
289	275	276	Skyriklis	-	99999	1
290	276	277	KL Al 120 mm2	1160	5369	1
291	277	278	Skyriklis	-	99999	1
292	278	279	Skyriklis	-	99999	1
293	278	286	Skyriklis	-	99999	1
294	278	291	Išjungtas skyriklis	-	99999	0

Eil. nr.	Mazgas Ni	Mazgas Nj	Tipas (KL – kabelinė linija, OL – oro linija)	Linijos/kabelio ilgis, m	Pralaidumas, kVA	Ijungtas (1)/išjungtas (0)
295	279	280	KL Al 70 mm ²	442	3637	1
296	280	281	Skyriklis	-	99999	1
297	281	282	Skyriklis	-	99999	1
298	282	283	KL Al 120 mm ²	20	5369	1
299	283	284	Skyriklis	-	99999	1
300	284	285	Jungtuvas	-	99999	1
301	286	287	KL Al 120 mm ²	345	5369	1
302	287	288	Skyriklis	-	99999	1
303	288	289	Skyriklis	-	99999	1
304	289	290	KL Al 120 mm ²	370	5369	1
305	290	291	Išjungtas skyriklis	-	99999	0
306	291	292	Skyriklis	-	99999	1
307	292	293	KL Al 185 mm ²	549	7448	1
308	293	294	Skyriklis	-	99999	1
309	294	295	Jungtuvas	-	99999	1
310	296	297	Jungtuvas	-	99999	1

9 priedas. Lietuvos EST apkrovos mazgų parametrai

Mazgo nr.	Transformatorių įrengtoji galia, kVA	Mazgo nr.	Transformatorių įrengtoji galia, kVA	Mazgo nr.	Transformatorių įrengtoji galia, kVA	Mazgo nr.	Transformatorių įrengtoji galia, kVA
7	565	71	250	137	63	203	73
9	160	73	100	140	400	204	153
11	65	75	476	141	100	206	85
14	203	78	40	142	200	208	40
16	160	79	60	144	160	210	320
18	100	80	200	148	63	211	886
21	160	82	160	149	85	213	63
23	100	84	140	150	40	215	40
24	126	89	63	155	40	218	250
26	160	91	160	156	95	224	40
29	400	92	40	160	40	225	60
29	400	93	40	162	50	230	160
31	250	97	40	164	70	234	483
33	100	99	226	165	146	236	160
35	160	101	176	170	25	239	128
38	260	104	63	172	100	240	160
41	454	105	40	174	205	242	250
43	80	106	100	176	160	245	630
45	10	111	100	177	25	248	160
49	250	113	25	182	140	254	400
52	160	118	63	184	540	257	250
54	160	119	100	185	63	260	400
56	160	120	63	186	90	265	630
58	40	123	40	188	63	272	160
59	250	125	100	190	63	275	400
60	126	127	40	193	175	278	630
61	250	128	60	194	100	281	160
62	576	130	375	196	100	288	320
64	375	131	55	198	110		
66	25	132	200	200	40		
68	100	134	250	202	25		

CURRICULUM VITAE

Gintvilė Šimkonienė

gintvile.maslauskaite@ktu.lt

Išsimokslinimas:

Mokymosi institucija	Studijų programa	Įgyta kvalifikacija	Baigimo metai
Kauno technologijos universitetas	Elektros energetikos technologijos	Elektros inžinerijos bakalauras	2010 m.
Kauno technologijos universitetas	Elektros energetikos inžinerija	Elektros energijos magistras	2012 m.

Pedagoginio darbo patirtis:

Institucija	Pareigos	Metai
Kauno technologijos universitetas	Lektorė/ asistentė - laborantė	2012-09 – 2013-06
Lietuvos aukštoji jūreivystės mokykla	Asistentė	2013-09 – 2014-08-31
Lietuvos aukštoji jūreivystės mokykla	Lektorė	Nuo 2014-09
Lietuvos aukštoji jūreivystės mokykla	Studijų programos „Laivų elektros įrenginių eksploatavimas“ vadovė	Nuo 2021-08-31

Dėstomi studijų dalykai:

Koleginių studijų programos pavadinimas	Dėstomo dalyko pavadinimas
Laivų elektros įrangos eksploatavimas	Elektriniai matavimai
	Galios elektronikos pagrindai
	Elektros technologijos
	Laivų aukštos įtampos įranga
	Laivų elektros įrangos eksploatavimas
Baigiamieji darbai	Bakalauro baigiamasis darbas
	Baigiamasis kvalifikacinis egzaminas
Laivų energetinių įrenginių eksploatavimas	Elektrotechnika ir elektriniai matavimai
	Elektros mašinos
	Laivo elektros įranga ir jos eksploatavimas
	Aplinkosauga
Uosto ir laivybos įmonių finansai	Jūros aplinkos apsauga
Jūrų laivavedyba	Laivo elektros įranga
	Aplinkosauga
Jūrų transporto logistikos technologijos	Elektrotechnika
	Elektronika ir automatika
	Hidraulika
	Jūros aplinkos apsauga

Kursų programos pavadinimas
„Aukštos įtampos energijos sistemų saugaus eksploatavimo pradinio rengimo“ mokymo programa
„Aukštos įtampos energijos sistemų saugaus eksploatavimo specialaus rengimo“ mokymo programa
„Kvalifikuotų motoristų ruošimo“ mokymo programa
„Laivų elektros įrenginių eksploatavimo“ mokymo programa
„Laivo mašinų skyriaus išteklių valdymo“ mokymo programa

Praktinio darbo patirtis:

Institucija	Pareigos	Metai
Lietuvos aukštoji jūrėivystės mokykla, Jūrininkų mokymo centras	Vyr. instruktorė	2021-09-01
Lietuvos aukštoji jūrėivystės mokykla, Jūrininkų mokymo centras	Instruktorė	2015-10-02 – 2021-08-31
Kauno technologijos universitetas	Mainų koordinatore	2013-06-01 – 2013-08-20
Atsinaujinančiosios energetikos centras, KTU	Inžinierė	2012-06-01 – 2013-08-20
AB „Lesto“	Praktikantė	2010-02 – 2010-06

STRAIPSNIŲ IR MOKSLINIŲ KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS

Moksliniai straipsniai disertacijos tema:

Straipsniai konferencijų darbų leidiniuose Web of Science duomenų bazėje:

1. Šimkonienė, G., & Donėla, S. (2022). Evaluation of fault impact on reliability scenario of ship distribution network by statistical analysis. In *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. TRANSBALTICA XII: Transportation science and technology: proceedings of the 12th international conference TRANSBALTICA: September 16-17, 2021, Vilnius, Lithuania* (pp. 329-342). Cham: Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-030-94774-3_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94774-3_33) [Conference Proceedings Citation Index - Science (Web of Science); Conference Proceedings Citation Index - Social Science & Humanities (Web of Science); SpringerLink]

Kituose recenzuotuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai

1. Šimkonienė G., Jonaitis A., Gudžius S., Azzopardi B. Repair Time Factor Estimation of the Distribution Network and the Value of Reliability Indexes Analysis // In 13th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2022), 502–7. Hybrid Conference, Valletta, Malta: Institution of Engineering and Technology, 2022. Access through doi: 10.1049/icp.2023.0043.
2. Koivisto H., Melo G. D., Albayrak T., Šimkonienė, G., Ivanov, A. Maritime engine room simulator online – MERSol // In Maritime transport: MT'22: 9th international conference. Barcelona, June 27-28, 2022. Barselona: Universitat Politècnica de Catalunya. p. 1-10. Iniciativa Digital Politècnica. Prieiga per doi:10.5821/mt.11008
3. Šimkonienė G., Donėla, S. An overview and analysis of the vessel electrical network reliability and stability // In Maritime, transport and logistics science: conference proceedings: 20th international conference on transport science, ICTS 2022: 23-24 May, 2022, Portoroz, Slovenia Portoroz: Faculty of Maritime Studies and Transport. p. 366-372. Prieiga per: <https://icts.sdzp.org/wp/downloads2022/>
4. Šimkonienė G., Nutautienė R. Evaluation for the Interface Between Faults and Reliability of the Vessel's Electrical Distribution Network // Development of Social and Engineering Innovation in Maritime Education and Training to Ensure Shipping Safety. International scientific practical conference. Lithuania. 2023-03-23.
5. Azzopardi B, Gabdullin Y., Šimkonienė G. Impacts of electric vehicles on low-voltage distribution networks in Malta // 13th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2022), Hybrid Conference, Valletta, Malta, 7-9 November 2022, 551–553. Prieiga per: <https://doi.org/10.1049/icp.2023.0052>.
6. Adomavičius V, Šimkonienė G., Azzopardi B. Advantages of the microgrids based on a small-scale hydropower plants // 13th Mediterranean Conference

on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2022), Hybrid Conference, Valletta, Malta, 7-9 November 2022, p. 64–69. Prieiga per: <https://doi.org/10.1049/icp.2022.3304>.

7. Azzopardi B., Gabdullin Y., Šimkonienė G. . Photovoltaics and electrical vehicles mitigation on the low-voltage distribution network in Malta // 13th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2022), Hybrid Conference, Valletta, Malta, 7-9 November 2022, p. 554–556. Prieiga per: <https://doi.org/10.1049/icp.2023.0053>.

Mokslinės konferencijos:

Maslauskaite G. Reliability Modeling of Ships Distribution Network // International PhD Seminar in Maritime Science. Kalmar Maritime Academy, Kalmar, SWEDEN. 2015-06-10/12.

PADEKA

Nuoširdžiai dėkoju savo moksliniam vadovui doc. dr. Audriui Jonaičiui, padėjusiam vykdyti disertacinius tyrimus, už konsultacijas ir patarimus, skirtą laiką, kantrybę ir ramų toną, išlaikant kryptingą disertacijos rezultatų siekimą.

Reiškiu padėką prof. dr. Sauliui Gudžiui už nuolatinę komunikaciją ir motyvuojančius pokalbius, skatinimus nenuleisti rankų sunkiomis akimirkomis, skirtą laiką, pagalbą konsultuojant.

Esu labai dėkinga recenzentams habil. dr. Algirdui Kaliatkai, dr. Virginijai Radziukynui, dr. Sigitui Rimkevičiui už jų vertingą indėlį, pastabas, rekomendacijas, kurios labai padėjo tobulinti daktaro disertaciją.

Kauno technologijos universiteto doktorantūros mokyklos projektų vadovei Akvilei Mogenienei už suteiktas konsultacijas, patarimus ir pagalbą.

Kauno technologijos universiteto personalui už jų pagalbą ir tikslingus nukreipimus, redakcijas ir komentarus.

Brain Azzopardi už pietietišką kantrybę, pagalbą rašant mokslinius straipsnius, komunikaciją, galimybes atlikti mokslinius tyrimus Maltos saloje.

Dr. Vytautui Adomavičiui už norą kartu dirbti, norą pasidalinti savo patirtimi ir žiniomis.

Esu dėkinga savo tėveliams už gyvenimą, suteiktas gyvenimo galimybes tobulėti, mokytis, pamatyti pasaulį keliaujant. Dėkoju už pasitikėjimą, tikėjimą manimi ir mano gebėjimais, galimybėmis pasiekti užsibrėžtus tikslus. Už nuolatinį palaikymą ir skatinimą siekti mokslo aukštumų, dalyvavimą visuomeninėse veiklose. Už neapsakomą rūpestį ir meilę.

Vyrui Raimundui Šimkoniui ir vaikams už kantrybę laukiant mano dėmesio, nuolatinį tikėjimą mano pasirinkimais ir sprendimais. Neapsakoma padėka vyrui už ramybę ir nuotaikos palaikymą net ir sunkiausiomis akimirkomis, visokeriopą pagalbą, supratingumą, pavadavimą namų veikloje, prižiūrint mūsų du nuostabius vaikus Kerilę ir Martiną, galimybę pabaigti daktaro disertaciją.

Ir visiems žmonėms, kurie per visą tą kelią rašant daktaro disertaciją buvo su manimi, palaikė ir skatino niekada nepasiduoti.

SL 344. 2023-*,*,* leidyb. apsk. I. Tiražas 14 egz. Užsakymas 23-0131
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424
Kaunas