

LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

BENAS JOKŠAS

ENERGETIKOS SISTEMŲ YPATINGOS
SVARBOS INFRASTRUKTŪRŲ KRITIŠKUMO
VERTINIMAS

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

2015, Kaunas

Disertacija rengta 2010–2014 metais Lietuvos energetikos instituto Branduolinių įrenginių saugos laboratorijoje.

Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba 2011–2014.

Mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Juozas Augutis (Lietuvos energetikos institutas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T).

TURINYS

SAVOKOS	4
SUTARTINIŲ ŽYMĖJIMŲ SAŖAŠAS.....	5
ĮVADAS.....	8
1 ENERGETIKOS YPATINGOS SVARBOS INFRASTRUKTŪRŲ TYRIMŲ METODŲ APŽVALGA	12
1.1 Ypatingos svarbos infrastruktūros.....	12
1.2 Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūros vertinimo aspektai ir vertinimo metodų apžvalga.....	17
2 INFRASTRUKTŪROS ELEMENTŲ FUNKCIONALUMO IR KRITIŠKUMO VERTINIMO METODIKA	31
2.1 Infrastruktūros elemento kritiškumo vertinimas	32
2.2 Priimtino kritiškumo lygio nustatymas	37
2.3 Deterministinis energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis	39
2.4 Kritiškumo rizika (Rizikingumas).....	42
2.5 Tikimybinis energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis	43
2.6 Logistinės regresijos taikymas kritinių infrastruktūros elementų klasterizavimui	49
2.7 Energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo modeliai.....	52
2.8 Svarbos ir jautrumo analizė.....	70
3 AGREGUOTŲ LIETUVOS ENERGETIKOS SISTEMŲ KRITIŠKUMO TYRIMAS	75
3.1 Agreguotas Lietuvos energetikos sistemų modelis	75
3.2 Rezultatų analizė	80
3.3 Svarbos ir jautrumo analizės rezultatai.....	100
IŠVADOS.....	103
LITERATŪRA	105
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SAŖAŠAS	112
PRIEDAI	114

SĄVOKOS

Ypatingos svarbos infrastruktūros (YSI) yra apibrėžiamos, kaip valstybės turtas, sektorių sistemos, pvz., elektros energetikos sistemos, dujų/naftos sistemos, transporto sistemos, ryšių sistemos ir t. t., arba dalis sistemų, kurių veiklos sutrikdymas ar sunaikinimas darytų poveikį užtikrinant tos šalies energetinį saugumą, ekonominį stabilumą ir socialinę gerovę.

Infrastruktūros elementas – nebeskaidomas fizinis objektas, esantis infrastruktūros grandyje.

Infrastruktūros elemento kritiškumas – sugedusio/dirbtinai pašalinto infrastruktūros elemento poveikis galutiniams energijos vartotojų poreikiams užtikrinti.

Kritinis infrastruktūros elementas – infrastruktūros elementas, kurio kritiškumas galutinių energijos vartotojų poreikių užtikrinimo atžvilgiu yra didesnis už pasirinktą kritiškumo lygį τ (priimtina kritiškumo slenkstį).

Vartotojai – šilumos energijos vartotojai apibūdinami, kaip agreguoti miesto centralizuoto šilumos tiekimo sistemos vartotojai; elektros energijos vartotojai apibūdinami, kaip agreguoti šalies elektros sistemos vartotojai.

SUTARTINIŲ ŽYMĖJIMŲ SĄRAŠAS

Santrumpos

AB	– akcinė bendrovė
AE	– atominė elektrinė
AC	– kintamoji elektros srovė
CŠT	– centralizuotas šilumos tiekimas
DC	– nuolatinė elektros srovė
EK	– Europos Komisija (angl. <i>European Commission (EC)</i>)
EK JTC	– EK Jungtinių tyrimų centras (angl. <i>EC Joint Research Centre (EC JRC)</i>)
ES	– Europos Sąjunga
KCB	– kombinuotojo ciklo blokas
LE	– Lietuvos elektrinė
LEI	– Lietuvos energetikos institutas
LR	– Lietuvos Respublika
PEI	– pirminės energijos išteklių
SGD	– suskystintos gamtinės dujos
SGDT	– suskystintų gamtinių dujų terminalas
TE	– termofikacinė elektrinė
VDU	– Vytauto Didžiojo universitetas
YSI	– ypatingos svarbos infrastruktūra
YSIO	– ypatingos svarbos infrastruktūros objektas
ESI	– Europos ypatingos svarbos infrastruktūros objektas
NIPP	– Nacionalinė infrastruktūros apsaugos programa (angl. <i>The National Infrastructure Protection Plan</i>)
SCADA	– duomenų surinkimo, stebėjimo, kontrolės ir valdymo programinė sistema (angl. <i>supervisory control and data acquisition</i>)
ISM	– interpretacinių struktūrų modeliavimas
IEEE	– testuojamos elektros sistemos

Žymėjimai

α_i	– i -ojo elemento svertinis koeficientas
\mathcal{B}	– grafo briaunų aibė
$\beta_i(t)$	– i -ojo vartotojo svorio koeficientas
\tilde{b}_i	– Logistinės regresijos modelio koeficiento įvertis
b_a	– svorinis koeficientas, nurodantis tikslo funkcijų prioritetų tvarką
$c^k(t)$	– k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumas
\mathcal{C}	– kritiškumų aibė
$\tilde{\mathcal{C}}_\tau$	– τ kritiškumo lygio kritinių elementų aibė
\mathcal{C}_τ	– τ lygio kritiškumo intervalas

C_{τ}^{Log}	– τ lygio kritiškumą turintys infrastruktūros elementai, atrinkti logistinės regresijos metodu
cp	– šilumnešio specifinė šiluma (kJ/(kg·°C))
\bar{c}	– vidutinis sistemų kritiškumo lygis
$D_{ij}(t)$	– laikotarpiu t i -ojo elemento produkcijos poreikio kiekis j -ajam elementui
D	– leistinoji sprendinių sritis, nusakyta nelygybiniais ir lygybiniais apribojimais
d	– vamzdžio skersmuo (mm)
d_a^+, d_a^-	– nukrypimai nuo tikslo funkcijos
D_j^{el}	– vartotojų viršūnės poreikis (MW)
$f_i^k(t)$	– i -ojo elemento funkcionalumo įvertinimas
$f(t)$	– gedimų dažnio tikimybės tankio funkcija
f_j	– naudojamo kuro kiekis gaminant energiją (tne)
f_j^{non-TR}	– kuro sunaudoto atskirai gaminant naudingą šilumos energiją, kiekis (tne)
GQ_j	– j -ojo vamzdžio praleidžiamas srautas (mln. m ³ /val.)
i, j, k, l	– sistemos elementų indeksai
\mathcal{K}	– energetikos sistemų infrastruktūros elementų aibė
κ	– vidutinis sezoniškumo koeficientas
L	– dujotiekio vamzdžio ilgis (km)
$L(\cdot)$	– didžiausio tikėtinumo funkcija
M	– šilumnešio srautas (kg/s)
N_{MC}	– Monte–Karlo iteracijų skaičiaus įvertis
OQ_j	– j -ojo vamzdžio praleidžiamas srautas (milijonai m ³ /val – mm ³ /val)
P_j^*	– įrengtoji elektrinė galia (MW)
p	– tikimybė
p_j	– bendras TE pagamintas elektros energijos kiekis (MWh)
P_i	– generavimo viršūnės galia (MW)
P_{in}	– vamzdžio padavimo slėgis (Bar)
P_{out}	– vamzdžio išėjimo slėgis (Bar)
$P_i^{el\min}, P_i^{el\max}$	– i -osios elektros generavimo technologijos bloko minimali ir maksimali generuojama elektros energija (MW)
r_j	– j -ojo elemento patikimumo rodiklis
$rc^k(t)$	– k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumo rizika
$S_{ij}(t)$	– laikotarpiu t galimas i -ojo elemento produkcijos kiekio tiekimas j -ajam elementui
$S_i^k(t)$	– i -ojo vartotojo gaunamos energijos kiekis (MWh) per laiko vienetą sistemoje išjungus k -ąjį elementą laikotarpiu t
SG	– savitasis dujų sunkis
s	– dujotiekio sistemos importo viršūnės
$s_a(\cdot)$	– tikslo funkcijos
s_a^0	– siekiama tikslo funkcijos reikšmė

$TechA_{ij}(t)$	– laiko momentu t i -ojo elemento gebėjimas patenkinti j -ojo elemento poreikį
t	– laiko intervalas
τ	– kritiškumo lygis
$V_i(t)$	– i -ojo vartotojo energijos poreikis (MWh) per laiko vienetą momentu t
\mathcal{V}	– viršūnių aibė
z_k	– infrastruktūros elementas
x_j	– priskiriamas šilumos energijos kiekis gamybai j -ajai šilumos gamybos technologijai
x_0	– dujotiekio vamzdyno jungtys, kuriomis yra tiekiamas gamtinių dujų srautas į sistemą
Y_i	– pseudo kintamasis
u_k	– k -osios linijos pralaidumas (MW)
$Q(t)$	– netaisomo infrastruktūros elemento gedimo tikimybė
$q^k(t)$	– k -ojo elemento gedimo tikimybė
q_i	– bendras TE pagamintos šilumos energijos kiekis (MWh)
q_j^*	– įrengtoji šiluminė galia (MW)
W	– leistinoji sprendinių sritis nusakyta nelygybiniais ir lygybiniais apribojimais
ρ	– šilumnešio tankis (kg/m^3)
$\lambda(t)$	– gedimų tikimybės sąlyginis tankis tam tikru laiko momentu t
σ	– standartinis nuokrypis
σ_i	– šilumos gamybos santykio koeficientas
$\bar{\xi}_l$	– l -osios Monte-Karlo iteracijos metu sugedusių infrastruktūros elementų aibė
χ^2	– Chi-kvadratu skirstinys
η_{th}	– naudingumo koeficientas, kai pirminė energija paverčiama šilumos energija naudojant pagrindinį kurą
η'_{el}	– naudingumo koeficientas, kai pirminė energija paverčiama elektros energija naudojant alternatyvų kurą
η'_{th}	– naudingumo koeficientas, kai pirminė energija paverčiama šilumos energija naudojant alternatyvų kurą
η_j^{TE}	– bendras TE naudingumo koeficientas
η	– naudingumo koeficientas
γ	– vamzdžių sienelių šiurkštumas
λ_0	– nusistovėjusio gedimo intensyvumo vertė

IVADAS

Šalies nacionalinis ir ekonominis saugumas yra glaudžiai susiję su funkcionavimu efektyvių infrastruktūrų, kurios atitinkamais tarpusavio sąryšiais priklauso vienos nuo kitų tiek regioniniu, tiek visos valstybės mastu. Ypatingos svarbos infrastruktūros (YSI) objektai yra apibrėžiami kaip valstybės sektorių sistemos (elementai), pvz., elektros energetikos, dujų/naftos, transporto, ryšių ir t. t. sistemos, kurios užtikrina tos šalies teritorinį vientisumą, energetinį saugumą ir ekonominį stabilumą. Kadangi beveik visos šalies ekonomikos sritys (pramonė, transportas, žemės ūkis ir kt.) ir socialinė raida tiesiogiai arba netiesiogiai priklauso nuo darnaus energijos išteklių importo, tiekimo, gamybos ir eksporto, todėl vis daugiau dėmesio skiriama valstybės energetikos ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsaugos problemoms. Neįmanoma užtikrinti ekonominės, socialinės plėtros ar priimtino politinio energijos pusiausvyros lygio, kai šalies energetikos infrastruktūros yra pažeidžiamos ar rizikingos, kurių funkcionalumo sutrikimas arba sutrikdymas keltų pavojų ar padarytų žalos nacionaliniam saugumui. Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo ir apsaugos užtikrinimo klausimai tapo vienais aktualiausių tiek didžiosioms, tiek mažosioms pasaulio valstybėms. Analizuojant šalies energetikos ypatingos svarbos infrastruktūras svarbu įvertinti infrastruktūrų elementų tarpusavio priklausomumą ir kritiškumą atskirų sistemų bei šalies atžvilgiu. Toks įvertinimas yra svarbus, siekiant nustatyti infrastruktūros vietas, kurių patikimumą arba/ir saugumą reikėtų padidinti (užtikrinti). Todėl energetikos ypatingos svarbos infrastruktūros apibūdinamos kaip kompleksinės tinklinės sistemos, kur atskirų sistemų elementai sujungti (tarpusavio sąryšiais) į vieną bendrą tinklinę sistemą (1.1 pav.).

Europos Komisijos (EK) parengtoje Žaliojoje knygoje (angl. green paper) „*Europos programa dėl ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsaugos*“ (Europos Komisija, 2005) pateikiamas bendras orientacinis ypatingos svarbos infrastruktūrų sąrašas ir nurodymai šalims narėms dėl ypatingos svarbos infrastruktūrų objektų palyginimo ir prioritetų paskyrimo.

Lietuva, kaip ir kitos Europos Sąjungos (ES) šalys, ėmėsi nacionalinės infrastruktūros vertinimo paskelbdama Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2010 m. birželio 7 d. nutarimą Nr. 717 „Dėl objektų pripažinimo valstybinės reikšmės objektais tvarkos aprašo patvirtinimo“. Lietuvoje NATO „*Energetinio saugumo kompetencijos centras*“ taip pat vykdo veiklą energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų ir energetinio saugumo vertinimo tematikomis.

Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo srityje atlikta nemažai mokslinių tyrimų, tačiau dar nėra visuotinai priimtų kriterijų ar metodikų, kurios leistų kiekybiškai įvertinti šalies energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumą. Įvairių valstybių atliktuose moksliniuose tyrimuose taikomi atskiri (skirtingi) vertinimo metodai, tačiau daugelio tokių tyrimų rezultatai ir medžiaga yra konfidenciali, neskelbtina informacija, susijusi su ypatingos svarbos infrastruktūros objektų vertinimu ir apsauga. Iš laisvai prieinamų mokslinių tyrimų publikacijų, kuriose dažniausiai yra pristatomi vertinimo metodai hipotetinėms sistemoms, būtų galima suformuluoti tokias energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo

tematikas:

- Infrastruktūrų tarpusavio sąryšių modeliavimas ir vertinimas;
- Infrastruktūrų sistemų rizikos analizė;
- Kritiškų infrastruktūrų nustatymas ir vertinimas;
- Sistemų infrastruktūrų kritinių elementų nustatymas ir vertinimas.

Vienas pagrindinių tikslų vertinant energetikos ypatingos svarbos infrastruktūras – infrastruktūrų kritinių elementų nustatymas (identifikavimas), atsižvelgiant į įvairius vertinimo kriterijus, tokius kaip: tarpusavio sąryšius sistemose, technines sistemų infrastruktūrų elementų charakteristikas (pajėgumas, patikimumas ir t. t.) ir jų funkcionalumo priklausomumus, taip pat poveikio įtaką šalies ar sistemos atžvilgiu ir t. t.

Būtina sudaryti energetikos infrastruktūrų kritiškų elementų nustatymo modelius, kurie leistų identifikuoti kritinius šalies energetikos sistemų infrastruktūrų elementus ir jų grupes, įvertinti šių elementų ar grupių įtaką vartotojams (vartotojas taip pat gali būti apibrėžiamas, kaip skirtingos energetikos sektoriaus sistemos).

Šių elementų ar jų grupių kritiškumo vertinimas turi būti atliekamas vertinant integralią energetikos sistemų visumą ir atsižvelgiant į šių sistemų elementų atsitiktinį darbą. Toks sudarytas vertinimo modelis leistų įvertinti šalies energetikos infrastruktūrų kritiškumą; palyginti įvairių energetikos sektoriaus plėtros projektų įtaką šalies energetikos infrastruktūros vientisumui ir funkcionalumui; identifikuotų energetikos infrastruktūrų kritinius elementus, atsižvelgiant į realios sistemos funkcionavimą (darbą), bei palyginti skirtingų šalių energetikos infrastruktūrų kritiškumą.

Darbo aktualumas. Siekiant užtikrinti šalies nacionalinį bei ekonominį saugumą ir plėtrą yra svarbu užtikrinti energetikos infrastruktūrų darbo vientisumą ir funkcionalumą.

Kadangi šalies pramonės veiklos raida, esminių visuomenės funkcijų užtikrinimas, saugumas bei ekonominės ir socialinės gerovės palaikymas labai priklauso nuo energetikos sistemų patikimo (sklandaus) funkcionavimo, tai infrastruktūros elementų vertinimas ypač aktualus tokioms šalims, kaip Lietuva, kuri didžiąją dalį energijos išteklių importuoja iš vienos šalies.

Daugelyje esamų energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo modelių taikomi atskiri pažeidžiamumo ar rizikos analizės metodai. Pastarieji geriausiu atveju yra deterministiniai modeliai, nagrinėjantys vienos ar kelių infrastruktūrų poveikį tik fragmentiškai. Kiti vertinimo modeliai analizuoja tik infrastruktūrų tarpusavio sąryšius. Todėl, vertinant šalies energetikos infrastruktūrų kritiškumą, būtina ne tik įvertinti infrastruktūrų atskirų elementų techninius rodiklius, bet ir atsižvelgti į integralią energetikos sistemų visumą, bei jose esančius funkcinius priklausomumus ir įtaką vartotojams. Tai leistų įvertinti šalies energetikos infrastruktūrų kritiškumą daugeliu aspektų vienu metu (apjungiant energetikos sistemų rizikos vertinimo, optimizacinius modeliavimo ir funkcionalumo vertinimo metodus).

Darbo aktualumą pabrėžia ir tai, kad ES šalys narės įpareigtos atlikti kritiškumo įvertinimą ir užtikrinti ypatingos svarbos infrastruktūrų objektų (YSIO)

apsaugą pagal priimtą EK Tarybos direktyvą 2008/114/EC dėl „*Europos ypatingos svarbos infrastruktūros objektų nustatymo ir priskyrimo jiems bei būtinybės gerinti jų apsaugą vertinimo*“. EK tarybos direktyva yra viena pirmaujančių pasaulio programų, apibrėžiančių svarbiausias sritis, kuriose turi būti sutelktos visos pastangos infrastruktūrų prevencijai ir apsaugai. Ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo metodų kūrimas ir plėtojimas yra įtrauktas į Horizon2020 kryptis. Lietuvoje NATO „*Energetinio saugumo kompetencijos centras*“ taip pat vykdo veiklą energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo ir apsaugos užtikrinimo srityje. Todėl disertacinio darbo tema yra aktuali tiek praktine, tiek moksline prasme.

Darbo tikslas. Sukurti energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo tyrimo metodiką ir iširti Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumą.

Darbo uždaviniai. Darbo tikslui pasiekti suformuluoti uždaviniai:

1. Sukurti metodiką energetikos sistemų infrastruktūros funkcionalumui ir kritiškumui matuoti.
2. Sudaryti energetikos sistemų infrastruktūros funkcionavimo ir kritiškumo įvertinimo matematinį modelį.
3. Pritaikyti sukurtą vertinimo metodiką Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumui įvertinti.
4. Įvertinti energetikos sistemų naujų infrastruktūros projektų įtaką energetikos sistemų kritiškumui.

Mokslinis darbo naujumas. Disertaciniame darbe sukurta energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo metodika, kurioje pirmą kartą atsižvelgiama į sistemų elementų tarpusavio sąryšius, patikimumą, riziką ir visų sistemų atsitiktinį darbą. Kritiškumo vertinimas atliekamas vartotojų atžvilgiu. Ši metodika leidžia išsamiau nustatyti mišrių energetikos sistemų kritinius elementus ir jų grupes, kurie energetikos sistemoms galutinių energijos vartotojų atžvilgiu turi didžiausią kritiškumą.

Naudojant logistinę regresiją sukurtas metodas, leidžiantis identifikuoti energetikos sistemų infrastruktūros elementus ar jų grupes ir nustatyti tikimybes, su kuriomis šių elementų kritiškumas patenka į nustatytus intervalus.

Darbo rezultatai papildė ypatingos svarbos infrastruktūrų (energetikos sistemų) vertinimo bei modeliavimo teoriją naujais tikimybiniais kritiškumo vertinimo ir infrastruktūros elementų klasterizavimo metodais, pagal jų įtaką infrastruktūrų darbui.

Praktinė darbo vertė. Atliktų mokslinių tyrimų rezultatai leidžia įvertinti energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumą ir palyginti įvairių energetikos plėtros scenarijų įtaką infrastruktūros kritiškumui. Tai leidžia nustatyti energetikos infrastruktūrų didžiausią kritiškumą turinčius elementus ar jų grupes bei jų sukeltus trikdžių procesus energetikos sistemose. Naudojantis gautais rezultatais įvertintas Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumas, nustatytos kritiškiausių elementų grupės bei įvertinta dujų sistemos plėtros scenarijų įtaka energetikos sistemų kritiškumui. Gauti rezultatai prisidės prie Lietuvos įsipareigojimų įgyvendinant ES direktyvą 2008/114/EC.

Ginamieji disertacijos teiginiai:

- Sukurta energetikos sistemų ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimo metodika leidžia nustatyti kritiškiausius sistemų elementus pagal jų įtaką energijos vartotojų poreikiams tenkinti, atsižvelgiant į visų sistemų atsitiktinį darbą.
- Energetikos sistemų elementų patikimumas turi įtakos atskirų elementų ir jų grupių kritiškumui.
- Infrastruktūros elementų ar jų grupių kritiškumą tikimybiniam pasiskirstymui įvertinti tinka logistinės regresijos modelis.
- Papildomos gamtinių dujų tiekimo sistemos jungtys sumažina tiek elektros, tiek centralizuoto šilumos tiekimo sistemų kritiškumą.

Darbo aprobavimas. Disertacinio darbo tema paskelbta viena publikacija Thomson Reuters „Web of Knowledge“ duomenų bazėje esančiame mokslo žurnale, turinčiame citavimo indeksą, ir viena publikacija Thomson Reuters „Web of Knowledge“ duomenų bazėje esančiame mokslo žurnale, neturinčiame citavimo indekso. Tyrimų rezultatai pristatyti 6 tarptautinėse konferencijose.

Darbo apimtis ir struktūra. Disertaciją sudaro įvadas, trys pagrindiniai skyriai, apimantys literatūros apžvalgą, metodologiją ir atliktų tyrimų rezultatus, bei išvados. Disertacijos apimtis 113 puslapių (be priedų), juose 35 paveikslai, 12 lentelių, 115 cituojamų literatūros šaltinių ir mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašai.

1 ENERGETIKOS YPATINGOS SVARBOS INFRASTRUKTŪRŲ TYRIMŲ METODŲ APŽVALGA

1.1 Ypatingos svarbos infrastruktūros

Tyrimai ypatingos svarbos infrastruktūrų tematikoje dažniausiai susiję su žmogaus tyčine veikla (teroristiniais aktais) ar stichinių nelaimių poveikiu šalies infrastruktūrų sistemose, kuomet sutrikdomas valstybės ar jos dalies funkcionavimas. Ypatingos svarbos (angl. *critical*) infrastruktūros sąvoka aiškiai apibrėžta Europos Komisijos Žaliojoje knygoje „*Europos programa dėl ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsaugos*“ ir visuotinai vartojama įvairiose srityse, tiek politikoje, tiek moksliniuose darbuose. **Ypatingos svarbos infrastruktūros objektas** – turtas, sistema ar jų dalis, esantys valstybėse narėse, kurie yra ypač svarbūs esminėms visuomeninėms funkcijoms, žmonių sveikatai, saugai, saugumui, ekonominei ar socialinei gerovei palaikyti ir kurių veikimo sutrikdymas ar sunaikinimas, dėl šių funkcijų nepalaikymo turėtų didelį poveikį valstybei narei (Europos Komisija [EK], 2005). Vėliau Europos Komisijos buvo išleista direktyva 144/08/EC dėl „*Europos ypatingos svarbos infrastruktūros objektų nustatymo ir priskyrimo jiems bei būtinybės gerinti jų apsaugą vertinimo*“, kuri įpareigoja Europos Sąjungos nares atlikti ypatingos svarbos objektų nustatymą, vertinimą ir apsaugos užtikrinimą. Išleistoje direktyvoje 144/08/EC apibrėžtas **Europos ypatingos svarbos infrastruktūros objektas** (ESI) – ypatingos svarbos infrastruktūros objektas, esantis valstybėse narėse, kurio veikimo sutrikdymas ar sunaikinimas turėtų didelį poveikį bent dviem valstybėms narėms. Poveikio mastas įvertinamas pagal bendrus kriterijus. Tai apima tarpsektorinių priklausomumų nuo kitų rūšių infrastruktūros objektų sukeltą poveikį (Europos Komisija, 2008).

Taip pat klausimas dėl ypatingos svarbos infrastruktūrų saugumo užtikrinimo yra nagrinėjamas ir kitame žemyne, Jungtinėse Amerikos Valstijose (JAV). Nuo 1990-ųjų vidurio federalinė vyriausybė suformulavo požiūrį dėl YSI, kuris susijęs su kibernetinėmis atakomis. JAV parengė ir paskelbė direktyvą dėl ypatingos svarbos infrastruktūrų apsaugos „*Nacionalinės infrastruktūros objektų apsaugos planas*“ (angl. US National Infrastructure Protection Plan NIPP), kurioje pateikiama ypatingos svarbos infrastruktūrų sąvoka: „*Šalies ypatingos svarbos infrastruktūra apima: turtą, sistemas ir funkcijas, gyvybiškai svarbias nacionaliniam saugumui, ekonomikai, nacionalinės visuomenės sveikatai ir saugumui*“ (Homeland Security, 2009).

Mokslinėje literatūroje ypatingos svarbos infrastruktūros yra traktuojamos panašiai, YSI objektas apibrėžiamas kaip bet kuris infrastruktūros elementas, sistemos ar valstybėje esančios jų dalys, kurios laikomos būtinomis, kad būtų užtikrintos esminės socialinės funkcijos, sveikatos, fizinės neliečiamybės, saugumo, socialinės ir ekonominės gerovės priežiūra (Yusta, Correa ir Lacal-Aránzaga, 2011). Kartais YSI terminas sugretinamas su „energetiniu saugumu“ (Belluck, Hull, Benjamin, Alcorn ir Linkov, 2007).

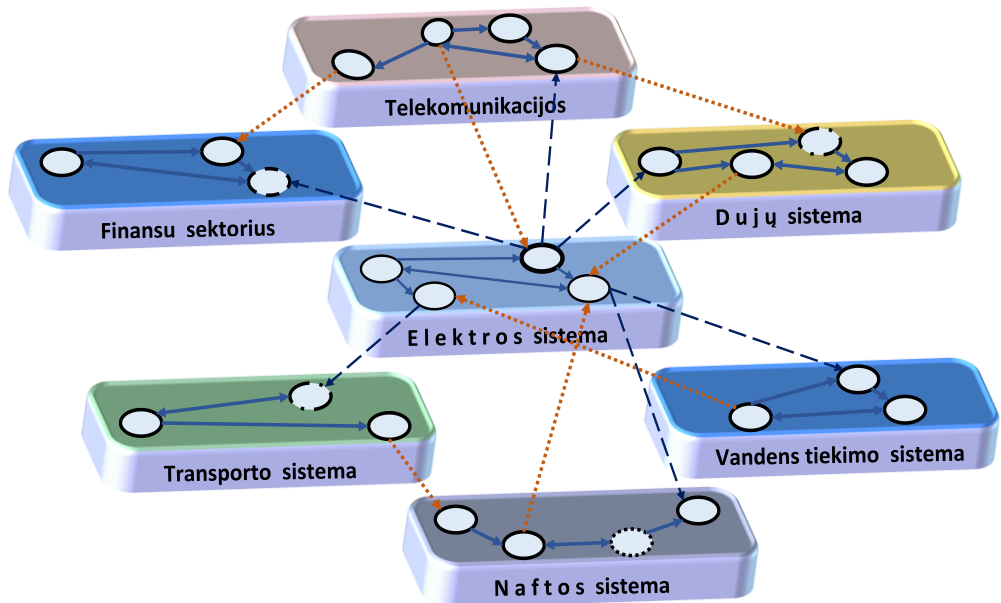
Galima teigti, kad ypatingos svarbos infrastruktūros objektų ir pagrindinių išteklių (angl. *critical infrastructure and key resources*) sąvoka apima bet kurios šalies visą turtą, kuris yra svarbus, ir kurio sunaikinimas arba degradacija darytų sekinantį poveikį esminėms valdžios funkcijoms, nacionaliniam saugumui, šalies ūkiui ar

visuomenės sveikatai (Hull, Belluck ir Lipchin, 2006; Löschel, Moslener ir Rübhelke, 2010). Labai dažnai YSI svarba pabrėžiama dėl joje esančių tarpusisteminių sąryšių, tuo atveju, kai yra sutrikdomas darbas vieno iš YSI objektų bet kuriame sektoriuje (dėl teroristinių išpuolių, stichinių nelaimių arba žmogaus sukeltų pažeidimų), tai gali sukelti neigiamą poveikį (kaskadinį efektą) kituose šalies sektoriuose ar net visam kontinentui.

Moksliniuose darbuose labai dažnai akcentuojama, kad ypatingos svarbos infrastruktūrose egzistuoja glaudūs atskirų šalies sistemų ryšiai – tarpusavio priklausomumai (angl. interdependence) (Karaca, Raven, Machell ir Camci, 2014; Ajah, Herder, Grievink ir Weijnen, 2006).

Vienas sudėtingiausių vertinimo uždavinių – nustatyti (apibrėžti) pasekmes, kurios atsiranda dėl gamtos reiškinių sukeltų trikdžių. Vienas pavyzdžių būtų branduolinė avarija Fukušimos branduolinėje elektrinėje Japonijoje. Ši įvykį sukėlė stichinės nelaimės: žemės drebėjimas ir cunamis, kurie sukėlė pavojų šalies bei kaimyninių valstybių žmonių saugumui, taip pat pasaulio ekologijai. Japonijoje kilusi avarija privertė vyriausybes sutelkti dėmesį į energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų apsaugos užtikrinimo uždavinius ir skatinti tarp sektorių esančių priklausomumų nustatymo bei modeliavimo mokslinius tyrimus. Kadangi egzistuoja daugybė skirtingo tipo grėsmių, tai dažnai aprašomieji energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų modeliavimo metodai turi įtrauktas konkrečias nagrinėjamas grėsmes.

Literatūroje labai dažnai pateikiama, kad energetikos sistemos yra labiausiai susijusios tarpusavio sąryšiais su visais kitais šalies sektoriais (Oliva, Panzieri ir Setola, 2011; Giannopoulos, Filippini ir Schimmer, 2012) ir vienas tokių tarpusisteminių sąryšių pavyzdžių pateiktas 1.1 pav.



1.1 pav. Ypatingos svarbos infrastruktūros tarpusavio sąryšių schemos pavyzdys

Galima išskirti du šalies sistemų tipus, kurie turi daugiausiai tarpusavio sąryšių su kitomis sistemomis ar atskiomis jų infrastruktūromis. Tai yra energetikos sektoriaus sistemos (elektros, centralizuoto šilumos tiekimo, dujų tiekimo ir t. t.) ir telekomunikacijų sistemos, tokios kaip internetas, mobilusis ryšys, radijo ryšys ir t. t. Šios dvi sistemų grupės yra neatsiejamos nuo kitų sistemų infrastruktūrų darbo ir jų funkcionavimo užtikrinimo. Be to, pastarosios taip pat yra tarpusavyje glaudžiai susijusios. Taigi, įvykę trikdžiai bet kurioje iš energetikos sektoriaus ar telekomunikacijų sistemų kaipmat neigiamai paveiks ir kitų infrastruktūrų darbą. Todėl labai svarbu sutelkti dėmesį į ypatingos svarbos infrastruktūros sektorių tarpusavio priklausomumo tyrimus, susijusius su tarptautinėmis atakomis, nelaimingais atsitikimais ar stichinėmis nelaimėmis.

Europos Komisijos pristatytoje direktyvoje įvardijamos infrastruktūrų sistemos, kurioms suteikiamas Europos ypatingos svarbos infrastruktūrų statusas (ESI). EK išskyrė dvi sektorių grupes, kurios yra ESI. Tai energetikos ir transporto sektoriai, pateikti 1.1 lentelėje (Europos Komisija, 2008). Pastarajam Europos energetikos sektoriui skiriama daug dėmesio, dėl šio sektoriaus kompleksiskumo ir didelės infrastruktūros apimties. Šios infrastruktūros apsaugai užtikrinti buvo sukurta energetikos YSI operatorių tinklo organizacija, apimanti elektros, dujų sektorius (Europos Komisija, 2011), kad būtų galima dalintis informacija ir patirtimi Europos lygiu, užtikrinant informacijos apsaugą.

1.1 lentelė. Europos Komisijos ESI sektorių sąrašas

Makrosektoriai ES direktyva 114/08		
I Energetika	1. Elektros energija	Elektros energijos gamybos ir perdavimo infrastruktūros objektai ir įrengimai, susiję su elektros energijos tiekimu
	2. Nafta	Naftos gamyba, perdirbimas, apdorojimas, laikymas ir perdavimas vamzdynais
	3. Gamtinės dujos	Dujų gavyba, perdirbimas, apdorojimas, laikymas ir perdavimas vamzdynais, taip pat suskystintų gamtinių dujų (SGD) terminalai
II Transportas	4. Kelių transportas 5. Geležinkelių transportas 6. Oro transportas 7. Vidaus vandens kelių transportas 8. Jūrų laivyba ir pervežimai jūra trumpais atstumais bei uostai	

Europos Komisija iš viso išskyrė aštuonias sektorių dalis, kurių objektai gali būti priskirti ESI. Tačiau ES valstybės narės yra įpareigosos pačios identifikuoti ypatingos svarbos infrastruktūros objektus, kurie gali būti priskirti ESI.

ES direktyva apima šiuos aspektus:

- Europos ypatingos svarbos infrastruktūros objektų (ESI) nustatymą ir priskyrimą.
- Priemonės, skirtas palengvinti ESI apsaugos programos tobulinimą.
- Ypatingos svarbos infrastruktūros objektų įspėjimo sistemą (angl. CIWIN).
- Ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsaugą (angl. CIP) ES lygiu.
- Tarpusavio priklausomumo nustatymą ir analizę.

- Daugiau dėmesio sutelkti didelio masto energetikos infrastruktūros ir įrenginių apsaugai Europos energetikos sektoriuje.
- Informacijos keitimąsi su saugumu susijusiais klausimais svarbiausiuose energetikos infrastruktūros sektoriuose (operatorių tinklo, elektros, dujų ir naftos).
- Pagalbą ES narėms užtikrinant nacionalinių ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsaugą (Europos Komisija, 2011).

Kitoje YSI programoje – NIPP, parengtoje pagal JAV, išskiriamos devynios makrosektorių grupės, kurių objektai priskiriami YSI, pateikti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. JAV ypatingos svarbos infrastruktūrų ir pagrindinių išteklių sąrašas

Makro sektoriai JAV NIPP	
1.	Žemės ūkio ir maisto
2.	Bankų ir finansinių institucijų
3.	Komunikacijų
4.	Informacinių technologijų
5.	Kariuomenės ir gynybos
6.	Energetikos
7.	Transporto
8.	Nacionalinių paminklų
9.	Geriamojo vandens valymo įrenginių

JAV parengtoje programoje nustatomos trys konkrečios, susirūpinimą keliančios sritys, susijusios su sektorių tarpusavio priklausomumu:

- įvairių sektorių tarpusavio priklausomumai,
- kibernetinės dimensijos apsauga,
- ypatingos svarbos infrastruktūros tarptautinis aspektas.

Šie sprendžiami uždaviniai pateikia daugiau informacijos apie tarpusavio priklausomumo lygius, esančius nacionaliniame ir tarptautiniame ypatingos svarbos infrastruktūrų tinkle (Homeland Security, 2009).

Pirmasis iš sprendžiamų klausimų yra nustatyti sektorių tarpusavio priklausomumus. NIPP teigia, kad kuriant konkrečius YSI sektorių planus reikia atsižvelgti į atitinkamą infrastruktūros sektorių svarbiausių funkcijų tinklą ir konkrečias vadovaujančias institucijas.

Antrasis iš sprendžiamų klausimų apibūdinamas kaip tarpusavio priklausomumas kibernetinėje dimensijoje. NIPP teigia nustatanti, kad globali kibernetinė infrastruktūra yra JAV nacionalinio ir ekonomikos saugumo užtikrinimo pagrindas.

Trečiasis iš sprendžiamų klausimų yra tarptautinės YSI apsaugos užtikrinimas. NIPP siūlymu, tarptautinio pobūdžio grėsmėms ir pasaulinio tinklo YSI sektoriams (pvz., energetikos, transporto, telekomunikacijų ir t. t.) reikia ypatingo vertinimo, atsižvelgiant į rizikos valdymo ir pažeidžiamumo analizes.

Kitų šalių nacionaliniai ypatingos svarbos infrastruktūrų planai

Atlikus YSI modeliavimo publikacijų apžvalgą ir informacijos paiešką internete, galima pastebėti, kad beveik visos didžiosios valstybės turi nacionalinius YSI planus bei savo viduje esančias institucijas, kurios užsiima YSI ar atskirų šalių

sektorių vertinimu. Tačiau šie planai ir institucijų atlikti tyrimai yra konfidencialūs ir ribotos prieigos. Planai pateikti 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Nacionaliniai ypatingos svarbos infrastruktūrų planai (Yusta et al., 2011)

Valstybė	Programa	Tikslas	Institucija
Argentina	Kibernetinė apsauga	CERT / CSIRT metodika (Interneto ir telekomunikacijų)	Oficina Nacional de Tecnología de Información
Australija	Nacionalinė strategija dėl ypatingos svarbos infrastruktūros apsaugos; Australijos standartas AS / NZS 4360:1999	Australijos gebėjimas vykdyti nacionalinės gynybos ir krašto apsaugą; Rizikos valdymo metodų įgyvendinimas (Imonių ir sistemų)	Informacija apie Nacionalinės infrastruktūros; Viešųjų paslaugų įmonės
Brazilija	Kibernetinė apsauga	CERT / CSIRT metodika (Interneto ir telekomunikacijų)	Krašto apsaugos ministerija
Kanada	Nacionalinė ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsaugos strategija; Kanados visuomenės saugumo agentūra	Fizinių ir kibernetinių komponentų pritaikymas viešuose ir privačiuose sektoriuose; ekstremalių situacijų valdymo, teisėsaugos, nusikalstamumo prevencijos	Šiaurės Amerikos elektros patikimumo bendrovė (NERC); Kanados saugumo žvalgybos tarnyba
Kinija	Kibernetinė apsauga	CERT / CSIRT metodika (Interneto ir telekomunikacijų)	Kibernetinių incidentų tyrimų centras
Kolumbija	Kibernetinė apsauga	CERT / CSIRT metodika (Interneto ir telekomunikacijų)	Krašto apsaugos ministerija
Prancūzija	„Baltoji knyga“ dėl gynybos ir nacionalinio saugumo Kibernetinė apsauga	Vidinių ir išorinių nacionalinių ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsauga	Centre operationnel d'information & PIRANET Plan
Vokietija	Federalinis kibernetinių incidentų tyrimų centras (CERT- Bund)	CERT / CSIRT metodika (Interneto ir telekomunikacijų)	Federalinės informacijos saugumo biuras
Nyderlandų Karalystė	Nacionalinis krizių centras	Rizikos vertinimo parama ir konsultavimas apie apsaugos priemones	Nationaal Adviescentrum Vitale Infrastructuur
Šiaurės Korėja	Kibernetinė apsauga	CERT / CSIRT metodika (Interneto ir telekomunikacijų)	Korėjos interneto apsaugos centras
Ispanija	Ispanijos nacionaliniai infrastruktūros objektų apsaugos planai; Kibernetinė apsauga	Koordinavimo veikla, susijusi su ypatingos svarbos infrastruktūros objektų apsauga, viešajame ir privačiame sektoriuje CERT / CSIRT metodika (Interneto ir telekomunikacijų)	Centro Nacional de Protección de Infraestructuras Críticas Centro Nacional de Criptología
Jungtinė Karalystė	Iniciatyva dėl ypatingos svarbos infrastruktūros sektorių (ryšių, avarinių tarnybų, energetikos, finansų, maisto, vyriausybės, sveikatos priežiūros, transporto ir vandens)	Apsaugos politika sektoriams, kurie yra ypač svarbūs visuose visuomenės lygiuose	Nacionalinės infrastruktūros apsaugos centras

Pateiktje lentelėje matyti, kad didžiosios valstybės dažniausiai dėmesio skiria kibernetinei apsaugai, kadangi dauguma infrastruktūrų yra valdoma pasitelkiant komunikacines ryšio priemones (belaidžiai davikliai, stebėjimo stotys ir t. t.).

Apibendrinant apžvelgtus ypatingos svarbos infrastruktūrų apibrėžimus galima

teigti, kad YSI apibrėžimas įvardija tokias šalies infrastruktūras, kurių darni veikla užtikrina tos šalies nacionalinį saugumą, fizinį vientisumą, energetinį saugumą bei ekonominį stabilumą. Kaip dažniausiai pateikiama literatūroje, energetikos YSI yra vienos svarbiausių, dėl stipraus priklausomumo su kitomis šalies sistemomis. Todėl disertacijos darbe atliekamas energetikos YSI vertinimas.

Tiriant energetikos ypatingos svarbos infrastruktūras reikėtų ne tik įvertinti sistemos (analizuojamos, kaip elemento) sąryšius su kitomis sistemomis ar technines infrastruktūros objektų charakteristikas, bet ir nagrinėti integralią energetikos sistemų visumą bei jose esančius funkcinius priklausomumus tarp infrastruktūrų elementų ir nustatyti kritinius (vartotojų atžvilgiu) elementus bei jų grupes, kurie turi didžiausią kritiškumą energetikos sistemoms, atsižvelgiant į atsitiktinį sistemų darbą įvertinant elementų patikimumą.

1.2 Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūros vertinimo aspektai ir vertinimo metodų apžvalga

Nors ES valstybės narės yra direktyvos 114/08/EC įpareigos atlikti nacionalinių energetikos infrastruktūrų vertinimą ir galimą jų priskyrimą ESI, tiek EK direktyvoje, tiek JAV pateiktuose YSI apsaugos planuose nėra nurodyta, kokiais aspektais ir metodais turi būti atliekamas vertinimas. Kadangi ši tematika pasaulyje pakankamai nauja, palyginus, kad ir su branduolinės saugos ar kita energetikos sektoriaus atskira tematika, todėl nėra nusistovėjusių, visuotinai priimtų kriterijų, metodikų ar kritiškumo matavimo vienetų, kurie leistų kiekybiškai įvertinti energetikos YSI kritiškumą. Atlikti tyrimai esamų energetikos infrastruktūrų vertinimo srityje dažnai yra konfidencialūs ir viešojoje mokslinėje spaudoje nepublikuojami. Kadangi energetikos sistemos, dėl savo struktūros, infrastruktūrų elementų ir sąryšių tipų, yra laikomos kompleksinėmis sistemomis, todėl sudėtinga sukurti bendrą energetikos YSI vertinimo metodiką, kuri lanksčiai būtų pritaikoma tiek nedidelėms nacionalinėms energetikos infrastruktūroms vertinti, tiek ES ar kito kontinento mastu.

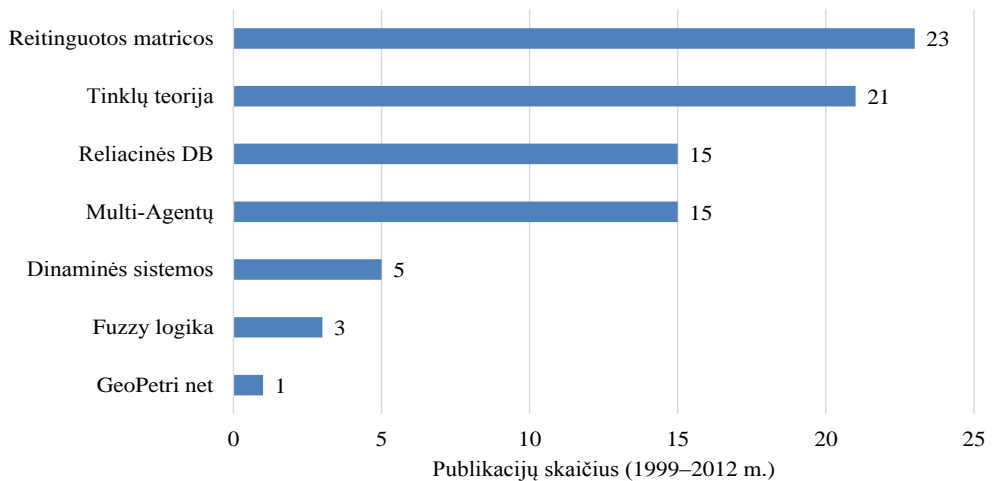
Pirmiausia būtų galima suformuluoti energetikos YSI vertinimo aspektus, kurie buvo pastebėti atliekant energetikos YSI vertinimo metodų literatūros apžvalgą. Šios tyrimų tematikos vertinimo aspektai yra pasiskirstę grupėmis:

- Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų modeliavimo įrankių sudarymas;
- Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų tarpusavio sąryšių vertinimas ir modeliavimas;
- Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų rizikos vertinimas;
- Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo/pažeidžiamumo vertinimas.

Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų modeliavimo įrankių sudarymas

Atlikus energetikos YSI vertinimo metodų literatūros apžvalgą pastebėta, kad YSI modeliavimo įrankių sudarymas yra vienas pirmųjų uždavinių, iškilusių vertinimo tematikoje. Kadangi energetikos sistemos savo prigimtimi ir jose vykstančiais procesais yra labai skirtingos, todėl sudėtinga parinkti vieną

modeliavimo ar vertinimo įrankį, kuris tiktų visoms sistemoms. Pastebėta, kad energetikos YSI modeliuoti yra svarbu pasirinkti tokius modeliavimo metodus, kurie leistų pasinaudoti sprendimų priėmimo procedūromis ir suteiktų galimybę vizualizuoti energetikos YSI darbą. Dažniausiai taikomų YSI modeliavimo metodų apžvalga buvo papildyta disertacijos autoriaus Yusta (Yusta et al., 2011) pateikta informacija, kuri leido išskirti, kad dažniausiai YSI modeliuoti 1999–2012 m. laikotarpiu taikyti reitinguotų matricių ir tinklų teorijos metodai (1.2 pav.).

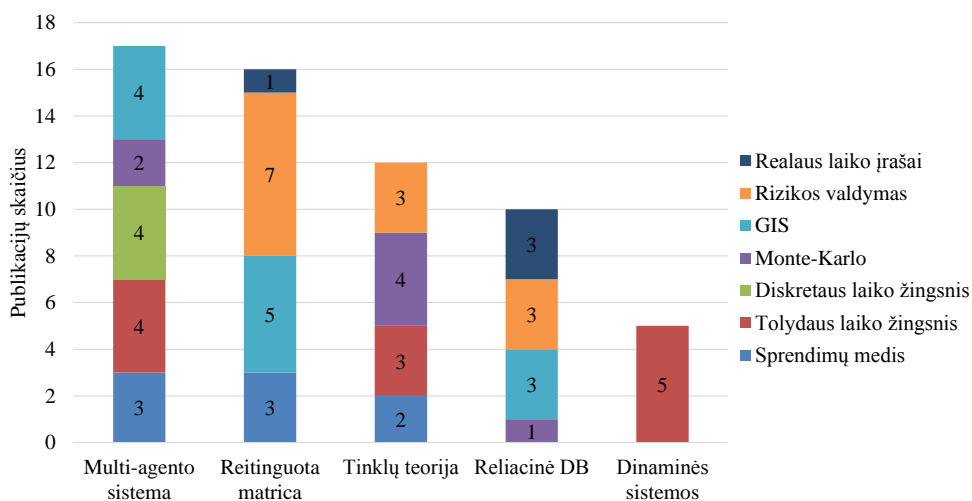


1.2 pav. Dažniausiai modeliavimui taikomi metodai (1999–2012 m.)

Tačiau labai dažnai pasitaiko, kad vieno matematinio metodo ar skaičiavimo technikos nepakanka. Tada šie matematiniai metodai taikomi kartu su papildomais skaičiavimo metodais (technikomis), tokiais kaip:

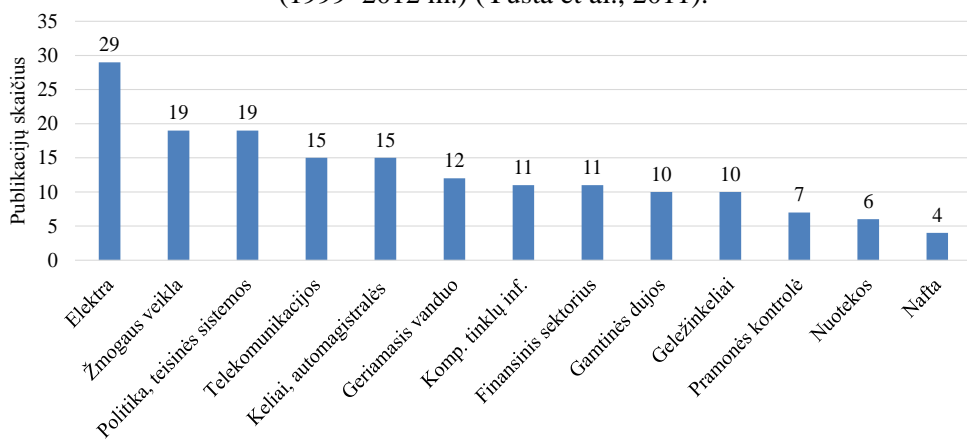
- Tolydaus laiko modeliavimas (CS);
- Diskretaus laiko modeliavimas (DS);
- Monte-Karlo modeliavimas (simuliacija) (MC);
- Sprendimų medžių sudarymas (DT);
- Geografinės informavimo sistemos (GIS);
- Rizikos valdymo metodai;
- Įvykių stebėjimo arba realaus laiko įrašai (RTR).

1.3 pav. pateikiama papildyta informacija apie dažniausiai pasitaikiusiu modeliuoti taikomu metodų derinius (Yusta et al., 2011).



1.3 pav. Dažniausiai modeliavimui taikomos metodų kombinacijos

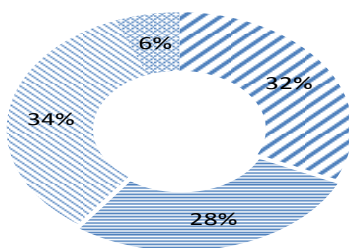
Dėl informacijos saugumo, mokslinėje literatūroje dažniausiai nagrinėjamos hipotetinės arba agreguotos (tuo atveju, kai sistema analizuojama kaip vienas modelio elementas) sistemos. 1.4 pav. pateikiama papildyta informacija apie dažniausiai publikacijose analizuojamų ypatingos svarbos sistemų modeliavimą (1999–2012 m.) (Yusta et al., 2011).



1.4 pav. Dažniausiai minimų YSI sektorių modeliavimas (1999–2012 m.)

Ypatingos svarbos infrastruktūrų SI metodologijų prieinamumas (1999–2010 m.) pasiskirstęs apylygiai (1.5 pav.) tarp tyrimams, komerciniams tikslams ir ribotos prieigos (kariniais tikslais) taikomų metodologijų (Yusta et al., 2011).

■ Komercinės
 ▨ Ribotos prieigos
 ▧ Tyrimų
 ▩ Plėtros



1.5 pav. YSI vertinimo ir modeliavimo metodologijų prieinamumas

Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų tarpusavio sąryšių vertinimas ir modeliavimas

Kitas energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo aspektas susijęs su tarpusavio sąryšių, tiek tarp skirtingų sistemų infrastruktūrų, tiek tarp tos pačios sistemos objektų, vertinimu ir modeliavimu. Kadangi atskiros sistemos, tokios kaip elektros, gamtinių dujų ar informacinės sistemos (SCADA), yra skirtingos prigimties, todėl yra sudėtinga jų tarpusavio sąryšius aprašyti ir vertinti vienu modeliu. Panagrinėjus elektros energetikos sistemą smulkiau pastebėta, kad vyksta tokie procesai, kaip pirminės energijos pavertimas elektros energija, elektros energijos perdavimas ir skirstymas elektros tinklais vartotojams ir t. t. Panagrinėjus gamtinių dujų sistemą išsiaiškinta, kad joje vyksta visai kiti procesai: dujų perdavimas vamzdynais, dujų saugojimas saugyklose. Be to, kiekvienos sistemos elementų techninės charakteristikos yra skirtingos.

Sąryšių tarp sistemų infrastruktūrų svarbą pabrėžia tokie įvykiai: 2003 m. Šiaurės Amerikos visuotinė elektros energetikos sistemos avarija (angl. Blackout), kai keturioms dienoms buvo nutrauktas elektros perdavimas įvairioms rytų JAV ir Kanados valstijoms (U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004), arba 2009 m. įvykęs gamtinių dujų tiekimo nutraukimas iš Rusijos per Ukrainą, kuris paveikė 18 valstybių ir dalį Balkanų regionų.

Todėl svarbu sudaryti modelius, kurie leistų nustatyti ir įvertinti tarpusavio sąryšius tarp skirtingų infrastruktūrų.

Literatūroje pateikiami galimi sąryšių tarp skirtingų infrastruktūrų tipai (Rinaldi, 2004):

- Fizinis priklausomumas (angl. Physical), kai vienos infrastruktūros darbas/funkcionavimas priklauso nuo kitos infrastruktūros tiekiamos produkcijos;
- Kibernetinis priklausomumas (angl. Cyber), kai infrastruktūros būseną priklauso nuo perduodamos informacijos kibernetinėje erdvėje;
- Loginis priklausomumas (angl. Logical), kai infrastruktūros priklauso nuo reguliatorių valdymo;
- Geografinis tarpusavio priklausomumas (angl. Geographic), kai sistemos elementai yra glaudžiai susiję geografinėje erdvėje.

Mokslinėje literatūroje pristatomi tarpusavio priklausomumo energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų tyrimai gali būti klasifikuojami skirtingai. Kai kurie mokslininkai siūlė skirtingus tarpusavio priklausomumo vertinimo modelių kriterijus. Satumtira ir Dueñas-Osorio (Satumtira, Dueñas-Osorio, 2010) pasiūlė sąryšių vertinimo ir modeliavimo metodus skirstyti pagal tokius kriterijus: modeliavimo objektyvumą; matematinius modelius; įvesties duomenų kokybę ir kiekį bei inicijuotų įvykių stebėjimą.

Kompleksinių adaptyvių sistemų (tokių kaip energetikos) tarpusavio sąryšiams analizuoti ir modeliuoti plačiai taikomi Agentais pagrįsti metodai (angl. Agent-based approach) (Kaegi, Mock ir Kröger, 2009). Autoriai pritaiko sąveiką tarp kiekvieno Agento, kai jo veikla pagrįsta iš anksto nusakytomis taisyklėmis ir dauguma YSI objektų yra aprašomi kaip atskiri Agentai. Šio modelio panaudojimą pateikia C. Barrett savo darbe analizuodamas tarpusavio sąryšius tarp transporto ir komunikacijos tinklinių sistemų (Barrett et al., 2010). Sąryšius tarp energetikos sistemų ir su kitomis sistemomis panaudojant Agentų metodą nagrinėjo E. Bompard su bendraautoriais. Jie vertino sąryšius tarp elektros energetikos sistemos ir informacinių tinklų (Bompard, Napoli ir Xue, 2009). Šio metodo pritaikomumą energetikos sistemose pabrėžia ir T. Rigole kartu su kolegomis (Rigole, Vanthournout, De Brabandere ir Deconinck, 2008) savo darbe nagrinėdami priklausomumus tarp paskirstymo tinklų ir elektros energijos generatorių. Taigi, Agentais pagrįsti metodai gali būti naudojami bet kokiam priklausomumo tipui vertinti ir modeliuoti, pasitelkiant „kas jei“ analizes ar diskrečių įvykių modeliavimą. Tačiau šio metodo silpnoji pusė yra tai, kad egzistuojantys tyrimai ir modeliai labiausiai koncentruojasi tik į vieną konkretų priklausomumo tipą. Taip pat vertinimo ir modeliavimo rezultatų kokybė labai priklauso nuo eksperto prielaidų, kuriomis aprašyta Agentų veikla. Dažnai tai būna sunku paaiškinti statistiškai arba teoriškai.

N. Kollikkathara kartu su bendraautoriais pasiūlė naudoti modelius, grindžiamus dinaminių sistemų modeliavimu ir besileidžiančiais (angl. Top-down) metodais, analizuojant adaptyvių kompleksinių sistemų sąryšius (Kollikkathara, Feng ir Yu, 2010; Chen, Giannis ir Wang, 2012b). Modelyje, kuriame nagrinėjamos atliekų tvarkymo infrastruktūros, grįžtamieji ryšiai rodo sąryšius ir kryptis tarp YSI objektų, o turimos produkcijos atsargos objektuose atspindi sistemos būseną. Dinaminių sistemų modeliavimu pagrįstų metodų silpnoji pusė yra tai, kad skaičiavimuose naudojamos diferencialinės lygtys, ir dažniausiai lygčių parametrai įvertinami ekspertų nuomone (duomenų konfidencialumo problema). Taip pat šis metodas nėra tinkamas sistemų objektų lygio dinamikai analizuoti.

Kita metodų grupė, naudojama analizuojant tarpusavio sąryšius tarp energetikos YSI, vadovaujasi ekonomiais rodikliais pagrįstais metodais ir Leontief sąnaudų ir produkcijos analizės metodais (angl. Leontief Input-output model). W. Xu kartu su bendraautoriais pasiūlė šiuo modeliu aprašyti sąveikos raidos procesą vertinant pramonės ir ekonomikos sektoriaus infrastruktūras po inicijuojančių trikdžių, tokių kaip atakų ar stichinių nelaimių (Xu, Hong, He, Wang ir Chen, 2011; Jung, Santos ir Haines, 2009). Energetikos YSI sąryšiams vertinti, esant kibernetiniams išpuoliams, Leontief sąnaudų ir produkcijos modelio tinkamumą pristatė J. R. Santos, kartu su kolegomis (Santos, Haines ir Lian, 2007) vertindamas gamtinių dujų ir naftos sistemų

ekonominių poveikį kibernetinės atakos metu. Taip pat D. A. Reed bei R. Pant ir kiti šį modelį panaudojo analizuojant atsparumą (angl. resilience) tarp elektros perdavimo ir telekomunikacijų sistemų, esant stichinėms nelaimėms (Reed, Kapur ir Christie, 2009; Pant, Barker, Grant ir Landers, 2011).

Šio modelio silpnosios pusės yra tai, kad sąryšiai tarp skirtingų sektorių vertinami ekonominiais rodikliais (pakeičiami ekonominiais sąryšiais). Taip pat sąnaudų ir produkcijos modelis negali vertinti tarpusavio priklausomumo infrastruktūrų objektų lygiu. Vertinama tik sisteminių arba sektorių lygiu (De Porcellinis, Oliva, Panzieri ir Setola, 2009; Oliva et al., 2011). Šie modeliai dar yra taikomi kaskadiniais įvykiams vertinti.

Dueñas-Osorio ir Kwasinski savo darbe (Dueñas-Osorio, Kwasinski, 2012) pasitelkė laiko eilučių analizės metodiką, siekiant atskleisti priklausomumus tarp YSI, atkuriant įvykių eigą. Autoriai teigia, kad kryžminės koreliacijos (angl. cross-correlation) kreivės be didelių laiko uždelimų atspindi eksploatacijos tarpusavio priklausomumą, o tos, kurios yra su dideliais laiko uždelsimais, įvertina logikos priklausomumus. Toks statistinis vertinimas naudojamas rečiau.

Kitą išplėtotą modelį, kuris naudojamas rečiau, sąryšiams tarp infrastruktūrų vertinti savo darbe (Huang, Gao, Buldyrev, Havlin ir Stanley, 2011) pristatė Chun-Nen Huang ir kiti. Autoriai pasiūlė sąryšiams vertinti naudoti jų išplėtotą DANP modelį, apjungianti DEMATAL metodą (pagrįstą grafų teorija) kartu su analitiniu tinklo procesų modeliavimu. Jų darbe buvo analizuojami sąryšiai energetikos sistemų, tokių kaip elektros, gamtinių dujų, naftos ir informacinių bei transporto sistemų, įvertinant įtakos matricas tarp nagrinėjamų sistemų. Šio modelio trūkumais būtų galima įvardyti tai, kad pradiniais sąryšių duomenims reikia ekspertų vertinimo, o priklausomumo sąryšiai vertinami tik sisteminiu lygiu.

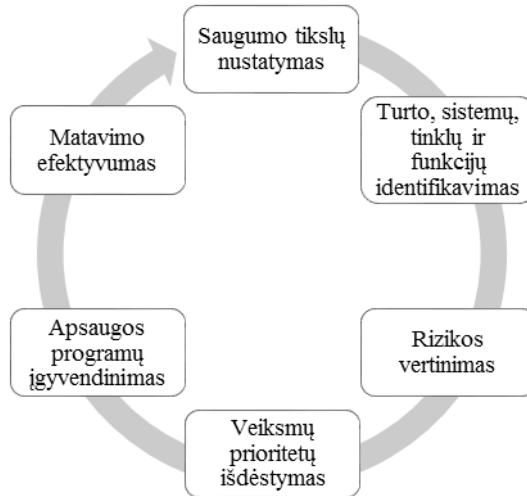
Ab. Hishek Singh kartu su kolegomis savo darbe (Singh, Gupta ir Ojha, 2014) pristatė išplėtotą sąryšių vertinimo ir sektorių identifikavimo metodą, pagrįstą interpretaciniu struktūriniu modeliavimu (ISM). Darbe pateikiamas abipusis sąryšių matricos nustatymas tarp skirtingų Indijos infrastruktūrų sistemų. Šio metodo silpnoji pusė yra tai, kad vertinti naudojama tik ekspertų patirtis, o infrastruktūros analizuojamos sisteminiu lygiu.

Apibendrinant energetikos YSI tarpusavio sąryšių vertinimą svarbu paminėti, kad energetikos sistemos yra kompleksinės ir adaptyvios atsižvelgiant į situaciją, prisitaikančią prie vartotojų energijos poreikių užtikrinimo (t. y. krizių valdymo scenarijai ir pan.). Todėl sudėtinga nustatyti ir įvertinti visus galimus sąryšius tarp energetikos sektoriaus infrastruktūrų ir sąryšius su kitais šalies sektoriais. Be to, nustaćius ir įvertinus galimus sąryšius energetikos sektoriuje, negalima identifikuoti, kurios sistemos ar jų elementai yra kritiniai (svarbūs). Taip pat negalima kiekybiškai įvertinti jų įtakos sistemos darbui.

Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų rizikos vertinimas

Kitas YSI vertinimo aspektas yra tarpusavyje priklausančių energetikos sistemų infrastruktūrų rizikos vertinimas. Kadangi energetikos sistemos, tokios kaip elektros ar dujų bei naftos, yra pakankamai didelės, adaptyvios ir kompleksinės, todėl sudėtinga pritaikyti klasikinius, tikimybiniais skaičiavimais pagrįstus, rizikos

vertinimo metodus. Tyrimai šiuo aspektu dar nėra stipriai pažengę dėl sudėtingų sąryšių tarp skirtingų sistemų ir galimų inicijuojančių įvykių kiekvienos sistemos atžvilgiu. Tačiau YSI rizikos vertinimo ideologiją ir svarbą pabrėžia tiek EK pateikta direktyva 114/08/EC, tiek JAV infrastruktūrų apsaugos planai (NIPP). Pastaroji siūlo šešių žingsnių rizikos valdymo sistemą, kurios sudėtis pateikta 1.6 pav.



1.6 pav. NIPP šešių žingsnių rizikos valdymo sistema

Rizikos valdymo sistemoje yra numatytas grįžtamasis ryšys ir nuolatinis rizikos vertinimo tobulinimas, taip suteikiant programai lankstumą ir nuolatinį tobulinimą.

Rizikos analizė energetikos ypatingos svarbos infrastruktūroms gali skirtis atsižvelgiant į: riziką, analizės tikslus, atitinkamos informacijos reikalaujamą apsaugos lygį, duomenis ir jų šaltinius. Analizė gali būti: kokybinė; pusiau kiekybinė; kiekybinė arba jų derinys.

Dėl sistemų infrastruktūrų kompleksiško dažniausiai energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų rizikai vertinti naudojama empiriškai pagrįsta rizikos analizė. Įprastai atsižvelgiama į istorinius sistemų infrastruktūrų gedimų duomenis ir ekspertų patirtį. Rizikos analizės tikslas, atsižvelgiant į galimus inicijuojančius įvykius (grėsmes), – nustatyti energetikos YSI pažeidžiamumą ir pateikti pasiūlymus, siekiant sumažinti jų rizikos lygį. Tokią Oslo miesto elektros ir traukinių infrastruktūrų rizikos analizę savo darbe pristato I. B. Utne su bendraautorais (Utne, Hokstad ir Vatn, 2011; Kjølle, Utne ir Gjerde, 2012). Tyrėjai nagrinėja 2007 m. įvykusią nelaimę Oslo centrinėje stotyje, kai inicijuojantis įvykis buvo nutrūkęs elektros kabelis, sukėlęs stoties gaisrą ir atitinkamai 20 valandų sutrikdęs traukinių infrastruktūros bei 10 valandų interneto sistemų darbus. Šių sistemų infrastruktūrų rizikos analizė atlikta taikant pusiau kiekybinius vertinimo metodus bei pakopinių įvykių procesus tarp infrastruktūrų (angl. cascading failures process across infrastructure). Įvykio scenarijaus rizika įvertinama ekonominiais rodikliais ir nustatoma optimali strategija rizikos lygiui sumažinti.

G. J. Correa-Henao su kolegomis taip pat pasinaudodami pusiau kiekybinės rizikos analizės metodais ir rizikos vertinimo matricomis atliko Kolumbijos elektros

energetikos sistemos infrastruktūros rizikos vertinimą (Correa-Henao, Yusta ir Lactal-Aránategui, 2013).

E. Cagno su kolegomis atliko šiaurės Italijos miesto centro požeminių infrastruktūrų rizikos ir sąveikos (angl. interoperability) vertinimą (Cagno, De Ambroggi, Grande ir Trucco, 2011). Autoriai nagrinėjo elektros, centralizuoto šilumos tiekimo, dujų, vandens tiekimo ir telekomunikacijų požemines sistemas, pasitelkdami sąnaudų ir produkcijos analizės modeliavimo metodą, siekiant įvertinti tarpusavio sąryšių įtaką tarp skirtingų infrastruktūrų. Buvo įvertinta kiekvienos miesto geografinės zonos visuomenės rizika (angl. societal risk) (Johansson, Denk ir Svedung, 2009), atsižvelgiant į kylančią riziką žmonėms, pastatams ir verslui.

Empiriškai pagrįstų rizikos analizės metodų silpnoji pusė yra tai, kad analizė labai priklauso nuo ekspertų vertinimo ir turimų empirinių duomenų. Esant mažam kiekiui duomenų, rizikos analizės gali būti netikslios.

Tikimybiniai rizikos vertinimo metodai (angl. PRA) dažniau taikomi vertinant vieno tipo sistemų infrastruktūras. Pvz., P. Henneaux kartu su kolegomis atliko elektros tinklo visuotinės elektros energetikos sistemos avarijos (angl. Blackout) rizikos vertinimą (Henneaux, Labeau ir Maun, 2013).

Apibendrinant energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų rizikos vertinimą būtų galima teigti, kad dažniausiai tokios analizės atliekamos konkrečioms nedidelėms infrastruktūroms (vieno tipo). Vertinant keletą energetikos sistemų vienu metu turima kompleksinė sistemų struktūra, kurios rizikos vertinimas yra labai sudėtingas ir reikalauja papildomų prielaidų. Kita šio metodo silpnoji pusė yra tai, kad vertinimas atliekamas konkrečioms, iš anksto apibrėžtiems, nagrinėjamiems inicijuojamiems įvykiams ir scenarijams įvertinti. Tačiau energetikos infrastruktūrų rizikos vertinimas nėra tinkamas metodas siekiant nustatyti kritinius infrastruktūros elementus, kaip yra apibrėžta disertacijos uždaviniuose. Atliekant infrastruktūros sistemų visišką rizikos vertinimą inicijuojantys įvykiai bus susiję ne tik su infrastruktūra, bet ir su jos valdymu, žmogaus veikla, politiniais sprendimais ir t. t.

Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo/pažeidžiamumo vertinimas

Kitas energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo aspektas yra sistemų infrastruktūrų kritiškumo vertinimas. Kadangi sistemų infrastruktūros glaudžiai susijusios tarpusavyje infrastruktūrų objektų lygiu, svarbu nustatyti ir kiekybiškai įvertinti tuos sistemų infrastruktūrų elementus ar jų grupes, kurių darbo sutrikdymas pažeistų sistemos ar sistemų funkcionavimą (Johansson, Hassel, 2010; Johansson, Hassel ir Zio, 2013; Eusgeld, Kröger, Sansavini, Schlöpfer ir Zio, 2009; Shuang, Zhang ir Yuan, 2014; Wang, Hong ir Chen, 2012; Cagno et al., 2011; Jenelius, Mattsson, 2012; Fang, Zio, 2013). Labai dažnai autoriai kritiniams elementams nustatyti taiko įvairius sistemos pažeidžiamumo (angl. vulnerability) analizės metodus.

YSI kritiškumo analizės (sistemų lygiu) vertinimo metodiką, analizuojant priklausomumo sąryšius tarp skirtingų sistemų, pasiūlė M. Theoharidou kartu su bendraautoriais (Theoharidou, Kotzanikolaou ir Gritzalis, 2010). Metodas pagrįstas

ekspertiniu rizikos tikėtinumo vertinimu tarp skirtingų sistemų, panaudojant įvykių medžių diagramas ir sudarant įvertinto kritiškumo lygio tarp sistemų matricas. Tai leidžia ekspertiškai įvertinti kurios iš šalies sistemų yra kritinės.

Silpnoji šio kritiškumo vertinimo pusė yra tai, kad atliekama analizė tik sisteminiu lygiu ir nėra vertinamas sistemų infrastruktūrų elementų kritiškumas.

Kiekybinį kritiškumo vertinimą (sisteminiu lygiu) tarp unifikuotų šalies sistemų pasiūlė G. Oliva su bendraautoriais (Oliva et al., 2011). Pasinaudoję ekonominio sąnaudų ir produkcijos analizės modelio bei fuzzy logikos modelių apjungimu, kad būtų galima įvertinti sistemų tarpusavio ekonominio priklausomumo sąryšius ir ekspertų nuomonę, autoriai nustatė kritines nagrinėjamos šalies sistemas. Autoriai pateikė sistemų kritiškumo indeksą (1.1), kuris įvertina sistemų tarpusavio priklausomumą ir įgautą įtaką (angl. influence gain):

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}^* \sum_{i=1}^n a_{ji}^* ; \quad (1.1)$$

čia i – i -oji sistema; a – elementai sąryšių matricos \mathbf{A} , sudarytos iš ekonominių rodiklių duomenų.

Silpnosios šio kritiškumo vertinimo metodo pusės yra tai, kad vertinama tik sisteminiu lygiu ir vertinimo rezultatams įtakos turi ekspertų turima informacija, kuri vertinimo procese gali būti nekompetentinga ir vertinimo rezultatus gali nulemti žmogiškojo faktoriaus klaida.

Kita, ir dažniausiai naudojama, kiekybinių energetikos YSI kritiškumo vertinimo metodų grupė pagrįsta sistemų pažeidžiamumo analizės metodais. Iš pradžių atliekamas sistemos elementų ir jų pajėgumų bei poreikių nustatymas. Kitu žingsniu tokias infrastruktūras patogiau pavaizduoti kaip tinklinę sistemą (pasitelkiant grafa), kurios viršūnės atspindi nustatytus elementus, o tinklo jungtys atspindi sąryšius tarp kitų elementų sistemose (fiziniu priklausomumu).

Q. Shung ir G. J. Correa savo darbuose pristatė pažeidžiamumo vertinimo metodiką, pagrįstą grafų teorija, tačiau analizavo tik vieno tipo infrastruktūras. G. J. Correa savo darbe nagrinėjo bandomosios elektros energetikos sistemos „IEEE 118-bus“ pažeidžiamumą (Correa, Yusta, 2013). Analizuodamas trumpiausių jungčių atstumus ir viršūnių jungčių skaičių, kai sistemoje elementai su vienodomis tikimybėmis yra išjungiami, pasirinkęs pasekmių vertinimo kriterijų – elektros perdavimo laiką tarp viršūnių.

Q. Shung kartu su bendraautoriais analizavo vandens tiekimo sistemos darbą (Shuang et al., 2014), pateikdami grafo tinklo viršūnės pažeidžiamumo indekso įvertį, kuris įvertina kiekvienos grafo viršūnės jungčių skaičių įvykus kaskadiniam procesui. Bendras jungčių praradimo įvertis I_{TL} .

S. Wang, Y. P. Fang ir Y. Dai, vertindami energetikos infrastruktūrų pažeidžiamumą, kurį interpretavo kaip tinklinės sistemos klasterizavimą, pateikė klasterizavimo koeficientų ir klasterių komponentų centriškumo įverčius. Tinklų klasterinė analizė, vertinant sistemos pažeidžiamumą, dažniausiai pasitaiko analizuojant elektros perdavimo sistemas. To priežastis, kad šios sistemos yra sudarytos iš didelio skaičiaus komponentų, todėl įvertinant klasterio elementų

centriškumą nustatomos pažeidžiamos sistemos vietos (Fang, Zio, 2013).

Y. P. Fang pateikia bendrą tinklo efektyvumo įvertį $E(G)$

$$E(G) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}}; \quad (1.2)$$

čia d_{ij} – mažiausia distancijų suma tarp visų galimų tinklo dalių.

Ir tinklo klasterio kritiškumo svarbą kiekybiškai įvertino pasinaudodami informacijos centriškumo įverčiu

$$C_{V_i^{(k)}}^I = \frac{E[G^{(k)}] - E[G_r^{(k)}]}{E[G^{(k)}]}; \quad (1.3)$$

čia $G_r^{(k)}$ – naujas gautas tinklas, pašalinus kraštines, kurios jungia incidentą sukėlusias viršūnes $V_i^{(k)}$.

Taip autoriai nustatė pažeidžiamuosius (kritinius) klasterius.

Dviejų skirtingo tipo tarpusavyje susijusių (elektros energetikos sistemos ir vandens tiekimo Kinijos mieste) infrastruktūrų pažeidžiamumui vertinti ir sistemų kritiniams elementams nustatyti S. Wang su bendraautoriais pasinaudojo tuo pačiu principu, (1.3) formulę pavadindami pažeidžiamumo indikatoriumi (Wang et al., 2012).

Panašiu tinklo klasterizavimo principu Y. Dai su bendraautoriais įvertino elektros tinklo pažeidžiamumą (Dai, Chen, Dong, Xue, Hill ir Zhao, 2014).

Transporto sistemų infrastruktūrų pažeidžiamumui vertinti dažniausiai naudojama geografinės vietos pažeidžiamumo analizė. Savo darbuose B. Y. Chen su kolegomis atliko Honkongo kelių infrastruktūros geografinę pažeidžiamumo analizę (Chen, Lam, Sumalee, Li ir Li, 2012a). Geografinės vietos pažeidžiamumas naudojamas didelę geografinę teritoriją užimančioms infrastruktūroms vertinti, kai sistema atvaizduojama grafu ir visa teritorija, kurią užima infrastruktūra, yra padengiama geografinės plokštumos tinklu. Pažeidžiamumo analizėje yra vertinamas geografinės plokštumos tinklo segmento pažeidimo poveikis visai infrastruktūrai. B. Y. Chen ir kiti tyrimuose pritaikė kelių infrastruktūros tinklo efektyvumo koeficientą, kuris įvertina viršūnių skaičių, esantį infrastruktūros grafe, ir trumpiausius kelių atstumus tarp išvykimo ir atvykimo grafo viršūnių.

E. Jenelius ir L. G. Mattsson, savo tyrimuose vertindami vidutinį laiką tarp kelionės tikslų, pažeisto infrastruktūros regiono atveju naudoja geografinę pažeidžiamumo analizę (Jenelius, Mattsson, 2012; Jenelius, Mattsson, 2014). E. Jenelius ir L. G. Mattsson savo pastarajame darbe pateikė elemento kritiškumo įvertinimą, atsižvelgiant į to elemento svarbą. Analizuodami trikdžių scenarijus autoriai naudojami sistemos elementų svarbos įverčiu:

$$I(e | \sigma) = \sum_{n \in g} \Delta C_n(\sigma); \quad (1.4)$$

čia e – sistemos elementas; σ – trikdžio scenarijus; n – elementas; g – speciali vartotojų grupė.

Autoriai atliko Švedijos valstybės kelių infrastruktūros pažeidžiamumo įvertinimą.

Grafų teorijos ir tinklo topologija pagrįstų pažeidžiamumo vertinimų silpnoji pusė yra tai, kad vertinimas atliekamas modeliuojant diskretų atsitiktinį sistemos darbą, kai sistemos elementai yra dvejopos būklės (sugedę arba veikiantys) ir vertinimas priklauso tik nuo sistemų topologijos. Geografinės vietovės pažeidžiamumo vertinimo rezultatai labai priklauso nuo geografinės vietovės tinklo suskaidymo tankumo.

Deterministinių infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelį, kai infrastruktūros yra skirtingo tipo, pasiūlė J. Johansson ir H. Hassel. Jie savo darbe, atlikdami pažeidžiamumo analizę, vertina geležinkelių transporto, elektros perdavimo, telekomunikacijų sistemų kritinius elementus (Johansson, Hassel, 2010). Pateikiami rezultatai, kaip stipriai sistemos tarpusavyje yra priklausomos. Vertinant pervežamų keleivių skaičių nustatyta, kad didžiausią žalą geležinkelio transportui turi elektros perdavimo sistema. Taip pat deterministiškai įvertintos elementų grupės ir pateikti dešimt kritiškiausių sistemų elementų, geležinkelio transporto atžvilgiu (grupė po vieną elementą, grupės po du elementus ir grupės po tris elementus).

Šio metodo silpnoji pusė yra tai, kad toks deterministinis sistemų elementų (perrinkimas) kritiškumo vertinimas neatsižvelgia į sistemų atsitiktinį darbą, ir atliekamas vertinimas neatspindi tikrojo elementų kritiškumo lygio realioje sistemoje. Taip pat sistemų, sudarytų iš daug elementų, toks deterministinis elementų vertinimas yra sudėtingas, siekiant įvertinti visus galimus kritinių elementų atvejus.

Tokios sistemos, kaip elektros perdavimo, yra sudarytos iš daug tiekimo linijų ir dažniausiai projektuojamos atsižvelgiant į $N-1$ vertinimą. I. Eusgeld kartu su bendraautoriais pristatė Švedijos elektros perdavimo sistemos kritinių elementų vertinimo metodą, kuris pasižymi topologine klasterizavimo analize ((1.3) formulė), kai yra vertinamas ne trumpiausias atstumas tarp sistemų elementų, bet patikimiausių linijų atstumas (Eusgeld et al., 2009). Autoriai papildė kritinių elementų vertinimo, naudojant topologinę analizę (klasterizavimą), metodiką atsižvelgiant į sistemos elementų patikimumą.

Šios metodikos silpnoji pusė yra tai, kad toks vertinimas yra pritaikomas tik vieno tipo infrastruktūrose, kaip ir šiuo elektros perdavimo sistemos atveju, kai sistema yra sudaryta tik iš elektros linijų, ir vertinimui yra reikšmingas atstumas. Tačiau toks kritinių elementų vertinimo kriterijus nėra aktualus mišriose sistemos.

Globalaus sistemos pažeidžiamumo įvertinimo metodą J. Johansson kartu su bendraautoriais pristatė analizuojant IEEE RTS96 elektros energetikos sistemos pažeidžiamumą, be elektros generavimo šaltinių (Johansson et al., 2013). Autoriai pristatė metodą, kuris leidžia modeliuoti funkcinius priklausomumus tarp sistemų elementų ir įvertinti globalų sistemos pažeidžiamumą vertinant nepatiktą elektros energiją vartotojams, kai išmetamų sistemos elementų kombinacijos yra parenkamos pagal elementų patikimumo rodiklius. Tai leidžia įvertinti statistinį priklausomumą tarp išmestų iš sistemos komponentų skaičiaus ir nepatiktos energijos kiekio MW. Šis metodas papildė kritinių elementų vertinimo metodiką, kai analizuojant sistemą atsižvelgiama į elementų patikimumą.

Šio metodo trūkumas yra tai, kad įvertina tik vieno tipo, šiuo atveju elektros,

sistemos bendrą pažeidžiamumo lygį ir neleidžia identifikuoti tų sistemos elementų ar jų grupių, kurie yra kritiškiausi.

Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo metodų apžvalgos apibendrinimas

Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo metodų apžvalga rodo, kad dažniausiai tokios infrastruktūros yra vertinamos skirtingais aspektais, pvz., skirtingo tipo infrastruktūrų sąryšių vertinimo analizė, rizikos analizė, kritiškumo vertinimo (pažeidžiamumo) analizė ir t. t. Apibendrinant galima teigti, kad energetikos YSI yra kompleksinės sistemos. Pagrindinis tokių sistemų vertinimo tikslas yra identifikuoti elementus ar jų grupes, kurios būtų kritinės bendram sistemos funkcionavimui, vertinimo kriterijų laikant galutinių vartotojų poreikių patenkinimą. Skirtingo tipo infrastruktūrų sąryšių vertinimo analizė yra svarbi nustatant, kurios YSI ir kokiais sąryšiais yra tarpusavyje priklausomos, tačiau tai neleidžia identifikuoti sistemų elementų ar jų grupių, kurios būtų kritinės. Energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų rizikos vertinimo aspektas yra ganėtinai komplikotas, dėl sistemų tarpusavio sąryšių, elementų ir galimų trikdžių skaičiaus. Dažniausiai rizikai analizuoti pasirenkamos atskiros infrastruktūrų dalys ir vertinama konkretaus inicijuojančio įvykio įtaka infrastruktūrai funkcionuoti. Rizikos analizė nėra tinkama didelėms, mišraus tipo sistemoms vertinti. Jos dėka galima identifikuoti atskiros infrastruktūros kritinius elementus, atsižvelgiant į vartotojus, pagal iš anksto apibrėžtus scenarijus ir inicijuojančius įvykius. Energetikos YSI rizikos analizės ir modeliavimo rezultatai labiau naudojami infrastruktūrų valdymo operatorių sprendimų priėmimo procedūrose (Zio, Sansavini, 2011).

Rezumuojant, energetikos YSI pasaulyje vykdytų kritiškumo tyrimų (atliekant sistemos pažeidžiamumo analizę) metodai yra gana riboti (dėl priimamų vertinimo ir modeliavimo prielaidų), dėl sudėtingų, skirtingų infrastruktūrų ir jų elementų tarpusavio sąryšių. Dažniausiai energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimas yra pagrįstas deterministiniais analizės metodais arba vertinant sistemų (kaip vieneto) kritiškumą analizuojant kitų susijusių sistemų sąryšius. Dažniausiai pasitaikančius energetikos YSI kritiškumo vertinimo metodus galima sugrupuoti į keturis tipus.

Pirmasis tipas, kai tarpsisteminio kritiškumo vertinimas dažniausiai grindžiamas ekspertų nuomone, atsižvelgiant į galimus skirtingų energetikos sistemų sąryšius. Tačiau tai leidžia nustatyti tik kritines sistemas ar infrastruktūras. Toks vertinimo metodas neleidžia identifikuoti konkrečių kritinių infrastruktūros elementų, kurių sutrikdytas darbas paveiktų daugelio sistemų darbą. Taip pat vertinant nėra imituojamas sistemų darbas.

Antrasis tipas - topologinis energetikos kritiškumo vertinimas. Tai labiausiai paplitusi energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimo metodų grupė. Šiais metodais gerai imituojami skirtingo tipo sistemų ir infrastruktūrų elementų sąryšiai. Tačiau šie metodai nustato pavienius kritinius elementus atsižvelgiant tik į sistemų topologiją. Šis vertinimo metodas neatsižvelgia į visos sistemos funkcinį darbą (tarp infrastruktūros elementų arba tarp sistemų). Taip pat vertinant nėra imituojamas sistemų darbas, kuris atspindėtų adaptyvių sistemų darbo

pobūdį. Dažniausiai šis vertinimo metodas pritaikomas nemišrioms sistemų infrastruktūroms vertinti.

Trečiasis tipas, deterministinis energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimas, yra retai taikomas dėl didelio sistemų elementų skaičiaus, kai galimų kritinių elementų ir jų grupių kombinacijų skaičius elementų perrinkimo būdu didėja eksponentiškai. Šis vertinimo metodas leidžia nustatyti pagrindinius kritinius elementus (arba nedaug jų kombinacijas). Taip pat šis metodas įvertina elementų ar jų grupių kritiškumą ne į konservatyvaus vertinimo pusę.

Ketvirtasis tipas, stochastinis globalus energetikos ypatingos svarbos infrastruktūros kritiškumo vertinimas, atsižvelgiant į sistemos elementų patikimumo charakteristikas, leidžia įvertinti tik energetikos ypatingos svarbos infrastruktūros (vieno tipo sistemos) globalų kritiškumą, atsižvelgiant į dirbtinai pašalinamų infrastruktūros elementų skaičių, ir neleidžia įvertinti kiekvieno infrastruktūrų elemento ar konkrečios elementų kombinacijos kritiškumo lygio.

Išanalizavus tam tikrų metodų, taikomų energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumui vertinti, grupes, galima daryti išvadą, kad pagrindinis šių metodų trūkumas yra tai, jog dažniausiai šie metodai yra skirti tik vieno tipo infrastruktūros kritiškumui vertinti (homogeninės sistemos) ir vienos energetikos sistemos nėra susietos su kitomis energetikos sistemomis. Vertinant infrastruktūrų elementų kritiškumą nėra pereita prie visiškai atsitiktinio sistemų darbo modelio, o tai duoda mažesnę infrastruktūrų elementų kritiškumą, negu jis iš tikrųjų yra realioje sistemoje. Todėl būtina sukurti tokią energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimo metodiką, kuria būtų galima:

- modeliuoti ne tik procesus, vykstančius energetikos sistemose, bet ir esančius sąryšius tarp mišrių sistemų;
- įvertinti bet kurio infrastruktūrų elemento kritiškumą, atsižvelgiant į visų sistemų atsitiktinį darbą, galutinių energijos vartotojų atžvilgiu;
- sudaryti infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelį, kuris leistų klasifikuoti pavienius elementus ar jų kombinacijas pagal jų kritiškumą vartotojų atžvilgiu.

Disertacijos autoriaus indėlis į nagrinėjamą problematiką

Sukurta ir realizuota nauja energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimo metodika, pritaikoma mišrių energetikos sistemų infrastruktūroms vertinti, modeliuojant funkcinis sąryšius tarp infrastruktūrų ir jų elementų. Vertinant energetikos sistemų kritiškumą komponentų lygiu, atsižvelgiama į energetikos sistemų atsitiktinį darbą, o tai leidžia objektyviau nustatyti kritinius elementus ir jų grupes bei išsamiau (atsižvelgiant į sistemų atsitiktinį darbą) kiekybiškai įvertinti šių elementų kritiškumą galutinių vartotojų atžvilgiu. Pasiūlyta elementų kritiškumo vertinimo metrika, papildanti deterministinius vertinimo metodus sistemų atsitiktiniu darbu, ir taip infrastruktūros elementų kritiškumą vertinti sudarytu tikimybinio metodu. Sudaryta metodika leidžia įvertinti kiekvieno infrastruktūros elemento ar jų kombinacijos kritiškumą bei tikimybinio metodu juos klasterizuoti pagal kritiškumo intervalus. Sudarytas kritinių elementų ir jų grupių klasterizavimo metodas leidžia ne tik sugrupuoti elementus (jų kombinacijas) pagal

poveikį energetikos sistemoms, bet ir įvertinti šio poveikio tikimybę. Taip pat sudaryta metodika leidžia įvertinti ir palyginti naujų infrastruktūros projektų įtaką kritiškumui sumažinti.

Įvertintas Lietuvos energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumas naudojant agreguotą jų modelį. Identifikuoti kritiniai elementai ir jų grupės, kurių saugumą ir patikimumą reikėtų padidinti. Taikant minėtą modelį, darbe įvertinta agreguotų Lietuvos energetikos sektoriaus sistemų plėtros scenarijų įtaka YSI kritiškumui.

2 INFRASTRUKTŪROS ELEMENTŲ FUNKCIONALUMO IR KRITIŠKUMO VERTINIMO METODIKA

Visapusiškam energetikos sistemų infrastruktūrų elementų kritiškumo vertinimui turi būti sukurta tokia metodika, kuri leistų nustatyti infrastruktūros sistemų elementus pagal Europos Komisijos direktyvoje 114/08/EC apibrėžtą kritiškumo sąvoką, t. y. infrastruktūros elemento darbo sutrikdymas ar sunaikinimas turės poveikį šalies nacionaliniam ir ekonominiam saugumui, vertinant sąryšius tarp infrastruktūros elementų ir galutinių vartotojų taip pat būtina atsižvelgti ir į bendrą integralių energetikos sistemų atsitiktinį darbą įvertinant jų elementų patikimumą. Energetikos sektoriams modeliuoti taikomi išplėtoti ir gerai žinomi modeliai (Tarvydas, 2005), tokie kaip:

- MESSAGE (angl. *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts*) modelis – skirtas vidutinės ir ilgalaikės trukmės energetikos sistemų raidai modeliuoti (IIASA-ECS, 2011);
- OSeMOSYS (angl. *Open Source Energy Modeling System*) modelis – sukurtas planuoti energetikos sistemas ilgalaikėje perspektyvoje (Howells et al., 2011);
- BALMOREL (angl. *Baltic Model of Regional Energy Market Liberalisation*) modelis – Baltijos jūros šalių elektros ir centralizuoto šilumos tiekimo sistemoms modeliuoti (Ravn, Balmorel, 2001);
- EFOM (angl. *Energy Flow Optimisation Model*) modelis – jo dėka analizuojamas šalies energetikos sektorius (MARKAL, 2001).

Šie energetikos sektorių modeliavimo įrankiai yra ekonominiai, pusiausvyriniai, optimizaciniai, imitaciniai modeliai ir dažniausiai naudojami energetikos sektoriaus plėtrai modeliuoti. Pagrindinis šių modelių optimizavimo kriterijus yra: minimaliais kaštais patenkinti energijos poreikius.

Tokio tipo energetikos sistemų modeliavimo metodai iškeltiems disertacijos uždaviniams įgyvendinti yra netinkami, nes neįvertina atskirų energetikos sistemų elementų įtakos visos sistemos funkcionavimui. Modelių tikslas nėra išmatuoti (įvertinti), kuri energetikos sistemos dalis ir kiek jos netinkamo funkcionavimo turi įtakos vartotojų poreikiams nepatenkinti. Šių modelių prigimtis yra surasti sprendimus, kaip būtų galima užtikrinti vartotojų poreikių patenkinimą. Bandant vertinti atskirų technologijų ar jų grupės įtaką vartotojų energijos poreikiams užtikrinti, greičiau būtų įvertinama kiek pasikeis poreikių užtikrinimo kaina. Šie modeliai nesigilina į fizinę technologijų funkcionavimo prasmę. Be to, praktiškai nėra galimybės į šiuos modelius įtraukti sistemos objektų patikimumo charakteristikas ar atlikti rizikos analizę.

Vienas iš disertacijos iškeltų uždavinių yra nustatyti energetikos sistemų kritinius elementus. Siekiant nustatyti, ar energetikos sistemų elementas yra kritinis, pirmiausia reikia įvertinti jo kritiškumą. Tam būtina sudaryti:

- Matavimo sistemą, kuri įvertintų kiekvieno energetikos sistemų elemento kritiškumą;
- Metodiką, kuri leistų palyginti elementų kritiškumą;
- Kritiškumo kriterijus, kurie leistų identifikuoti kritinius sistemų elementus.

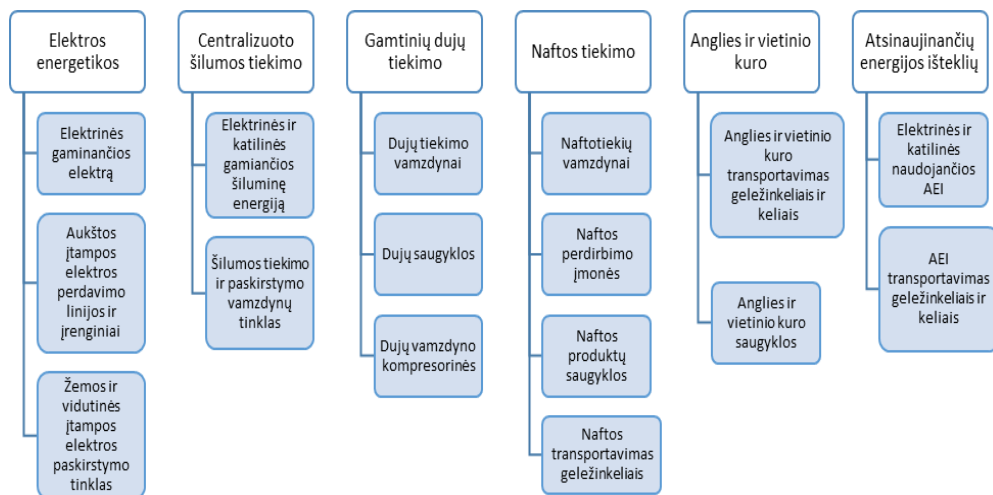
Taigi, reikia suformuluoti ir apibrėžti infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo metodiką (sistemų objektų lygiu), kuri būtų pagrįsta imitaciniais energetikos sistemų darbo modeliavimais. Infrastruktūrų elementų imituojamas darbas turi būti išreiškiamas funkciniu priklausomumu, tai yra nuo pradinių įeities duomenų. Tokia sukurta metodika turi leisti įvertinti energetikos sistemų elementų ir jų grupių kritiškumą tiek deterministiniais, tiek tikimybiniais metodais. Taip pat pagal šią metodiką būtų galima atlikti palyginamąją analizę, įtraukiant naujus energetikos sistemų elementus, ir palyginti jų efektyvumą sistemų kritiškumo atžvilgiu. Šioje disertacijoje pristatoma sukurta nauja energetikos sistemų infrastruktūros (objektų lygiu) kritiškumo vertinimo metodika, išsamiai aprašyta šiame skyriuje.

2.1 Infrastruktūros elemento kritiškumo vertinimas

Šalies energetikos sektorius gali būti sudarytas iš skirtingų sistemų, atsižvelgiant į tos šalies geografinę padėtį. Tačiau bet kurios sistemos infrastruktūra suprojektuota taip, kad būtų užtikrinamai patenkinami šalies vartotojų poreikiai (dažniausiai projektuojant atsižvelgiama į $N-1$ kriterijų). Infrastruktūra gali būti globali, tuo atveju, kai integrali infrastruktūra yra išsidėsčiusi po visą šalies teritoriją ir gali patenkinti bet kurio šalies vartotojo poreikius, pvz., elektros energetikos sistema. Taip pat infrastruktūra gali būti lokali, skirta patenkinti vartotojų poreikius tik tam tikrame regione, pvz., šalies miestų centralizuoto šilumos tiekimo sistemos. Energetikos sistemos yra kompleksinės, turinčios pakankamai rezerviniu pajėgumų arba alternatyvių technologijų, galinčių pakeisti ir perimti darbą elemento gedimo atveju. Atsižvelgiant į geografinę padėtį, šalies energetika gali apimti tarpusavyje susijusias energetikos sistemas:

- Elektros energetikos;
- Centralizuoto šilumos tiekimo;
- Gamtinių dujų;
- Naftos;
- Anglių ir vietinio kuro;
- Atsinaujinančių energijos išteklių.

Kiekvieną energetikos sistemos infrastruktūrą sudaro visuma įmonių ir įrenginių, kurie skirti įvairių energijos išteklių gavybai, gamybai, transformavimui, perdavimui, skirstymui ir vartojimui. Energetikos sistemų struktūros pavyzdys pateikiamas 2.1 pav.

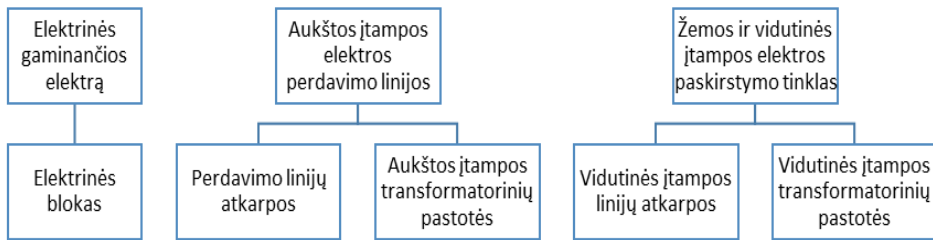


2.1 pav. Energetikos sistemų struktūra objektiniu lygiu

Dažnai pasitaiko, kad prie nagrinėjamų energetikos sistemų prijungiama ir vandens tiekimo sistema (Theoharidou et al., 2010; Wang et al., 2012; Cagno et al., 2011).

Energetikos sektorius laikomas vienas kompleksiškesniųjų, dėl esančių sąryšių tarp visų sistemų sudėtingos konfigūracijos ir automatinio valdymo. Sąryšiai tarp sistemų yra tiek fiziniai, pvz., šalies elektros energijos tiekimo linijų tinklas sujungtas su gamybos šaltiniais ir regionų paskirstymo tinklais, tiek funkciniai, pvz., termofikacinė elektrinė, kuri sujungia dujotieki, centralizuoto šilumos tiekimo tinklą ir elektros perdavimo tinklą, transformuodama pirminę energiją (gamtinės dujas) į šilumos ir elektros energiją, kuri tiekama vartotojams. Taip pat tarp energetikos sistemų yra ir grįžtamieji sąryšiai, pvz., gamtinių dujų tiekimas elektrinėms, kad gamintų elektros energiją, kuri atitinkamai reikalinga gamtinių dujų perdavimo sistemos tinkamam funkcionavimui.

Energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo modelio tikslas yra įvertinti kritiškumą kiekvieno (fizinio) infrastruktūros elemento, pagrįsto modeliuojant pagrindinių energijos rūšių (elektros ir šilumos energijos, kuro) tiekimą vartotojams pagal poreikį. Elemento kritiškumu įvertinami ir esantys energetikos sistemų sąryšiai. Todėl vertinimo modelyje sistemų infrastruktūros yra išskaidomos objektiniu lygiu. Vertinimo rezultatai labai priklauso nuo infrastruktūrų skaidymo detalumo. Kuo smulkiau išskaidyta infrastruktūra jos elementais, tuo sudėtingesniu tampa kritiškumo vertinimas ir toks modelis reikalauja daugiau išteklių. Pavyzdžiui pateikiamas elektros energetikos sistemos detalus išskaidymas jos elementais, naudojamas kritiškumui vertinti (2.2 pav.).

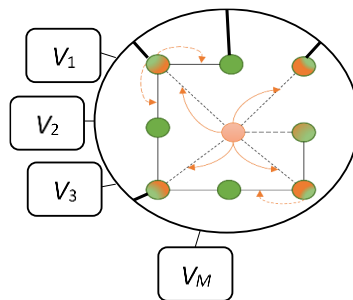


2.2 pav. Elektros energetikos sistemos infrastruktūros (objektiniu lygiu) skaidymas elementais

Energetikos sistemos infrastruktūros elementas – didžiausias fizinis objektas, esantis infrastruktūros grandyje. Todėl, atsižvelgiant į sistemų infrastruktūros detalų skaidymą elementais, vertinimo modelyje galima turėti N -matę elementų aibę. Pažymėkime ją $\mathcal{K} : \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_N\}$.

Vertinimo modelyje tarp infrastruktūros elementų yra sudaromi funkciniai sąryšiai, imituojantys sistemos darbą. Pavyzdžiui, gamtinių dujų tiekimo sistema sudaryta iš dujotiekio atkarpų (elementų), kur kiekvienos dujotiekio atkarpos pralaidumas priklauso nuo ją jungiančių kitų atkarpų perduodamo gamtinių dujų srauto. Sąryšiai tarp tos pačios infrastruktūros elementų ir tarp skirtingų sistemų infrastruktūros elementų išreiškiami per elementų funkcionalumą vienas su kitu.

Dažniausiai energetikos sistemų sąryšiai (objektiniu lygiu) vaizduojami tinklinėmis sistemomis (2.3 pav.), kur į vieną bendrą tinklinę sistemą sujungiami visų sistemų elementai kartu su galutiniais vartotojais.



2.3 pav. Energetikos sektoriaus tinklinis modelis

Energetikos sistemų infrastruktūros elementų funkcionalumas vertinamas atsižvelgiant į elementų tarpusavio techninius sąryšius. Infrastruktūros elemento funkcionavimas priklauso ne tik nuo jo patikimumo charakteristikų, bet ir nuo pagal pareikalavimą tiekiamos produkcijos iš kitų infrastruktūros elementų. Elementų funkcionalumas gali būti apibūdinamas dviem būdais:

- elemento funkcionalumą galima apibūdinti kiek kiekybiškai i -asis elementas galėtų patenkinti kitų sistemos elementų poreikius.
- elemento techninį funkcionalumą būtų galima apibūdinti kaip gebėjimą patenkinti i -ojo elemento faktinį poreikį. Tai yra išreiškama procentais. Šio tipo elemento funkcionalumas nurodo, kokia yra techninė galimybė i -ajam elementui patenkinti poreikį.

Bent vieno infrastruktūros elemento funkcionalumo sumažėjimas gali paveikti kitų elementų (nebūtinai tos pačios sistemos) funkcionavimą. Taigi, šis elementų funkcionavimo vertinimas yra atliekamas atsižvelgiant į visos energetikos sistemos ar atskirų jos elementų funkcionavimą.

Bet kurio infrastruktūros elemento funkcionalumą galima įvertinti vieningu matu, t. y. megavatvalandėmis (MWh). Taigi, i -ojo elemento funkcionalumas f ir techninis elemento funkcionalumas fT (tuo atveju, kai k -asis elementas yra sugedęs) gali būti įvertinamas atsižvelgiant į kitų sistemos elementų poreikius, pasinaudojant išraiškėmis

$$f_i^k(t) = 1 - \frac{\sum_{j=1, j \neq i, k}^N D_{ji}(t) - \sum_{j=1, j \neq i, k}^N S_{ij}(t)}{\sum_{j=1, j \neq i, k}^N D_{ji}(t)}, \quad i = 1, \dots, N; \quad (2.1)$$

ir

$$fT_i^k(t) = 1, \quad D_{ji}(t) \leq TechA_{ij}(t); \quad (2.2)$$

arba

$$D_{ji}(t) \leq TechA_{ij}(t), \quad i = 1, \dots, N; \quad (2.3)$$

čia (k) – k -asis indeksas reiškia, kad k -asis elementas yra sugedęs; $D_{ij}(t)$ – laikotarpiu t i -ojo elemento produkcijos poreikio kiekis j -ajam elementui; $S_{ij}(t)$ – laikotarpiu t galimas i -ojo elemento produkcijos kiekio tiekimas j -ajam elementui; $TechA_{ij}(t)$ – laikotarpiu t i -ojo elemento gebėjimas patenkinti j -ojo elemento poreikį.

Ne visi energetikos sistemų elementai vienodai reikšmingi (svorį integralioje sistemoje), todėl elementai galėtų būti klasifikuojami pagal aptarnaujančių vartotojų skaičių. Tiekėjas, kuris turi didžiausią vartotojų skaičių (gali būti tarpiniai infrastruktūros elementai, vartotojai), įgyja didžiausią svertinį koeficientą ir i -ojo elemento svertinis koeficientas žymimas α_i , šie koeficientai turi tenkinti sąlygą

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1. \quad (2.4)$$

Tuo atveju, kai pagal svarbumą energetikos sistemų elementai yra ekvivalentūs, svertinis koeficientas bus lygus $\alpha_i = 1 / N$, N – tiekėjų skaičius (energetikos sistemos elementų skaičius).

Tuomet energetikos sistemos funkcinis rodiklis gali būti apskaičiuojamas pagal formulę

$$Sf^k(t) = \sum_{i=1}^N f_i^k(t) \cdot \alpha_i, \quad i = 1, \dots, N; \quad (2.5)$$

čia $f_i^k(t)$ – i -ojo elemento funkcionalumo įvertinimas; α_i – i -ojo elemento svertinis koeficientas.

Energetikos sistemų modeliavimo tikslas yra užtikrinti galutinių vartotojų poreikių patenkinimą. Galima apibrėžti infrastruktūros elementų kritiškumo sąvoką ir matavimą.

Kritišku infrastruktūros elementu vadinsime tą atvejį, kai infrastruktūros elemento funkcinis darbas yra visiškai sustabdomas (elementas yra išjungiamas) ir dėl šio elemento darbo sutrikdymo adaptyvios energetikos sistemos tinkamai nefunkcionuoja, t. y. iš dalies arba/ir visiškai nėra patenkinami bet kurių galutinių vartotojų poreikiai. Infrastruktūros elementas nebus kritiškas tuo atveju, kai to infrastruktūros elemento funkcinis darbas yra visiškai sustabdomas (elementas yra išjungiamas) ir dėl šio elemento darbo sutrikdymo adaptyvios energetikos sistemos tinkamai funkcionuoja ir yra visiškai patenkinami visų galutinių vartotojų poreikiai. Bet kurios energetikos sistemos galutinių vartotojų poreikius galima įvertinti vieningu matu, t. y. energijos megavatvalandėmis (MWh).

Sudėtinga sudaryti algebrinį matematinį infrastruktūros elemento kritiškumo vertinimo modelį, todėl infrastruktūros elemento kritiškumui įvertinti yra sudaryta metodika, pagrįsta energetikos sistemų modeliavimu.

Bendruoju atveju k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumą per laiko vienetą momentu t galutinių vartotojų atžvilgiu būtų galima įvertinti pagal formules:

$$c^k(t) = 1 - \sum_{i=1}^M \frac{S_i^k(t)}{V_i(t)} \beta_i(t), \quad 0 \leq c^k(t) \leq 1; \quad (2.6)$$

$$\beta_i(t) = \frac{V_i(t)}{\sum_{j=1}^M V_j(t)}; \quad (2.7)$$

čia $V_i(t)$ – i -ojo vartotojo energijos poreikis (MWh) per laiko vienetą laikotarpiu t ; $S_i^k(t)$ – i -ojo vartotojo gaunamas energijos kiekis (MWh) per laiko vienetą sistemoje išjungus k -ąjį elementą momentu t ; $\beta_i(t)$ – i -ojo vartotojo svorio koeficientas.

Infrastruktūros k -asis elementas yra laikomas kritišku, jei $c^k(t) > 0$. Pavyzdžiui, kai $c^k(t) = 1$, tai reiškia, kad laiko momentu t sutrikus k -ojo elemento darbui, visų energetikos sistemų darbas sutrinka, galutinių vartotojų poreikiai visiškai nėra patenkinami; tarkime jei elemento kritiškumas $c^k(t) = 0,35$, tai reiškia, kad laiko momentu t sutrikus k -ojo elemento darbui ir galutinių energijos vartotojų poreikiai yra 35 % neužtikrinti nagrinėjamos sistemos atžvilgiu. Panašų poveikio įvertinimą vartotojams naudojo autoriai P. Trucco su bendraautoriais (Trucco, Cagno ir De Ambroggi, 2012), neišskiriant vartotojų grupių.

Infrastruktūros elementų kritiškumą aibė \mathbb{C} sudaroma vertinant kiekvieno iš eilės infrastruktūros elemento kritiškumą pagal (2.6) formulę. Turint infrastruktūrą, sudarytą iš N elementų, ir vertinant po vieną infrastruktūros elemento kritiškumą, yra sudaroma šių elementų kritiškumą aibė \mathbb{C}^1 ((2.8) išraiška), kurios elementai yra kritiškumo reikšmės, dirbtinai pašalinant iš eilės visus infrastruktūros elementus.

$$\mathbb{C}^1 := \{c^1; c^2; c^3; \dots; c^N\}. \quad (2.8)$$

Vertinant infrastruktūros elementų kritiškumą, kai vienu metu dirbtinai iš eilės pašalinami du infrastruktūros elementai, yra sudaroma šių porų kritiškumų aibė \mathbb{C}^2 . Turint infrastruktūrą, sudarytą iš N elementų, jų porų kritiškumų aibę būtų galima suformuoti taip:

$$\mathbb{C}^2 := \{c^{1,2}; c^{1,3}; \dots; c^{2,1}; c^{2,2}; \dots; c^{k,1}; c^{k,2}; \dots; c^{N-2,N-1}; c^{N-2,N}; c^{N-1,N}\}. \quad (2.9)$$

Vertinant infrastruktūros elementų kritiškumą, kai vienu metu dirbtinai iš eilės pašalinami trys infrastruktūros elementai, yra sudaroma šių elementų, išjungiant po tris, kritiškumų aibė \mathbb{C}^3 . Pavyzdžiui, turint infrastruktūrą, sudarytą iš N elementų, jų porų kritiškumų aibę būtų galima aprašyti taip:

$$\mathbb{C}^3 := \{c^{1,2,3}; c^{1,2,4}; c^{1,2,5}; \dots; c^{2,3,4}; c^{2,3,5}; \dots; c^{k,k+1,k+2}; c^{k,k+1,k+3}; \dots; c^{N-3,N-2,N-1}; c^{N-3,N-1,N}; c^{N-2,N-1,N}\}. \quad (2.10)$$

2.2 Priimtino kritiškumo lygio nustatymas

Šiame skyriuje aptariami iškilę klausimai dėl priimtino elementų kritiškumo lygio (kritiškumo slenkščio), jo įvertinimo ir panaudojimo galimybių. Kadangi ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimo tematika yra ganėtinai nauja (palyginus su tikimybine saugos analize), apžvelgiant literatūrą buvo pastebėta, kad apie elementų kritiškumo įvertinimą nėra atlikta daug tyrimų ar išplėtotų metodikų. Taip pat nėra sukurta struktūrizuota procedūra, leidžianti priskirti infrastruktūros elementus kritinių elementų grupei (aibei) pagal šių elementų kritiškumo įverčius. Vienas tokių būdų - galima įvesti priimtina τ kritiškumo lygį (kritiškumo slenkstį), kaip yra atlikta atominių elektrinių saugos analizėje, kur yra įvestas saugos kriterijus. Tai leistų infrastruktūros elementus klasifikuoti pagal jų kritiškumo lygį ir identifikuoti kritinius elementus, kurių kritiškumo lygis viršytų priimtina τ kritiškumo lygį. Tačiau iškyla klausimas, kaip būtų galima nustatyti tokį priimtina kritiškumo lygį, jeigu infrastruktūros elementas įgyja tam tikrą, ne nulinį kritiškumą, tai parodo, kad tam tikroje energetikos sistemoje yra neužtikrinami vartotojų energijos poreikiai.

Vienas būdų, kaip būtų galima nustatyti tokį τ kritiškumo lygį, tai įvertinti jį iš pačios sistemos. Analizuojamoje energetikos infrastruktūrų sistemoje įvertinus kiekvieno elemento kritiškumą būtų galima išvesti priimtina kritiškumo slenkstį, pavyzdžiui, vidutinį visų elementų kritiškumo lygį, pašalinant tuos atvejus, kai elemento kritiškumas yra nulinis.

Kitas būdas, kaip būtų galima nustatyti priimtina τ kritiškumo lygį, yra atlikti didesnio skaičiaus panašių energetikos sistemų (pasirenkant geriau išsivysčiusių šalių energetikos sistemas) elementų kritiškumo analizių ir išvesti vidutinį šių sistemų elementų kritiškumo lygį, kuris būtų siekiamas τ kritiškumo lygis. Tokiais panašiais būdais buvo suformuluoti saugos kriterijai atominėms elektrinėms, taip pat „SEVESO I, II ir III“ direktyvos chemijos pramonei.

Reikėtų paminėti ir tai, kad priimtinas τ kritiškumo lygis gali skirtis analizuojant skirtingo tipo energetikos sistemas. Taip pat šis kritiškumo lygis turėtų būti skirtingas ir analizuojant infrastruktūros elementų kombinacijų kritiškumą. Pavyzdžiui, analizuojant po vieną infrastruktūros elementą priimtinas kritiškumo lygis turėtų būti

nedidelis, palyginus su atvejais, kai yra vertinamos elementų porų po du arba tris kombinacijos.

Tokią, nedidelio priimtino kritiškumo lygio, parinkimą, kai vertinama po vieną elementą, nulemia tai, kad gedimo (sugadinimo) tikimybė vieno atskiro infrastruktūros elemento yra kur kas didesnė, palyginti su kelių elementų kombinacijos gedimo tikimybe. Todėl ir atskiro elemento priimtinas kritiškumo lygis turėtų būti sąlyginai nedidelis, taip leidžiant energetikos sistemose identifikuoti įtaką vartotojų poreikiams užtikrinti turinčius elementus. Analizuojant grupės elementų kritiškumą priimtinas kritiškumo lygis turėtų būti didesnis.

Disertaciniame darbe priimtino kritiškumo lygio (rekomenduotinam) parinkimui buvo panaudoti užsienio valstybių energetikos sistemas reglamentuojantys dokumentai (Republic of Latvia, 2011) ir disertaciniame darbe gauti rezultatai (pateikti 3.2 skyriuje).

Disertacijos rengimo eigoje, analizuojant gautus energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo rezultatus, buvo nustatyta, kad didžiausią įtaką vartotojų poreikiams užtikrinti turi gamtinių dujų tiekimo sistemos infrastruktūros elementai.

Dažniausiai kiekvienoje energetikos sistemoje vartotojai yra skirstomi į kategorijas, pagal energijos tiekimo ir užtikrinimo svarbą. Vienas tokių energijos tiekimo užtikrinimo pavyzdžių pateikiamas Latvijos Respublikos energetikos sistemas krizės metu reglamentuojančiame dokumente, kuriame išskirti trys energetikos krizės lygiai ir trys vartotojų grupės. Šiame dokumente pateikiamos procedūros, pagal kurias vartotojų grupėms tiekama energija, esant atitinkamam energetikos krizės lygiui: Pirmasis, antrasis ir trečiasis energetikos krizės lygmenys yra, kai energijos tiekimo užtikrinimas yra sumažėjęs 12-17 % bei daugiau kaip 17 % atitinkamai nuo vidutinio dienos energijos suvartojimo.

Agreguotuose energetikos sistemų modeliuose sudėtinga išskirti konkrečias energijos vartotojų grupes. Esant pirmam krizės lygiui pagal šio dokumento siūlomas procedūras, kai analizuojamos visos vartotojų grupės, vidutiniškai energijos tiekimas vartotojams yra sumažinamas apie 6 % (nuo poreikio), esant antram krizės lygiui apie 53 % (nuo poreikio) ir esant trečiam krizės lygiui apie 73 % (nuo poreikio).

Pasinaudojant Latvijos Respublikos pateiktu energijos tiekimo vartotojams krizės metu reglamentuotu dokumentu buvo parinkti pirminiai (rekomenduotini) priimtino kritiškumo lygio slenksčiai.

Analizuojant energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą siūloma naudoti tokius priimtino kritiškumo lygio slenksčius: kai yra vertinama po vieną infrastruktūros elementą, tai priimtinas kritiškumo slenkstis yra 0,1 (t. y. nepatiekta energijos 10 % nuo vartotojų poreikio); kai nagrinėjamos poros po du infrastruktūros elementus (kai abu sugenda vienu metu), tai priimtinas kritiškumo slenkstis yra 0,5 (50 % nuo poreikio), kai analizuojamos poros po tris infrastruktūros elementus (kai trys elementai sugenda vienu metu), tai priimtinas kritiškumo slenkstis yra 0,6 (60 % nuo poreikio). Visi elementai po vieną, po du ar tris, kurių kritiškumas yra didesnis už atitinkamą kritiškumo slenkstį, nagrinėjamos sistemos atžvilgiu yra laikomi kritiniais.

Įvedus priimtina τ kritiškumo lygį galima vertinti (analizuoti) įvairius

infrastruktūros saugumo užtikrinimo scenarijus, kurie sumažintų sistemos kritiškumą iki priimtino lygio. Toliau iš atrinktų tokių scenarijų įvairūs ekspertai ekonomistai arba technologai galėtų išrinkti pigiausių arba patikimiausių infrastruktūros saugumo plėtros scenarijų.

2.3 Deterministinis energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis

Analizuodami bendrą energetikos sistemų infrastruktūrą, kuri dažniausiai įvardijama kaip kompleksinė ir tinklinės struktūros, panagrinėsime sistemą, sudarytą iš N elementų ir M galutinių vartotojų. Tarkime, kad šie elementai vienaip ar kitaip yra tarpusavyje priklausomi (tos pačios sistemos, skirtingų sistemų elementai arba galutiniai vartotojai). Sistemos elementus, kaip pvz., dujotiekio vamzdynų atkarpos, termofikacinės elektrinės, aukštos įtampos linijų atkarpos ar vartotojai bei tarp sistemos elementų egzistuojančius sąryšius (fizinius, funkcinius, loginius priklausomumus) galima aprašyti orientuotu grafu

$$G = (\mathcal{V}, \mathcal{B}, s(\cdot), t(\cdot)); \quad (2.11)$$

čia \mathcal{V} – viršūnių aibė, \mathcal{B} – briaunų aibė, $s(\cdot)$ ir $t(\cdot)$ – briaunų susiejimo su atitinkamomis jų pradžiomis ir pabaigomis atvaizdo funkcijos.

Taip pat tarkime, kad visi sistemos elementai tarpusavyje yra susieti ir sistemoje nėra elementų, kurie nebūtų susieti su kitais sistemos elementais. Kitaip tariant, turimo grafo viršūnių laipsniai yra $S(i) \geq 1$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Pažymėkime energetikos sistemų infrastruktūros elementų aibę $\mathcal{K} : \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_N\}$. Per egzistuojančius sąryšius sistemoje vieno elemento gedimas (nefunkcionavimas) gali turėti įtakos kitų elementų funkcionavimui.

Siekiant nustatyti energetikos sistemų infrastruktūros kritiškus elementus pirminėje atrankos dalyje, reikėtų atlikti kiekvieno infrastruktūros elemento kritiškumo įvertinimą deterministiniu sistemos atžvilgiu. Tokios sistemos elementų vertinimas nėra konservatyvus, tačiau paprastas metodo pritaikomumas leidžia greitai identifikuoti kritiškus sistemos elementus vartotojų atžvilgiu. Deterministinis požiūris pasižymi tuo, jog naudojamas matematinis modelis ir elementų būseną yra vienareikšmiškai žinoma. Priimama prielaida, kad infrastruktūros elementai yra visiškai patikimi ir gali tinkamai funkcionuoti, t. y. jų gedimo tikimybės $p_i = 0$. Elementų kritiškumo vertinimas atliekamas dirbtinai pašalinus po vieną visus infrastruktūros elementus: dujotiekio vamzdyno atkarpas, perdavimo linijas, šilumines katilines ir kt. ir analizuojant jų poveikį sistemos darbui galutinių vartotojų atžvilgiu, kai likę sistemos elementai funkcionuoja patikimai. Tokių vertinimo kombinacijų skaičius bus lygus infrastruktūros elementų skaičiui. Dirbtinai pašalinto k -ojo elemento kritiškumas įvertinamas (2.6) formule. Taigi, elementų pašalinimų įvykiai yra nesutaikomi, t. y. vienu metu pašalinamas tik vienas infrastruktūros elementas, visi kiti infrastruktūros elementai yra veikiantys. Dirbtinai pašalinto elemento (jų grupės) kritiškumas pasireiškia per galutinių vartotojų energijos poreikių patenkinimo lygį. Pašalinus k -ąjį elementą laiko momentu t , jeigu adaptyvios energetikos sistemos visiškai funkcionuoja ir yra patenkinami visų vartotojų energijos

poreikiai, tai tokio elemento kritiškumas yra $c^k(t) = 0$. Kitu atveju, jeigu adaptyvių energetikos sistemų darbas yra sutrikdytas ir visų vartotojų energijos poreikiai yra visiškai nepatenkinami, tai tokio, dirbtinai pašalinto, k -ojo elemento kritiškumas yra $c^k(t) = 1$. Jeigu pašalintas infrastruktūros elementas sutrikdo adaptyvių energetikos sistemų darbą ir vartotojų energijos poreikiai yra iš dalies patenkinami, tai tokiu atveju atitinkamai k -ojo elemento kritiškumas įgyja reikšmes iš intervalo $[0, 1]$.

Įvertinus kiekvieno infrastruktūros elemento kritiškumą yra sudaroma jų kritiškumo aibė \mathbb{C}^1 (2.8). Kritiniu infrastruktūros elementu atrenkamas toks elementas, kurio kritiškumas, vertinamos sistemos galutinių vartotojų atžvilgiu, yra didesnis už pasirinktą kritiškumo lygį τ (kai $0 < \tau \leq 1$):

$$c^k(t) \geq \tau, k = 1, 2, \dots, N; 0 < \tau \leq 1, c^k(t) \in \mathbb{C}_\tau^1. \quad (2.12)$$

Toks kritinis elementas bus vadinamas τ lygio kritiniu infrastruktūros elementu. Taip yra sudaroma τ lygio kritinių infrastruktūros elementų aibė $\tilde{\mathbb{C}}_\tau^1$, kuri sudaryta iš ranguotų, didėjimo tvarka, τ lygio kritinių infrastruktūros elementų

$$\tilde{\mathbb{C}}_\tau^1 := \{c_1^{k_1}(t); c_2^{k_2}(t); c_3^{k_3}(t); \dots; c_j^{k_j}(t); \dots; c_m^{k_N}(t)\}, 1 \leq k_i \leq N; \quad (2.13)$$

čia j – elemento pozicija ranguojoje kritinių elementų aibėje, $j = 1, 2, \dots, m$; k – dirbtinai išjungto infrastruktūros elemento numeris orientuotame grafe, $k = 1, 2, \dots, N$.

Be to, pažymėsime, kad $c(t)_{\min} = c_1^{k_1}(t)$, $c(t)_{\max} = c_m^{k_N}(t)$. Tokiu infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo būdu galima nesudėtingai identifikuoti tik pavienius kritinius elementus.

Kitame deterministinio infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo etape analizuojamos elementų poros po du (visos sistemos analizuojamos $N-2$ principu), įvertinamas tokios elementų poros kritiškumas galutinių vartotojų atžvilgiu. Taip pat daroma prielaida, kad dirbtinai pašalinus elementų porą k_i, k_j , likę infrastruktūros elementai funkcionuoja patikimai. Tokių vertinimo kombinacijų skaičius bus lygus

derinių skaičiui $N^* = \binom{N}{2} = \frac{N \cdot (N-1)}{2}$. Pavyzdžiui, jeigu turime infrastruktūrą,

sudarytą iš 157 elementų, tai nagrinėjamų infrastruktūros porų po du skaičius bus

$$\text{lygus } \binom{157}{2} = 12246.$$

Dirbtinai pašalintos elementų poros k_i, k_j kritiškumas įvertinamas (2.6) formule. Taigi, elementų porų pašalinimų įvykiai yra nesutaikomi, t. y. vienu metu pašalinama tik viena pora po du infrastruktūros elementus.

Įvertinus kiekvienos infrastruktūros elementų poros kritiškumą sudaroma jų kritiškumo aibė \mathbb{C}^2 . Iš pastarosios atrenkami τ lygio kritinių porų elementai ir sudaroma jų aibė $\tilde{\mathbb{C}}_\tau^2$:

$$c^{k_i, k_j}(t) \geq \tau, c^{k_i, k_j}(t) > \max_{1 \leq k_i \leq k_j \leq N} \{c^{k_i}(t), c^{k_j}(t)\}; \quad (2.14)$$

$$c^{k_i}(t) \cap c^{k_l}(t) \in \tilde{\mathcal{C}}_\tau^1, c^{k_i, k_l}(t) \in \mathcal{C}_\tau^2, 0 < \tau \leq 1, 1 \leq k_i \leq k_l \leq N;$$

$$\tilde{\mathcal{C}}_\tau^2 := \{c_1^{k_1, k_2}(t); \dots; c_j^{k_i, k_l}(t); \dots; c_m^{k_{N-1}, k_N}(t)\}, 1 \leq k_i \leq k_l \leq N. \quad (2.15)$$

Kritinių elementų aibės $\tilde{\mathcal{C}}_\tau^2$ elementai ranguoti didėjimo tvarka. Šią kritinių elementų aibę sudaro tokios naujų kritinių elementų kombinacijos, po du infrastruktūros elementus, kurios nepasitaikė aibėje $\tilde{\mathcal{C}}_\tau^1$. Taip pat gali susidaryti ir tokios elementų kombinacijos, kai bent vienas infrastruktūros elementas yra atrinktas kaip kritinis aibėje $\tilde{\mathcal{C}}_\tau^1$. Tokiu atveju įtraukiamos į aibę $\tilde{\mathcal{C}}_\tau^2$ tik tos elementų kombinacijos, kai jų kritiškumas yra didesnis už kritiškumą elementų, kurie yra atrinkti į aibę $\tilde{\mathcal{C}}_\tau^1$.

Kitame deterministinio infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo etape analizuojamos elementų kombinacijos po tris elementus iš eilės, dirbtinai pašalinant vienu metu visas galimas kombinacijas tarp visų energetikos sistemų infrastruktūros elementų, ir įvertinamas tokios elementų kombinacijos po tris elementus kritiškumas galutinių vartotojų atžvilgiu. Taip pat daroma prielaida, kad dirbtinai pašalinus elementų kombinaciją po tris elementus k_i, k_l, k_r , likę infrastruktūros elementai funkcionuoja patikimai. Tokių vertinimo kombinacijų skaičius bus lygus derinių

skaičiui $N^{**} = \binom{N}{3} = \frac{N \cdot (N-1) \cdot (N-2)}{6}$. Pavyzdžiui, jei turime infrastruktūrą, sudarytą iš 157 elementų, tai nagrinėjamų infrastruktūros kombinacijų po tris elementus skaičius bus lygus $\binom{157}{3} = 632710$. Galimų kombinacijų skaičius yra pakankamai didelis.

Dirbtinai pašalintos elementų kombinacijos po tris elementus k_i, k_l, k_r kritiškumas įvertinamas (2.6) formule. Taigi, elementų kombinacijų po tris elementus pašalinimų įvykiai yra nesutaikomi, t. y. vienu metu pašalinama tik viena kombinacija po tris infrastruktūros elementus. Įvertinus kiekvienos infrastruktūros elementų kombinacijos po tris elementus kritiškumą, sudaroma jų kritiškumo aibė \mathcal{C}^3 . Iš pastarosios atrenkami τ lygio kritinių kombinacijų po tris elementus elementai ir sudaroma jų aibė $\tilde{\mathcal{C}}_\tau^3$

$$\begin{aligned} c^{k_i, k_l, k_r}(t) &\geq \tau, \\ c^{k_i, k_l, k_r}(t) &> \max_{1 \leq k_i \leq k_l \leq k_r \leq N} \{c^{k_i}(t), c^{k_l}(t), c^{k_r}(t), c^{k_i, k_r}(t), c^{k_l, k_r}(t)\}, \\ c^{k_i}(t) \cap c^{k_l}(t) \cap c^{k_r}(t) &\in \tilde{\mathcal{C}}^1, \\ c^{k_l, k_r}(t) \cap c^{k_i, k_l}(t) \cap c^{k_i, k_r}(t) &\in \tilde{\mathcal{C}}^2, \\ c^{k_i, k_l, k_r}(t) &\in \mathcal{C}^3, \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$0 < \tau \leq 1, 1 \leq k_i \leq k_l \leq k_r \leq N;$$

$$\tilde{C}^3 := \{c_1^{k_1, k_2, k_3}(t); \dots; c_j^{k_i, k_l, k_r}(t); \dots; c_{m_2}^{k_{N-2}, k_{N-1}, k_N}(t)\}, \quad (2.17)$$

$$1 \leq k_i \leq k_l \leq k_r \leq N;$$

čia j – elemento pozicija ranguoje kritinių elementų aibėje $j = 1, 2, \dots, m_2$; k – dirbtinai išjungto infrastruktūros elemento numeris orientuotame grafe $k = 1, 2, \dots, N$.

Tokiu deterministiniu infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo metodu nustatoma didžioji dauguma unikalių kritiškiausių elementų kombinacijų ir įvertinamas šių kombinacijų kritiškumas. Būtų galima šį deterministinį kritiškumo vertinimo algoritmą tęsti nagrinėjant kombinacijas infrastruktūros elementų po keturis, vėliau ir po daugiau, dirbtinai pašalinant elementų visas galimas kombinacijas, tačiau toks vertinimo skaičiavimų skaičius yra sunkiai įgyvendinamas. Visos galimos kombinacijos yra $N!$ Pavyzdžiui, jei turime infrastruktūrą, sudarytą iš 157 elementų, tai galimų atvejų skaičius $157! = 1,17 \cdot 10^{278}$.

Nagrinėjant infrastruktūrų elementų kritiškumą deterministiniu metodu dirbtinai pašalinant elementus iš sistemų (po vieną, po du, po tris) yra nustatoma didžioji dauguma kritinių elementų. Dėl to toks vertinimo metodas yra vertingas, nes pakankamai greitai galima įvertinti turimą infrastruktūrą, aiškiai suprantamas, nereikalauja informacijos apie elementų patikimumą (kurį sudėtinga įvertinti), padeda identifikuoti kritiškus elementus ir jų grupes. Tačiau tokiu būdu identifikuotų kritinių elementų ar jų grupių kritiškumo įvertinimas nėra konservatyvus.

Taip pat daugiausiai deterministinės analizės trūkumu įvardijama tai, kad realūs avariniai scenarijai yra dažnai lydimi atsitiktinių įvykių, susijusių su:

- Įrenginių gedimais;
- Operatoriaus veiksmų įtaka;
- Fizikinių procesų tarpusavio sąveika.

Dėl didelio galimų avarių skaičiaus deterministiškai nėra įmanoma analizuoti visų galimų atvejų. Todėl analizuojant infrastruktūros elementų kritiškumą yra svarbu įvertinti ne tik elementų techninius pajėgumus ir sąryšius tarp šių elementų, bet ir atsitiktinį sistemų darbą, atsižvelgiant į elementų patikimumą. Toks išplėtotas energetikos sistemų kritiškumo vertinimo metodas pristatytas 2.4 skyriuje.

2.4 Kritiškumo rizika (Rizikingumas)

Kaip minėta, vertinant energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą deterministiniu būdu, kai vertinamas vieno elemento (arba elementų grupės) kritiškumas, priimant prielaidą, kad kiti infrastruktūros elementai veikia patikimai, nėra tikslingai įvertinama kritiškumo situacija (nėra informatyvu) nagrinėjamoje infrastruktūroje. Kitaip sakant, vertinant infrastruktūros elemento (arba elementų grupės) kritiškumą nėra įvertinamas ir analizuojamo elemento (arba elementų grupės) patikimumo faktorius. Gali būti tokių situacijų, kai infrastruktūros elemento kritiškumas yra gerokai didesnis už priimtą τ lygio kritiškumą, bet to elemento gedimo tikimybė yra sąlyginai maža. Taip pat gali būti ir kita situacija, kai analizuojamo elemento kritiškumas yra nežymiai didesnis už priimtą τ lygio

kritiškumą, bet šio elemento gedimo tikimybė yra sąlyginai didelė. Todėl reikėtų atlikti papildomas analizės elementų kritiškumo rezultatams, gautiems analizuojant energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą deterministiniu būdu. Rizikingumu vadinsime infrastruktūros elemento ar elementų grupės gedimo tikimybės ir jų sukkelto kritiškumo sandaugą

$$rc^k(t) = q^k(t) \cdot c^k(t), 1 \leq k \leq N; \quad (2.18)$$

čia $q^k(t)$ – k -ojo elemento gedimo tikimybė; $c^k(t)$ – k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumas.

$$rc^{k_i, k_l, \dots, k_r}(t) = q^{k_i, k_l, \dots, k_r}(t) \cdot c^{k_i, k_l, \dots, k_r}(t), 1 \leq k_i \leq k_l \leq k_r \leq N; \quad (2.19)$$

čia $q^{k_i, k_l, \dots, k_r}(t)$ – infrastruktūros elementų grupės gedimo tikimybė; $c^{k_i, k_l, \dots, k_r}(t)$ – infrastruktūros elementų grupės kritiškumas.

Rizikingumo įvertinimas leis objektyviau bei tiksliau suranguoti infrastruktūros elementus (arba grupes) pagal jų kritiškumą ir patikimumo charakteristikas. Tačiau ir šis kritiškumo vertinimo metodas neatspindi realios elementų kritiškumo situacijos.

2.5 Tikimybinis energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis

Deterministiniu energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modeliu identifikuojama dauguma kritiškų infrastruktūros elementų. Nagrinėjant infrastruktūros elementų (poromis po du, grupėmis po tris elementus) kritiškumą, tokių kritinių elementų įvykių tikimybės gali būti mažos. Tačiau realiose energetikos sistemose elementų darbas yra atsitiktinis, t. y. infrastruktūros elementų darbas nusakomas kaip atsitiktinis dydis.

Kiekvienu laiko momentu gali susidaryti įvairios infrastruktūros elementų gedimų kombinacijos. Taip pat infrastruktūrų darbas priklauso ir nuo gamtoje vykstančių procesų (stichinių nelaimių) bei nuo žmogaus veiklos: netyčinių (žmogaus klaida) ar tyčinių iš anksto planuotų veiksmų (teroro). Pastaroji, tyčinė žmogaus veikla, yra labai dažnai akcentuojama ypatingos svarbos infrastruktūrų darbui užtikrinti (144/08/EC; NIPP). Įvykus tokiam atvejui, kai sistemos yra sąlygojamos iš anksto suplanuotos tyčinės žmogaus veiklos, gali susidaryti įvykių (sistemų elementų gedimų) kombinacijos, didesnės nei po tris ar daugiau infrastruktūros elementų. Pavyzdžiui, tokios didesnės infrastruktūrų elementų gedimų kombinacijos gali susidaryti sutrikdžius vieno ar dviejų infrastruktūros elementų darbą. Sistemose taip pat gali tuo pačiu metu, dėl elementų patikimumo, sugesti ar jau būti sugedę dar papildomai keli elementai. Todėl būtina sudaryti tokį energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo modelį, kuris identifikuoatų kritiškus elementus, atsižvelgiant į visų sistemų infrastruktūros elementų patikimumą.

Tokio infrastruktūros kritiškumo vertinimo modelio sudarymą apsunkina tai, kad reikia kiekvieno infrastruktūros elemento techninės pajėgumų ir patikimumo informacijos. Patikimumo rodiklių informacija dažniausiai yra konfidenciali. Šiame darbe vertinamas sistemos elementų, jų grupių kritiškumas, atsižvelgiant į įtaką galutiniams vartotojams, tačiau nevertinami elementų ar jų grupių pažeidimai dėl

teroristinių veiklų, sabotажų ir pan. Modelyje naudojami gedimų rodikliai priklauso nuo jų patikimumo, senėjimo ar kitų natūralių priežasčių. Kai kurių energetikos sistemų infrastruktūros patikimumo rodikliai yra skelbiami tarptautinėse duomenų bazėse.

Gamtinių dujų ir naftos tiekimo sistemų duomenų bazės:

- Europos dujotiekių avarių grupės (European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG)) duomenų bazė (EGIG, 2008).
- Europos naftos bendrovių asociacijos (CONCAWE) duomenų bazė (CONCAWE, 2006).
- RSPA/OPS tarnybos (Department of Transportation's Research and Special Programs Administration / Office of Pipeline Safety) ir vamzdynų ir pavojingų medžiagų saugos administracijos PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration) duomenų bazės (Corrosion-doctors, committee, 2008, The Pipeline Inspection, 2006).
- UKOPA duomenų bazė (UKOPA, 2012).

Elektros perdavimo sistemų duomenų bazės:

- Bonneville elektros energijos tiekimo operatoriaus (Šiaurės vakarų Amerika) duomenų bazė (Bonneville Power Administration (BPA)).
- Šiaurės Amerikos elektros energijos tiekėjų asociacijos duomenų bazė (C Three's North American Electric Transmission Project Database).
- Alberta elektros energijos perdavimo sistemos operatoriaus duomenų bazė (Alberta Interconnected Electric System Operator (AESO)).
- Europos elektros energijos perdavimo sistemos operatorių tinklo duomenų bazė (European network of transmission system operators for electricity (ENTSO-E)).
- Europos elektros energijos tiekėjų asociacijos duomenų bazė (The European Power Plant Suppliers Association (EPPSA)).
- JAV Pensilvanijos valstijos elektrinių asociacijos duomenų bazė (The Electric Power Generation Association (EPGA)).

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemų duomenų bazės:

- Europos tarptautinė asociacija, atstovaujanti centralizuoto šilumos ir vėsinimo bei šilumos ir elektros gamybos sistemoms (euroheat).
- Europos centralizuoto šilumos ir vėsinimo asociacijų platforma (The District Heating and Cooling plus (DHC+) Technology Platform).

Tačiau kiekvienos energetikos sistemos infrastruktūros elementų, tokių kaip elektros perdavimo linijų, dujotiekio vamzdynų, elektrinių ir kt., patikimumas yra labai skirtingas ir priklauso nuo daugelio faktorių: geografinės padėties; žmogaus veiklos intensyvumo; išorinių sąlygų (statybos darbai, eismo intensyvumas, įvykiai ir pan.); eksploatacijos lygio ir kt.

Energetikos sistemų infrastruktūros sudarytos iš netaisomų ir taisomų elementų.

Siekiant identifikuoti kritinius sistemų infrastruktūros elementus vertinimas atliekamas konservatyviai, įvertintas kritiškumo lygis yra mažesnis, nes nėra atsižvelgiama į infrastruktūros elementų atstatymo (remonto) galimybę, t. y. infrastruktūros elementai laikomi netaisomais. Infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimas yra momentinis dydis (laiko momentu t) ir sistemos atsparumas imituojamas per elementų generuojamos galios diversifikavimą bei rezervinius sistemos elementus, pvz., rezervinio kuro saugyklas, dujotiekio dvivamzdes atkarpas, imituojamais optimizaciniais regulatoriais mechanizmais ir t. t.

Infrastruktūros elementų kritiškumo įvertinimas atliekamas periode $0 < t < T$ kiekvienu nagrinėjamu laiko momentu t (diskretiniu laiko dydžiu), kuris atitinkamai gali būti skaidomas metų ketvirčiais, mėnesiais arba savaitėmis. Tokio laiko momentų skaidymo reikia nagrinėjant realių sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą, atsižvelgiant į statistinius sistemų poreikių rodiklius. Smulkesnis laiko intervalų suskaidymas (valandomis, minutėmis ir t. t.) apsinkintų vertinimo procedūras ir reikalautų daugiau sistemų techninių charakteristikų.

Netaisomų elementų pagrindinis patikimumo rodiklis yra veikimo iki gedimo trukmė T (atsitiktinis dydis). Kitas dažnai naudojamas elementų patikimumo rodiklis yra elementų gedimų intensyvumas $\lambda(t)$ tam tikru laiko momentu t (Navickas, 2007).

Gedimų intensyvumas pagal kitimo pobūdį dažnai skirstomas į mažėjantį, pastovų arba didėjantį (laiko atžvilgiu). Dažnai eksploatacijos laikui iki gedimo naudojamas Veibulo skirstinys (tankio funkcija (2.20)), nes gedimų intensyvumo funkcija gali įgyti įvairias formas, atsižvelgiant į parametrų reikšmes. Netaisomo infrastruktūros elemento gedimo tikimybė aprašoma (2.21) formule, o gedimų intensyvumo išraiška – (2.22) formule.

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}; \quad (2.20)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}; \quad (2.21)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1}; \quad (2.22)$$

čia: $f(t)$ – tankio funkcija; $Q(t)$ – elemento gedimo tikimybė; $\lambda(t)$ – elemento gedimų intensyvumas; α – mastelio parametras; β – kreivės formos parametras.

Dažniausiai šios patikimumo charakteristikos taikomos pasyviems infrastruktūros elementams, tokiems kaip: elektros linijų atkarpoms, dujotiekio vamzdinių atkarpoms ir t. t., charakterizuoti (Rimkevicius et al., 2012; Augutis, Ušpuras ir Matuzas, 2007; Matuzas, Augutis ir Ušpuras, 2006).

Gedimų intensyvumas mažėja, kai $0 < \alpha < 1$, elementų įsidirbimo periodas; gedimų intensyvumas išlieka pastovus, kai $\alpha = 1$, normalios eksploatacijos atveju $\lambda(t) = \lambda$ išlieka pastovus; gedimų intensyvumas didėja, kai $\alpha > 1$, elementų senėjimo/susidėvėjimo periodas.

Dažnai įvairių sistemų darbas yra nagrinėjamas, kai sistemų elementai yra išdirbę įsidirbimo periodą ir yra dirbantys normalios eksploatacijos periodu. Tokių infrastruktūros elementų gedimų skaičius lygiuose laiko t perioduose yra panašus (Eusgeld et al., 2009) ((2.25) formulė). Tokių elementų eksploatacijos laikas iki gedimo aprašomas pagal eksponentinį dėsnį (atskiras atvejis Veibulo skirstinio, kai $\alpha = 1$, tankio funkcija (2.23)).

Netaisomo infrastruktūros elemento gedimo tikimybė aprašoma (2.24) formule.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} . \quad (2.23)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t} . \quad (2.24)$$

$$\lambda(t) = \lambda = \frac{1}{\beta} = const . \quad (2.25)$$

Pažymėtina, kad vertinant gedimų intensyvumą λ kiekvienos sistemos infrastruktūros individualiai, vieną pagrindinių atskiro elemento patikimumo rodiklių, reikėtų jį laikyti funkcija (ne vienmačiu dydžiu), priklausančia nuo daugelio parametų: sistemos elemento gedimų dažnio, individualių techninių charakteristikų (pvz., dujotiekio vamzdžio atkarpos ilgio, laido skersmens, elektros stulpo stiprumo ir t. t.) ir eksploatacijos laiko. Dėl eksponentinio dėsnio paprastumo kartais jis yra taikomas aprašyti gedimams, kurių faktinis gedimų pasiskirstymo dėsnis nežinomas. Tokią prielaidą galima priimti nagrinėjant gedimus, įvykstančius nedideliame laiko intervale t .

Puasono skirstinys dažniausiai naudojamas nagrinėjant elemento, kurio gedimų intensyvumas λ , darbą (Rimkevicius et al., 2012), kai tikslas yra įvertinti tikimybę, kad per laiko intervalą t įvyks n gedimų:

$$Q_i(t) = \frac{\lambda^i t^i}{i!} e^{-\lambda t} , i = 0, 1, 2, \dots; \quad (2.26)$$

čia i – elemento gedimų skaičius.

Sudėtingiems sistemų infrastruktūros elementams, tokiems kaip šiluminių elektrinių blokams, šiluminėms katilinėms, elektros perdavimo tinklo skirstykloms ir pastotėms (infrastruktūros elementai, kurie nėra detaliau skaidomi), patikimumo charakteristikų įvertinimas yra sudėtingas ir reikalaujantis atlikti detalią patikimumo analizę arba rizikos analizę šių elementų gedimo atveju. Tokios analizės atlikimas yra už disertacijos ribų. Todėl kritiškumo vertinimo modelyje naudojamos jau galutinės, apibendrintos tokių agreguotų infrastruktūros elementų patikimumo charakteristikos, skelbiamos mokslinėse publikacijose (Yu, 2007; Ramesh, Saravannan, 2010; Merle, Roussel, Lesage, 2010).

Kompleksinių energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumui vertinti, kai yra analizuojama ne tik infrastruktūros topologinė struktūra, bet ir atsižvelgiant į infrastruktūros elementų patikimumo rodiklius, gali būti taikomas tiek analitinis metodas, tiek sistemų veikimo skaitmeninis imitavimo metodas – Monte-Karlo,

analitiškai aprašomų sistemų matematiniai modeliai dažnai yra supaprastinami priimant tam tikras prielaidas. Toks vertinimas dažnai būna nekonservatyvus. Monte-Karlo metodas leidžia kartu apjungti kitus modeliavimo metodus, kaip „įvesties-išvesties“ (I.O.) ar Agentais pagrįstus metodus, ir modeliuojant galimas infrastruktūros elementų būsenas, imituoti realios sistemos darbą. Taip yra įvertinamas, atsižvelgiant į atsitiktinį sistemų darbą, kiekvieno infrastruktūros elemento kritiškumas. Infrastruktūros elementų būsenų aibė sugeneruojama pagal žinomą pasiskirstymo funkciją $F(t)$, kurios reikšmės tenkina elementų veikimo arba gedimo sąlygas. Dažniausiai naudojami skaičių generatoriai, sudarantys aibes reikšmių, tolygiai pasiskirsčiusių nuo 0 iki 1, kurie aprašomi tolygiuoju skirstiniu. Skaitinio eksperimentavimo metu priimama prielaida, kad kiekvieno infrastruktūros elemento būseną gali būti nustatoma panaudojant tolygiai pasiskirsčiusius atsitiktinius dydžius iš intervalo $[0, 1]$. Visų infrastruktūros elementų funkcionavimas gali būti apibūdinamas dviejų arba daugiau būsenų modeliais. Kiekvienos Monte-Karlo iteracijos metu j -ajam infrastruktūros elementui sugeneruojamas nepriklausomas atsitiktinis dydis U_j ir nustatoma j -ojo elemento būseną. Pavyzdžiui, elementui, aprašomam dviem būsenomis (veikia, neveikia):

$$z_j = \begin{cases} 0 \text{ (elementas veikia),} & \text{kai } U_j \geq Q(t) \\ 1 \text{ (elementas neveikia),} & \text{kai } U_j < Q(t) \end{cases}, j = 0, 1, 2, \dots, N; \quad (2.27)$$

čia j – infrastruktūros elemento indeksas; $Q(t)$ – j -ojo elemento momentu t gedimo tikimybė.

Iteracijų skaičius, reikalingas Monte-Karlo metodui, nustatomas pasinaudojant bandomuoju modeliavimu, didinant iteracijų skaičių ir vertinant rezultatų konvergavimą. Tai yra, kad vertinamas kritiškumo rodiklių standartinis nuokrypis siektų $\sim 10\%$. Gaunamas sąlyginai didelis iteracijų skaičius ir taip sugeneruojamos visos galimos energetikos sistemų būsenos (atsitiktinis darbas). Toks nustatymo būdas nėra labai geras, bet jis pasirenkamas, nes nėra naudojamų skirstinių, iš kurių parametru būtų galima suskaičiuoti reikiamą iteracijų skaičių. Pavyzdžiui, jei būtų naudojamas Normalusis skirstinys, iteracijų skaičiui nustatyti būtų galima naudoti (2.28) formulę:

$$N_{MC} = \left(\frac{100z_c\sigma}{E\bar{x}} \right)^2; \quad (2.28)$$

čia σ – standartinis nuokrypis; z_c – standartinio normaliojo skirstinio $1 - \alpha$ lygmens kvantilis; E – vidurkio procentinė paklaida; \bar{x} – vidurkio įvertis.

Siekiant nustatyti energetikos sistemų infrastruktūros kritinius elementus, kai sistemų darbas yra atsitiktinis, Monte-Karlo modeliavimo metodu, atsižvelgiant į infrastruktūros elementų patikimumą, modeliuojamos visos galimos energetikos sistemų būsenos. Energetikos sistemų kritiškumas įvertinamas modeliuojant atsitiktinį sistemų darbą dirbtinai nepašalinant infrastruktūros elementų. Toks energetikos sistemų kritiškumas bus vadinamas baziniu:

$$c^{(bazinis)}(t) = 1 - \sum_{i=1}^M \frac{S_i^{(\bar{\xi}_l)}(t)}{V_i(t)} \beta_i(t); \quad (2.29)$$

čia $\bar{\xi}_l$ – l -osios Monte-Karlo iteracijos metu sugedusių infrastruktūros elementų indeksai (atsitiktinių dydžių vektorius), $l = 1, 2, \dots, N_{MC}$.

Bazinis sistemų kritiškumas atsiranda dėl infrastruktūros elementų patikimumo iš paties sistemų darbo. Infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimas atliekamas dirbtinai pašalinus po vieną visus infrastruktūros elementus. Kritiškumo vertinimo metu dirbtinai išjungus k -ąjį infrastruktūros elementą, Monte-Karlo metodu imituojamas atsitiktinis sistemų darbas ir gaunamos vidutinės k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumo charakteristikos:

$$c^{(k|\bar{\xi}_l)}(t) = 1 - \sum_{i=1}^M \frac{S_i^{(k|\bar{\xi}_l)}(t)}{V_i(t)} \beta_i(t), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2.30)$$

$$\bar{c}^k(t) = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{l=1}^{N_{MC}} c^{(k|\bar{\xi}_l)}(t), \quad k = 1, 2, \dots, N; \quad (2.31)$$

čia $\bar{\xi}_l$ – l -osios Monte-Karlo iteracijos metu sugedusių infrastruktūros elementų indeksai (atsitiktinių dydžių vektorius), $l=1, 2, \dots, N_{MC}$; $c^{(k|\bar{\xi}_l)}(t)$ – l -osios Monte-Karlo iteracijos metu k -ojo elemento kritiškumas, kai sistemų darbas yra atsitiktinis.

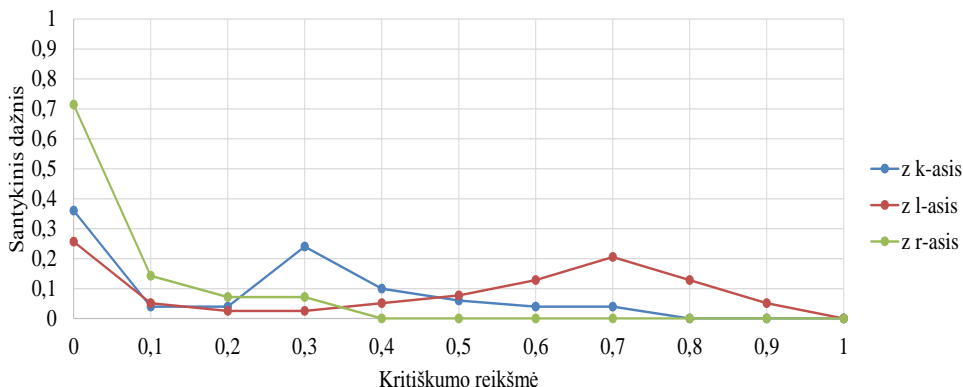
Atlikus imitacinį energetikos sistemų modeliavimą Monte-Karlo metodu, gaunama k -ojo elemento kritiškumo statistika vartotojų atžvilgiu. Elemento kritiškumo reikšmių intervalas $[0, 1]$ suskaidomas į s lygių dalių ((2.32) formulė). Turima k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumo statistika įvertinama santykiniais kritiškumo reikšmių dažniais kiekviename kritiškumo intervale (2.33).

$$0 = C_0 < C_1 < C_2 < \dots < C_\tau < \dots < C_s = 1, \quad (2.32)$$

$$v_0 \in C_0, v_1 \in C_1, v_2 \in C_2, \dots, v_\tau \in C_\tau, \dots, v_s \in C_s; \quad (2.33)$$

čia τ – kritiškumo lygis $0 \leq \tau \leq 1$; v_τ – kritiškumo reikšmių santykinis dažnis C_τ intervale.

Pagal tai sudaromas k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumo santykinų dažnių daugiakampis (kritiškumo empirinė tankio funkcija) (2.4 pav.).



2.4 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo tankio funkcijos

Sudarius kiekvieno infrastruktūros elemento kritiškumo santykinų dažnių daugiakampius, infrastruktūros elementai klasifikuojami pagal jų kritiškumo dažnį į didelio, vidutinio ir mažo kritiškumo grupes. Tačiau yra ir tokių atvejų, kai k -ojo infrastruktūros elemento kritiškumo dažnis gali būti netolygiai pasiskirstęs (pvz., 2.4 pav. z k -asis). Kartu su k -uoju infrastruktūros elementu, kuris pašalinamas dirbtinai, atsitiktinai sugenda kitų infrastruktūros elementų įvairios grupės (kombinacijos). Dėl sistemų atsitiktinio darbo prie dirbtinai pašalinto k -ojo elemento prisijungia atsitiktinai sugedusių infrastruktūros elementų įvairios kombinacijos, taip padidindamos kritiškumą ir jo dažnį tame intervale C_τ . Todėl būtina atlikti išsamesnę elementų nustatymo kritiškumo intervale C_τ analizę (elementų klasterizavimas). Analizės metu su tam tikra tikimybe (pasikliovimo lygmeniu α) identifikuojami elementai, kurie turi įtakos kritiškumo lygiui intervale C_τ . Tokiam elementų klasterizavimui tinkamas logistinės regresijos modelis, išsamiau pristatytas kitame skyriuje.

2.6 Logistinės regresijos taikymas kritinių infrastruktūros elementų klasterizavimui

Energetikos sistemų, kurių darbas aprašytas tikimybinio modeliu, kai infrastruktūros elementai funkcionuoja atsitiktinai (pagal jų patikimumo charakteristikas), vienas uždavinių yra nustatyti grupę infrastruktūros elementų, kurių sutrikdymas turėtų įtakos galutinių vartotojų energijos poreikių užtikrinimui. Tokiu atveju infrastruktūros elementų darbas nusakomas dviem atsitiktinėmis būsenomis: infrastruktūros elementas veikia (būsena – 0), infrastruktūros elementas yra sugedęs/dirbtinai pašalintas (būsena – 1). Energetikos sistemų elementams klasterizuoti pagal jų kritiškumo įtakos poveikį sudaromas logistinės regresijos modelis, kurio nepriklausomi kintamieji $Z_1 = z_{1i}$, $Z_2 = z_{2i}$, ..., $Z_N = z_{Ni}$ i -ojo stebėjimo atveju yra infrastruktūros elementų būsenų reikšmės. Pagal Monte-Karlo modelio statistinius duomenis kiekvienam kritiškumo mato intervalui ((2.32) išraiška) galima suklasifikuoti ir sudaryti kritiškų elementų grupę. Logistinė regresija tinka esant bendroms prielaidoms:

- Kintamieji/regresoriai (infrastruktūros elementai) Z_1, \dots, Z_N nebūtinai turi būti normalieji (gali būti kategoriniai, ranginiai arba intervaliniai).
- Priklausomas kintamasis Y (kritiškumo mato intervalai) gali būti kategorinis arba ranginis. Nagrinėjamo kritiškumo mato intervalo atveju kritiškumo reikšmės iš analizuojamo intervalo C_τ yra perkoduojamos binariniais kintamaisiais (pseudo kintamieji). Jei $c^{(k|\bar{z}_i)}(t) \in C_\tau$, tai $Y_i = 1$, jei $c^{(k|\bar{z}_i)}(t) \notin C_\tau$, tai $Y_i = 0$.
- Modelyje paklaidos neprivalo būti normaliai pasiskirsčiusios, nekalbama apie priklausomo kintamojo homoskedastiškumą.
- Duomenyse negali būti kažkurių Y reikšmių labai mažai. Reikia turėti pakankamai informacijos apie įvairių kategorijų respondentus. Idealiu atveju visų kategorijų stebėjimų yra po lygiai. Jeigu Y įgyja 3 – 4 reikšmes, tai imtyje kiekvienos kategorijos stebėjimai turėtų sudaryti bent 15 %.
- Regresoriai neturi stipriai koreliuoti. Dėl multikolinearumo modelyje gali atsirasti neteisingi kintamųjų ryšiai. Multikolinearumo problema dvinarėje logistinėje regresijoje tiriama retai.

Monte-Karlo metodu gauti stebėjimai $(y_i, z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{Ni})$, čia $i = 1, 2, \dots, N_{MC}$, ir y_i įgyja reikšmes 0 arba 1 (atsižvelgiant į analizuojamo kritiškumo mato intervalą C_τ), o $z_{1i}, z_{2i}, \dots, z_{Ni}$ – kategoriniai kintamieji (infrastruktūros elementų būseną).

Kad logistinės regresijos modelis ((2.34) formulė) būtų kuo geriau suderintas su imitaciniais sistemų darbo duomenimis, parametrų įverčiai $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_N$ nustatomi didžiausio tikėtimumo metodu, kad tikėtimumo funkcija L ((2.35) formulė) įgytų maksimalią reikšmę.

$$P(Y = 1 | \bar{z}) = p_i = \frac{e^{\hat{b}_0 + \sum_{j=1}^N \hat{b}_j z_{ji}}}{1 + e^{\hat{b}_0 + \sum_{j=1}^N \hat{b}_j z_{ji}}}, \quad \forall j \in \mathcal{K}; \quad (2.34)$$

$$L = \prod_{i: y_i=1} p_i \prod_{i: y_i=0} (1 - p_i); \quad (2.35)$$

čia $i = 1, 2, \dots, N_{MC}, j = 1, 2, \dots, N, p_i = P(y_i = 1)$ tikimybė, kad kritiškumo reikšmė $c^{(k|\bar{z}_i)}(t) \in C_\tau$; \hat{b}_j – logistinės regresijos lygties koeficientų įverčiai, gaunami iš imties duomenų.

Logistinės regresijos modelio tinkamumą imitaciniais sistemų darbo duomenimis parodo χ^2 suderinamumo kriterijus

$$\begin{cases} H_0: & b_1 = b_2 = \dots = b_N = 0, \\ H_1: & \text{bent vienas } b_j \neq 0. \end{cases} \quad (2.36)$$

$$\chi^2 = -2 \ln L(\hat{b}_0, 0) + 2 \ln L(\hat{b}_0, \hat{b}); \quad (2.37)$$

čia b_0 – regresijos lygties konstanta; $L(\hat{b}_0, 0)$ – didžiausio tikėtinumo funkcijos maksimumas, kai $b_j = 0$; $L(\hat{b}_0, \hat{b})$ – didžiausio tikėtinumo funkcijos maksimumas su didžiausio tikėtinumo metodu parinktomis parametru \hat{b}_j reikšmėmis ($j = 1, 2, \dots, N$).

Su pasirinktu reikšmingumo lygmeniu α hipotezė H_0 yra atmetama (bent vienas koeficientas $b_j \neq 0$), kai $\chi^2 > \chi_\alpha^2(k)$; čia $\chi_\alpha^2(k)$ – χ^2 skirstinio su k laisvės laipsniais α lygmens kritinė reikšmė.

Voldo kriterijus nusako, ar konkretus koeficientas yra reikšmingas (kitu atveju pašalinamas iš regresijos lygties). Voldo statistika aprašoma (2.39) formule.

$$\begin{cases} H_0 : b_j = 0, \\ H_1 : b_j \neq 0. \end{cases} \quad (2.38)$$

$$W = \left(\frac{b_j}{s_j} \right)^2; \quad (2.39)$$

čia $s_j - \hat{b}_j$ standartinio nuokrypio įvertis.

Voldo statistika pasiskirsčiusi pagal χ^2 skirstinį su 1 laisvės laipsniu. Su pasirinktu reikšmingumo lygmeniu α hipotezė H_0 yra atmetama (koeficientas $b_j \neq 0$), kai $W > \chi_\alpha^2(1)$.

Sudarytas logistinės regresijos elementų klasifikavimo modelis, pagal jų kritiškumą, leidžia statistiškai reikšmingai (reikšmingumo lygmuo $\alpha = 0,95; 0,99$) infrastruktūros elementus suskirstyti į grupes (klasterius), kiekviename kritiškumo mato intervale C_τ , pagal jų įtaką sistemos galutinių vartotojų energijos poreikiams užtikrinti.

Kiekvienas infrastruktūros elementas z_j priskiriamas aibei \mathbb{C}_τ^{Log} , kai jo logistinės regresijos koeficientai yra reikšmingi:

$$\mathbb{C}_\tau^{Log} = \{z_j \mid \hat{b}_j \neq 0\}, \quad \forall j \in \mathcal{K}. \quad (2.40)$$

Kiekvienam elementui ir jų kombinacijoms galima įvertinti tikimybę, kad sugedusio/dirbtinai pašalinto elemento z_j ((2.41) formulė) ar jų kombinacijos ((2.42) formulė) kritiškumo įgyjama reikšmė pateks į nagrinėjamą C_τ intervalą, t. y. $P(Y=1 \mid z_j)_{C_\tau}$.

$$\hat{P}(Y=1 \mid z_j)_{C_\tau} = \frac{e^{\hat{b}_0 + \hat{b}_j z_j}}{1 + e^{\hat{b}_0 + \hat{b}_j z_j}}, \quad \forall j \in \mathcal{K}; \quad (2.41)$$

$$\hat{P}(Y=1|\bar{z})_{C_\tau} = \frac{e^{\hat{b}_0 + \sum_{j=1}^N \hat{b}_j z_j}}{1 + e^{\hat{b}_0 + \sum_{j=1}^N \hat{b}_j z_j}}, \quad \forall j \in \mathcal{K}; \quad (2.42)$$

čia elementų kombinacijoms nagrinėti atitinkami sugedę/dirbtinai pašalinti elementai įgyja reikšmes $z_j = 1$, veikiantys elementai $z_j = 0$.

Turėdami tikimybių įverčius (2.41) ir (2.42), jeigu tikimybė $\hat{P}(Y=1|\bar{z})_{C_\tau} > 0,5$ (Devore, Berk, 2011; Keener, 2010), prognozuojama, kad sugedusių/dirbtinai pašalintų elementų kombinacijos \bar{z} kritiškumas pateks į nagrinėjamą intervalą C_τ , t. y. $Y = 1$ (analogiškai ir vieno elemento atveju z_j). Tuo atveju, kai $\hat{P}(Y=1|\bar{z})_{C_\tau} < 0,5$, prognozuojama, kad sugedusių/dirbtinai pašalintų elementų kombinacijos \bar{z} kritiškumas nepateks į nagrinėjamą intervalą C_τ , t. y. $Y = 0$.

$$\tilde{C}_\tau^{Log} = \{\bar{z} | P(Y=1|\bar{z}) > 0,5\}; \quad (2.43)$$

čia \bar{z} – įvairios z_j elementų kombinacijos (pvz., kombinacijos po du ar po tris elementus, kurie sugenda arba yra pašalinami iš sistemos vienu metu).

Taip kiekviename nagrinėjamame kritiškumo mato intervale C_τ sudaromos visos galimos kritinių infrastruktūros elementų kombinacijos (klasteris). Norint praktiškai nuspręsti, ar reikia mažinti elementų arba jų grupių kritiškumą (didinti apsaugą, diversifikuoti elementus ir pan.), turi būti atliekama įvykių, sukeliančių šių kritinių elementų gedimus, rizikos analizė, kuri įvertintų terorizmo aktų, karinių konfliktų ir kt. (nenatūralių priežasčių) tikimybes.

2.7 Energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo modeliai

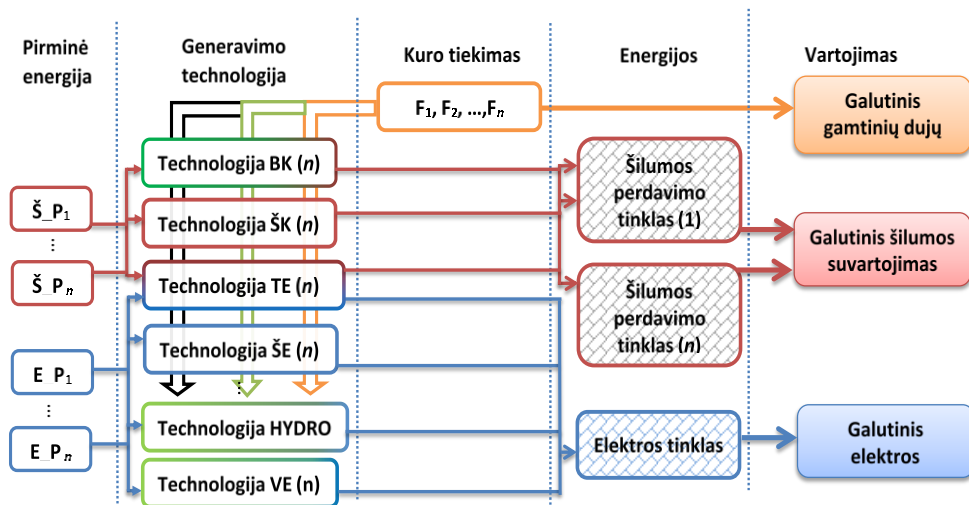
Kadangi, kaip buvo parodyta metodikos 2.1, 2.3, 2.5 poskyriuose, infrastruktūros elementų kritiškumui vertinti reikia nustatyti dirbtinai pašalintų nagrinėjamų infrastruktūros elementų, kitiems infrastruktūros elementams veikiant atsitiktinai, poveikį galutiniams vartotojams (t. y. kiek yra užtikrinamas jų poreikio tenkinimas), todėl šio skyriaus tikslas yra sudaryti bendrus energetikos sistemų modelius, kurie leistų išmatuoti šias kritiškumo charakteristikas. Tam reikia energetikos sistemas suskaidyti į pasirinkto detalumo objektinį lygį, t. y. į funkcinis elementus, kurių darbas turi įtakos svarbiausių energijos rūšių galutinių vartotojų poreikių užtikrinimui. Siūlomas sąlyginis skaidymo detalumas išskiriant tokias elementų grupes:

- Pirminio kuro tiekimo sistemų elementai (dujotiekio ir naftos vamzdynų atkarpos, alternatyvaus kuro saugyklos ir t. t.).
- Energijos konvertavimo ir gamybos elementai (šiluminės elektrinės, šiluminės katilinės, biokatilinės ir t. t.).
- Energijos perdavimo elementai (elektros linijų atkarpos, šilumos tiekimo vamzdynų atkarpos, elektros skirstymo stotys ir t. t.).
- Galutiniai energijos vartotojai (elektros, didžiųjų miestų šilumos ir t. t.).

Toks sąlyginis energetikos sistemų infrastruktūros skaidymo būdas pasirinktas siekiant identifikuoti pasyvių sistemų fizinius objektus, o sudėtingesni (adaptyvūs) objektai, tokie kaip šiluminės elektrinės, yra agreguojami ir jų blokai sudarytame modelyje laikomi kaip pavieniai elementai. Šiame darbe pristatomame modelyje vartotojų energijos poreikius gali patenkinti ne tik viena technologija, bet ir suminė, sudaryta iš tą pačią energijos rūšį gaminančių technologijų.

Energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumui vertinti ir sistemoms analizuoti naudojami energetikos sistemų modeliavimo įrankiai ir matematiniai modeliai. Šių priemonių dėka galima ne tik atlikti struktūrinę sistemų analizę, bet ir matematinėmis lygtimis aprašyti agreguotų energetikos sistemų darbą. Modelyje energetikos sistemų struktūros vaizduojamos orientuoto grafo pavidalu. Kaip ir daugelyje tradicinių energetikos planavimo modelių (pvz., MESSAGE, OSeMOSYS ir pan.), tai leidžia laisvai kurti energetikos sistemų tinklinę schemą. Toks sistemų vaizdavimas yra patogus, nes leidžia atsižvelgti į sistemos specifikacijas ir savybes. Matematinis energetikos sistemų imitavimo modelis sudarytas iš aibių, lygčių, kintamųjų, parametrų ir t. t., kuriais galima aprašyti infrastruktūros elementus bei jų funkcionavimą.

Aprašant sistemų struktūras, techninius rodiklius, įvairius procesus, kuro ir energijos srautus bei sąryšius, esančius tarp tos pačios sistemos infrastruktūros elementų ir tarp kitų sistemų, energetikos sistemų infrastruktūros struktūrinė schema, sudaryta iš vartotojų, generavimo technologijų, kuro tiekimo technologijų ir t. t., pavaizduota 2.5 pav.



2.5 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros schema

Sudarytame energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo modelyje analizuojami sąryšiai tarp kuro tiekimo sistemų ir elektros bei centralizuoto šilumos tiekimo sistemų. Infrastruktūros elementai modelyje vaizduojami kaip tam tikro tipo technologijos, kurios atlieka procesus, susijusius su energijos generavimu, perdavimu, paskirstymu ir pan. Technologijos, atsižvelgiant į jų tipą, nusakomos parametrais, tokiais kaip techninės pajėgumo charakteristikos, prieinamumas/parengtumas,

efektyvumas ir t. t. Atskirai ekonominiai ir ekologiniai rodikliai nėra analizuojami. Jie gali būti įvertinti ir įtraukti atskirai į sistemų darbo optimizavimo modelius.

Reikalingi parametrai, tokie kaip naudingumo koeficientas, patikimumo charakteristikos, darbinė galia ir t. t., turi būti įvertinti prieš modeliavimą, ir modeliavimo metu nekinta bei yra saugomi modelio duomenų faile.

Energetikos sistemų imitaciniai darbo matematiniai modeliai sukuriami pasinaudojant programiniais įrankiais. Disertacijoje energetikos sistemų optimizuotam imitaciniam darbui modeliuoti taikomi: „įeities–išeities“ metodas elementų funkcionavimui aprašyti, daugiakriteriniai tiesinio programavimo metodai (skirtingų sistemų darbui optimizuoti) ir Monte-Karlo metodas. Modelyje naudojamos skirtingų rūšių elektros ir šilumos generavimo technologijos, kuro tiekimo bei gamybos paskirstymo sistemos yra apžvelgiamos išsamiau.

Energijos gamybos ir tiekimo modeliai (technologijos)

Energijos generavimo technologijų darbas paprastai apibūdinamas procesais, kai naudojami pirminės energijos išteklių konvertuojami į kitas energijos rūšis. Pavyzdžiui, agreguotas procesas, vykstantis termofikacinėse elektrinėse, kai naudojamas kuras toje elektrinėje yra konvertuojamas į šilumos ir elektros energiją.

Sudarant energetikos sistemų infrastruktūros elementų modelius pritaikytas „įvesties–išvesties“ metodas. Šis metodas leidžia aprašyti infrastruktūros elemento darbą procesais ir palyginti imituojamą energetikos sistemų darbą su realių sistemų darbu. Elektros ir šilumos generavimo technologijas galima apibūdinti tokiais pagrindiniais parametrais:

- energijos generavimo technologijos tipas, pvz., šiluminės elektrinės, termofikacinės elektrinės, katilinės, vėjo jėgainės ir t. t.;
- parametras, apibūdinantis energijos generavimo technologiją, yra įrengtoji galia, pvz., įrengtoji šiluminė galia q_j^* (MW), įrengtoji elektrinė galia p_j^* (MW). Atitinkamai, jeigu energijos generavimo technologija skirta vieno tipo energijai gaminti, pvz., katilinės, gaminančios tik šiluminę energiją, tai jų įrengtoji elektrinė galia $p_j^* = 0$, ir atvirkščiai, vėjo jėgainės, tai jos įrengtoji šiluminė galia $q_j^* = 0$;
- parametras, apibūdinantis energijos generavimo technologiją, yra jos naudingumo koeficientas, pagal kurį pirminė energija konvertuojama į šilumos ir elektros energiją (MWh) $0 < \eta_{el} < 1$ ir $0 < \eta_{th} < 1$. Atitinkamai, jeigu energijos generavimo technologija nėra skirta kuriai nors energijos rūšiai gaminti, tai jos naudingumo koeficientas lygus nuliui;
- jei energijos generavimo technologija skirta elektrai ir šiluminei energijai gaminti, tai ją taip pat galima apibūdinti galios / šilumos gamybos santykio koeficientu $0 < \sigma_i < 1$;
- energijos generavimo technologiją apibūdina gamybos metu naudojama kuro rūšis f (gali būti ir kelios kuro rūšys) (tona naftos ekvivalento, tne);

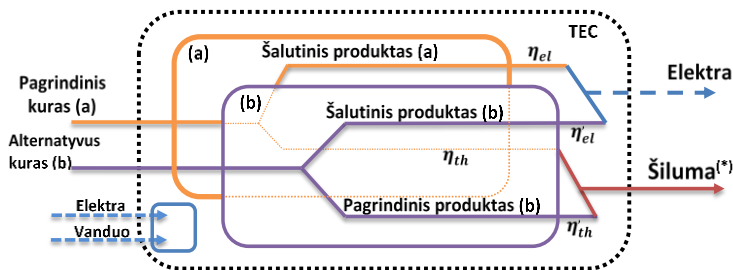
- parametras, apibūdinantis energijos generavimo technologijas, yra tos technologijos patikimumo charakteristikos r_i , pvz., gedimo dažnis, atstatymo laikas ir t. t.

Kiekvienos šilumos ir elektros generavimo technologijos darbas ir jos parametrai modelyje aprašomi pagal standartus: „CWA 45547:2004 Manual for Determination of Combined Heat and Power (CHP)“ (CEN/CENELEC, 2004; Gambini, Vellini, 2014), Europos Parlamento direktyvos ir 2012/27/ES (Europos Komisija, 2012), dėl energijos vartojimo efektyvumo (Абрамчук, Харченко, Воронков ir Никитченко, 2011; Плотников, Петрова, 2009).

Kogeneracijos technologija (kombinuotojo ciklo elektrinės)

Termofikacinės elektrinės (TE) technologija pagal gamybos apimtis skirstoma į šiuos tipus: šilumos energijos ir elektros energijos gamyba.

Pirmuoju atveju šiluminė elektrinė su priešslėgine garo turbina, dirbanti termofikaciniu režimu. Ši generavimo technologija pasižymi tuo, kad pagrindinė gamybos produkcija yra šiluma, t. y. pirminė energija su tam tikru efektyvumu paverčiama šilumos energija. Sugeneruotas garas garo katiluose perduodamas garo turbinoms, kurios generatorių pagalba pagamina elektros energiją. Garo turbinas paliekanti panaudota šilumos energija perduodama pramonės arba vartotojų šilumos poreikiams tenkinti. Šio proceso metu pagaminta elektros energija yra kaip šalutinis produktas. Dažniausiai kaip pagrindinis kuras tokiose technologijose naudojamos gamtinės dujos, o mazutas – kaip alternatyvus kuras. Modelyje naudojama šios energijos gamybos technologijos struktūrinė schema (IIASA-ECS, 2011), kurią papildė disertacijos autorius pateikta 2.6 pav.



2.6 pav. Modelyje naudojama šiluminės elektrinės su priešslėgine garo turbina struktūrinė schema

(a) – generavimo technologija, naudojanti pagrindinį kurą; (b) – generavimo technologija, naudojanti alternatyvų kurą; * – pagrindinis gamybos produktas; η_{el} – naudingumo koeficientas, kai pirminė energija paverčiama elektros energija naudojant pagrindinį kurą; η_{th} – naudingumo koeficientas, kai pirminė energija paverčiama šilumos energija naudojant pagrindinį kurą; η'_{el} – naudingumo koeficientas, kai pirminė energija paverčiama elektros energija naudojant alternatyvų kurą; η'_{th} – naudingumo koeficientas, kai pirminė energija paverčiama šilumos energija naudojant alternatyvų kurą.

Tokio tipo šilumos ir elektros generavimo technologijos yra įrengtos netoli miestų, kuriuose yra centralizuotas šilumos tiekimas. Šios generavimo technologijos

orientuotos į vietinius vartotojų šilumos poreikius. Taip pat kombinuotojo ciklo generavimo technologijos pasižymi daug didesniu naudingumu, palyginti su kondensacinėmis elektrinėmis ir katilinėmis. Tokio tipo energijos generavimo technologijos modelyje yra papildytos elektros ir vandens tiekimo į generavimo technologiją jungtimis, kadangi jos darbas yra priklausomas ne tik nuo vidinių parametų (kaip patikimumo ir naudingumo), bet ir nuo išorės poveikio.

Kitas modelyje naudojamas šiluminių elektrinių tipas yra TE su šilumos atgavimo sistema (dirbanti kondensaciniu režimu). Šio tipo technologijos leidžia generuoti elektros energiją be šilumos tiekimo ir pasižymi didesniu elektros generavimo efektyvumu nei šilumos energijos.

Šių dviejų tipų šiluminės elektrinės buvo pasirinktos naudoti modelyje, kadangi jos dažniausiai pasitaikančios energetikos sistemose įvairiose šalyse. Prireikus, į modelį taip pat būtų galima įtraukti ir šilumines elektrines, dirbančias kondensaciniu režimu, bet su tarpiniu šilumos nuėmimu.

Veiksniai turintys įtakos skirtingų kogeneracijos technologijų pasirinkimui elektrinėse:

- pageidaujamas šilumos ir elektrinės galios santykis;
- šilumos parametrai;
- pageidaujamas naudoti kuras.

Bendras TE naudingumas (elektros ir šilumos energijos generavimo) įvertinamas koeficientu (CEN/CENELEC, 2004; Gambini, Vellini, 2014)

$$\eta_j^{\text{TE}} = \frac{p_j + q_j - q_j^{\text{non-TR}}}{f_j - f_j^{\text{non-TR}}}; \quad (2.44)$$

čia η_j^{TE} – bendras TE naudingumo koeficientas; p_j – bendras TE pagamintos elektros energijos kiekis (MWh); q_j – bendras TE pagamintas šilumos energijos kiekis (MWh); $q_j^{\text{non-TR}}$ – netermofikaciniu režimu TE pagamintos šilumos energijos kiekis (MWh); f_j – naudojamo kuro kiekis gaminant energiją (tne); $f_j^{\text{non-TR}}$ – kiekis naudojamo kuro, sunaudoto atskirai gaminant naudingą šilumos energiją (tne); j – elektros ir šilumos energijos generavimo technologijos indeksas.

TE kogeneracijos gamybos šiluminis naudingumo koeficientas (CEN/CENELEC, 2004; Gambini, Vellini, 2014)

$$\eta_j^{\text{th}} = \frac{q_j^{\text{TR}}}{\frac{p_j + q_j}{\eta_j^{\text{TE}}}}. \quad (2.45)$$

TE elektros energijos gamybos naudingumo koeficientas (CEN/CENELEC, 2004; Gambini, Vellini, 2014)

$$\eta_j^{el} = \frac{P_j}{\frac{P_j + q_j}{\eta_j^{TE}}} . \quad (2.46)$$

Elektros energijos gamybos naudingumo koeficientas, kai nėra gaminama naudinga šilumos energija (CEN/CENELEC, 2004; Gambini, Vellini, 2014)

$$\eta_j^{el \text{ non-TR}} = \frac{P_j}{f_j - f_j^{\text{non-TR}}} . \quad (2.47)$$

TE sunaudoto kuro kiekis (CEN/CENELEC, 2004; Gambini, Vellini, 2014)

$$f_j^{\text{TR}} = \frac{P_j + q_j - q_j^{\text{non-TR}}}{\eta_j^{TE}} . \quad (2.48)$$

Modelyje numatyta, kad šiluminės elektrinės gali dirbti su keliomis kuro rūšimis, tokiomis kaip: gamtinės dujos, kurios dažniausiai naudojamos kaip pagrindinis kuras; naftos, mazuto produktai ir orimulsija. Pastarosios kuro rūšys modelyje naudojamos kaip rezervinis kuras, kuris sandėliuojamas kuro saugyklose prie elektrinės.

Šiluminių katilinių technologija modelyje dažniausiai naudojama patenkinti nedidelius vietinių vartotojų šilumos poreikius arba gali būti prijungta prie šilumos perdavimo tinklo ir funkcionuoti kaip rezervinė arba kaip aktyvi technologija. Šiluminės katilinės šilumos gamybos naudingumo koeficientas įvertinamas formule

$$\eta_j^{th} = \frac{q_j}{f_j} ; \quad (2.49)$$

čia q_j – pagamintos šilumos kiekis MWh; f_j – gamyboje sunaudoto kuro kiekis (tne).

Šiluminės katilinės naudojamos kaip modelio elementai lokalių vartotojų šilumos poreikiams tenkinti. Šiluminės katilinės generuoja tik šilumos energiją. Sugeneruotas kiekis priklauso nuo technologijos naudingumo koeficiento.

Biokatilinės ir TE, naudojančios biokurą. Modelyje įtraukiama ir šilumos gamybos technologija, naudojanti biokurą kaip pagrindinį kurą (biokatilinės ir TE, kūrenamos biokuru). Tokių technologijų, kurios gali veikti termofikaciniu režimu, darbas modeliuojamas pagal (2.44)–(2.46) formules. Jei biokatilinės darbas skirtas tik šilumai gaminti, tai jos darbas aprašomas (2.49) formule. Biokatilinės, kaip ir šiluminės katilinės, generuoja tik šilumos energiją. Sugeneruotas kiekis priklauso nuo technologijos naudingumo koeficiento.

Hidroelektrinės. Hidroelektrinių technologijos darbas modelyje apibūdinamas išraiška

$$P_j = F(p_j^*; \kappa; r_j); \quad (2.50)$$

čia p_j^* – įrengtoji hidroelektrinės galia (MW); κ – vidutinis sezoniškumo koeficientas, nurodantis sezoninį elektrinės panaudojimą, kuris įvertinamas iš darbo statistinių duomenų; r_j – patikimumo rodiklis.

Mažosios hidroelektrinės, kurių galia santykinai nėra didelė, yra apjungiamos į vieną hidroelektrinių technologiją ir įvertinami jos vidutiniai parametrai.

Vėjo elektrinės. Kadangi daugelyje valstybių vėjo jėgainių galios ir sugeneruota elektros energija, palyginti su tradicinėmis šiluminėmis elektrinėmis, yra santykinai mažos, pastarosios modelyje yra įtraukiamos supaprastintai. Vėjo jėgainės apjungiamos į vėjo elektrinių parkus, kurių darbo rodikliai yra įvertinami iš statistinių darbo duomenų

$$P_j = F(p_j^*; \kappa; r_j); \quad (2.51)$$

čia p_j^* – įrengtoji vėjo elektrinių parko galia (MW); κ – vidutinis sezoniškumo koeficientas, nurodantis sezoninį vėjo elektrinių parko panaudojimą/našumą, kuris įvertinamas iš darbo statistinių duomenų; r_j – patikimumo rodiklis.

Saulės jėgainės. Tai fotovoltinės elektrinės. Kaip ir vėjo elektrinių, jų galios ir sugeneruota elektros energija, palyginti su tradicinėmis šiluminėmis elektrinėmis, yra santykinai mažos. Todėl pastarosios apjungiamos į vieną technologiją, kurios darbo vidutiniai parametrai įvertinami iš darbo statistinių duomenų. Įvertinama vidutinė įrengtoji saulės elektrinių galia (MW) ir vidutinis sezoniškumo koeficientas, nurodantis sezoninį saulės elektrinių panaudojimą, kuris įvertinamas iš darbo statistinių duomenų. Sugeneruota elektros energija įvertinama pagal funkcinį priklausomumą (2.51) formule.

Dujų tiekimo vamzdynais sistemos modelis

Daugelis pagrindinių šilumos ir elektros gamybos technologijų kaip pagrindinį pirminį kurą naudoja gamtines dujas. Viena pagrindinių pasaulyje naudojamų gamtinių dujų tiekimo technologijų yra dujotiekių sistema. Ši kuro tiekimo sistema apibūdinama vamzdžio srauto pralaidumu (mln. m³/val.), dujotiekio vamzdžio ilgiu (km), dujotiekio vamzdžio vidiniu skersmeniu (mm), vamzdžio padavimo ir išėjimo slėgių skirtumu (bar) bei patikimumo charakteristikomis. Dujotiekių sistemos modeliavimas ir analizavimas kaip realios sistemos yra pakankamai sudėtingas, dėl sistemoje vykstančių termodinaminių ir kitų procesų, ir imlus modeliavimo ištekliams. Todėl dažniausiai tokioms sistemoms modeliuoti ir vertinti daromos prielaidos, leidžiančios supaprastinti sistemoje vykstančius procesus, neprarandant sistemos funkcinių charakteristikų ir darbo principų (Monforti, Szikszai, 2010; Erdener, Pambour, Lavin ir Dengiz, 2014; Villada, Olaya, 2013). Dažniausiai taikomos prielaidos tokioms sistemoms modeliuoti:

- dujotiekio vamzdžio struktūros agregavimas, apjungiant keletą vamzdžio segmentų į vieną;
- atsisakoma iteracinio dujų srauto įvertinimo vamzdyne (Menon, 2005), priimant prielaidą, kad slėgis vamzdyje išlieka pastovus (vidutinis), neatsižvelgiant į pratekančių dujų srautą;

- dujotiekių sistemoms modeliuoti naudojami tinkliniai modeliai (grafų teorija) (Monforti, Szikszai, 2010; Lochner, Bothe, 2009; Xu, Dong ir Wu, 2010). Priėmus šias prielaidas dujotiekio sistema vaizduojama kaip grafas

$$G = (\mathcal{V}, \mathcal{B}), \quad \mathcal{V} = V_{FN} \cup V_{CN}, \quad \text{kai } V_{FN} \cap V_{CN} = \emptyset; \quad (2.52)$$

čia V_{FN} – aibė grafo viršūnių, kurios vaizduoja dujotiekio sistemos galutinius vartotojus; V_{CN} – aibė grafo viršūnių, kurios vaizduoja dujotiekio vamzdyno jungtis; \mathcal{B} – aibė grafo briaunų, jungiančių grafo viršūnes V , kurios vaizduoja fizinius dujotiekio sistemos vamzdžius.

Sudarytas dujotiekio sistemos grafo modelis atspindi realios dujotiekio sistemos topologiją. Taip pat leidžia imituoti sistemos funkcines savybes (dujų srautus sistemoje). Kadangi dujotiekio sistemose darbas yra griežtai reglamentuotas valstybės įstatymais, pavyzdžiui, Lietuvos atveju LR įsakymas „Dėl gamtinių dujų perdavimo, paskirstymo, laikymo ir tiekimo taisyklių patvirtinimo“, 2002 m. vasario 5 d. Nr. 43 (Lietuvos Respublikos Seimas, 2002). Vartotojai sistemoje skirstomi pagal kategorijas, suteikiant jiems prioritetus, esant ekstremalioms situacijoms. Todėl dujotiekio sistemos imitaciniam modeliavimui pasirinktas optimizacinis maksimalaus srauto uždavinys, papildytas tikslo programavimo uždaviniu. Toks modeliavimo metodas leidžia įgyvendinti dujotiekio reguliatorių apibrėžtas strategijas ir imituoti realios sistemos darbą. Pateiksime tokio optimizavimo modelio uždavinio formulavimą. Tarkime, kad dujotiekio vamzdyno tinklas sudarytas iš $i = 1, 2, \dots, m$ viršūnių ir $j = 1, 2, \dots, n$ briaunų (vamzdyno linijų). Magistralinio dujotiekio j -osios atkarpos vamzdžio pralaidumas gali būti įvertintas pagal (2.53) formulę (Menon, 2005; Bagajewicz, Valtinson, 2014)

$$GQ_j = a \cdot \eta \cdot SG^{-0,25} \cdot d^{2,725} \cdot \left(\frac{(P_{in}^2 - P_{out}^2)}{L} \right)^{0,575}; \quad (2.53)$$

čia $a = 2,489 \cdot 10^{-9}$; GQ_j – j -ojo vamzdžio praleidžiamas srautas (mln. $\text{m}^3/\text{val.} - \text{mm}^3/\text{val.}$); SG – savitasis dujų sunkis; η – naudingumo koeficientas; d – dujotiekio vamzdžio vidinis skersmuo (mm); L – dujotiekio vamzdžio ilgis (km); P_{in} – vamzdžio padavimo slėgis (bar); P_{out} – vamzdžio išėjimo slėgis (bar).

Vamzdyno linijų pralaidumą pažymėjus GQ_j , o j -osios linijos praleidžiamą srautą x_j , galima sudaryti dujotiekio j -osios atkarpos funkcinį priklausomumą ((2.54) formulė), naudojant infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelyje:

$$x_j = F(GQ_j; r_j); \quad (2.54)$$

čia r_j – j -osios dujotiekio atkarpos patikimumo rodiklis, kuris gali būti įvertintas (2.23)–(2.25) formulėmis, įvertinant j -osios dujotiekio atkarpos gedimo tikimybę kilometrui laiko momentu t .

Įeinančių į grafo viršūnę i ir iš jos išeinančių linijų aibės yra atitinkamai N_i^+ ir N_i^- . Kiekvienoje dujotiekio grafo viršūnėje turi būti tenkinama srautų pusiausvyros lygtis ((2.55) formulė). Optimizavimo modelyje šios pusiausvyros lygtys įtraukiamos kaip lygybiniai apribojimai:

$$\sum_{j \in N_i^-} x_j - \sum_{j \in N_i^+} x_j = 0, \text{ kai } i = 1, 2, \dots, m, i \neq s, i \notin V_{FN}; \quad (2.55)$$

čia s – dujotiekio sistemos importo viršūnės; V_{FN} – aibė grafo viršūnių, kurios vaizduoja dujotiekio sistemos galutinius vartotojus; $x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$.

Iš viršūnės išeinantis dujų srautas turi būti lygus į viršūnę įeinančiam dujų srautui. Pusiausvyros lygtys turi būti tenkinamos kiekvienoje dujų sistemos grafo viršūnėje, išskyrus dujotiekio sistemos importo ir dujotiekio sistemos galutinių vartotojų viršūnėse. Galutinių vartotojų viršūnėse srautas apibrėžiamas formule

$$- \sum_{j \in N_{V_{FN}}^+} x_j - x_0 = 0; \quad (2.56)$$

čia x_0 – dujotiekio vamzdyno jungtys, kuriomis tiekiamas gamtinių dujų srautas į sistemą (pvz., dujų importo vamzdis su kaimyninėmis valstybėmis, suskystintų gamtinių dujų terminalas, gamtinių dujų saugykla ir t. t.).

Taip pat perduodamas dujų srautas vamzdžiu neturi viršyti pralaidumo pajėgumo

$$x_j \leq GQ_j, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2.57)$$

Šios bendrosios maksimalaus srauto uždavinio lygtys papildomos pseudokintamaisiais, leidžiančiais optimizuoti perduodamų gamtinių dujų kiekį vartotojams, atsižvelgiant į nagrinėjamas situacijas, pvz., avarinių situacijų ar ekstremalios padėties atveju dujų tiekimas gali būti apribotas arba nutrauktas. Todėl vartotojai skirstomi į atitinkamas grupes (Lietuvos Respublikos Seimas, 2002). Pateikiamas pavyzdys, kai išskiriamos w gamtinių dujų vartotojų grupės. Kiekvienai vartotojų grupei, pagal jos prioritetą, užtikrinamas gamtinių dujų tiekimas, todėl sudaromos atskiros tikslo funkcijos išdėstomos pagal svarbą:

$$\begin{aligned} \min S_1(d_1) &= \rho_1 \text{ (aukščiausio prioriteto vartotojai: ligoninės,} \\ &\text{butiniai vartotojai),} \\ \min S_2(d_2) &= \rho_2 \text{ (žemesnio prioriteto vartotojai: vartotojai,} \\ &\text{neturintys rezervinio kuro ir tiekiantys šilumos energiją),} \\ &\dots\dots\dots \\ \min S_w(d_w) &= \rho_w \text{ (žemiausio prioriteto vartotojai: pramoniniai} \\ &\text{vartotojai, galintys vartoti rezervinį kurą);} \end{aligned} \quad (2.58)$$

čia ρ_w – nukrypimai, nusakantys w -ąją tikslo funkciją, d_w^+ – gaunamų gamtinių dujų perteklius, d_w^- – gaunamų gamtinių dujų trūkumas, atsižvelgiant į poreikį.

Turimos prioritetinės tikslo funkcijos įtraukiamos ir taip papildomi lygybiniai apribojimai pseudokintamaisiais d_w ((2.56) formulė), kurie vaizduoja nukrypimą nuo tikslo. Norint gauti absoliučią sprendinio reikšmę, analizuojamu atveju būtų perduotas dujų kiekis vartotojui priklausančiai w prioriteto grupei, reikia įvertinti nukrypimus d_w , kurie įgyja teigiamas ir neigiamas reikšmes $d_w^+ + d_w^- = d_w$; čia $d_w^+ \geq 0, d_w^- \geq 0$.

Tuomet tikslo funkcijoms $\mathbf{S}(X) = (s_1(X), s_2(X), \dots, s_w(X))$, kurioms nurodomas siekiamas tikslo vektorius $\mathbf{S}^0 = (s_1^0, s_2^0, \dots, s_w^0)$, t. y. maksimaliai patenkintas vartotojų gamtinių dujų poreikis, yra gaunamas minimizuojant nukrypimus $d = (d_1, d_2, \dots, d_w)$ nuo šio tikslo vektoriaus. Šie nukrypimai nusako apribojimus optimizavimui. Suformuluojamas daugiatakslis, maksimalaus srauto optimizavimo uždavinys

$$\min_{X \in \mathbf{D}, d^+, d^-} \sum_{a=1}^w (d_a^+ + d_a^-), \quad (2.59)$$

kai yra tokie apribojimai

$$s_a(X) - d_a^+ + d_a^- = s_a^0, \quad a = 1, 2, \dots, w, \quad (2.60)$$

$$\sum_{j \in N_i^-} x_j - \sum_{j \in N_i^+} x_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad i \neq s, \quad i \notin V_{FN}, \quad (2.61)$$

$$- \sum_{j \in N_{FN}^+} x_j - x_0 = 0, \quad (2.62)$$

$$d_a^+, d_a^- \geq 0, \quad a = 1, 2, \dots, w, \quad (2.63)$$

$$0 \leq x_j \leq GQ_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (2.64)$$

čia i – mazgo numeris orientuotame grafe; j – orientuoto grafo briaunos numeris (dujotiekio vamzdžio atkarpa); a – gamtinių dujų vartotojo prioriteto numeris; \mathbf{D} – leistinoji sprendinių sritis, nusakyta nelygybiniais ir lygybiniais apribojimais.

Toks tikslinio programavimo optimizavimo modelis leidžia imituoti kiek įmanoma realesnės dujų tiekimo sistemos darbą. Daugelyje energetikos sektorių raidos modeliavimo įrankių, imituojant dujų tiekimo sistemos darbą, nėra detaliau nusileidžiama iki fizinių infrastruktūrų darbo modeliavimo, atsižvelgiant į sistemos elementų patikimumą (atsitiktinį sistemų darbą). Tokio pobūdžio dujų tiekimo sistemų darbo imitavimo modelio reikia, norint įvertinti integralių energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą energijos vartotojų atžvilgiu. Dažnai literatūroje pateikiami pavyzdžiai, kuriuose vertinamas energetikos YSI kritiškumas, kai energetikos sistemos išreiškiamos topologiškai atspindint sąryšius tarp elementų ir pačios sistemos struktūros, bet nėra imituojamas jos funkcinis darbas (Cagno et al., 2011).

Energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinime naudojamo gamtinių dujų tiekimo vamzdynais optimizavimo modelio trūkumas yra tai, kad jis funkcionuoja kaip statinis dujų srautų modelis. Daroma prielaida, kad dujų srautai vamzdyno atkarpoms įvertinami prieš modeliavimą (2.53) formule. Energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo metu, kai dirbtinai pašalinami dujotiekio sistemos elementai (inicijuojama atkarpos avarija), turėtų dinamiškai pasikeisti darbinis slėgis vamzdyno atkarpose. Toks pokytis turėtų pakeisti ir vamzdyno atkarpomis perduodamų dujų kiekį. Taip pat modeliavime nėra

atsižvelgiama į gamtinių dujų, esančių vamzdynuose kiekį, t. y. situacija, kai nutraukiamos/atjungiamos visos galimos dujų importo jungtys, tuo atveju nėra importuojamos dujos į valstybę ir vartotojams netiekiamos dujos.

Naftos ir jos produktų tiekimas vamzdynais

Kita svarbi kuro rūšis, naudojama tradicinėse šilumos ir elektros generavimo technologijose, yra nafta (naftos produktai). Ši kuro rūšis dažniausiai naudojama kaip alternatyvus kuras dėl degimo proceso metu išsiskiriančių teršalų gausos (SO_2 , kietųjų dalelių, NO_x). Naftos produktai yra pigesnė žaliava, palyginti su švaresniu kuru, tokiu kaip gamtinės dujos. Mazutą naudojančioms generavimo technologijoms keliami didesni ekologiniai reikalavimai, todėl ši kuro rūšis nėra paklausė. Mazuto tiekimo technologijas energetikos sistemoje būtų galima suskirstyti į tiekimą:

- vamzdynais,
- antžeminiu transportu (geležinkeliais, valstybiniais keliais),
- jūrų keliais.

Mazutas naudojamas kaip alternatyvus kuras, todėl didžiosioms šilumos ir elektros generavimo technologijoms keliami reikalavimai turėti šios kuro rūšies rezervus. Palyginus su gamtinėmis dujomis, mazuto atsargas kaupti nėra sudėtinga. Jam saugoti yra įrengiami rezervuarai: metaliniai, skirti tiek šaltam, tiek karštam mazutui saugoti, ir gelžbetoniniai, skirti šaltam mazutui saugoti.

Mazuto tiekimo modeliui sudaryti galima panaudoti anksčiau aptartą prioritetinį maksimalaus srauto optimizavimo uždavinį, kaip buvo pritaikyta gamtinių dujų tiekimo modeliui. Naftotiekio vamzdyną taip pat patogiu nagrinėti kaip grafą, sudarytą iš $i = 1, 2, \dots, m$ viršūnių ir $j = 1, 2, \dots, n$ briaunų (vamzdyno linijų). Naftotiekio j -osios atkarpos vamzdžio pralaidumas gali būti įvertintas (2.65) formule (Lurie, 2008).

$$OQ_j = \frac{d \cdot 3,1415 \cdot (P_{in} - P_{out})}{16 \cdot \mu \cdot L}; \quad (2.65)$$

čia OQ_j – j -ojo vamzdžio praleidžiamas srautas (mln. $m^3/val.$ – $mm^3/val.$); d – naftotiekio vamzdžio vidinis skersmuo (mm); L – naftotiekio vamzdžio ilgis (km); P_{in} – vamzdžio padavimo slėgis (MPa); P_{out} – vamzdžio išėjimo slėgis (MPa); μ – dinaminis klampumo koeficientas (angl. the factor of dynamic viscosity) ($kg/(m \cdot s)$).

Vamzdyno linijų pralaidumą pažymėjus OQ_j , o j -osios linijos praleidžiamą srautą x_j , galima sudaryti naftotiekio j -osios atkarpos funkcinį priklausomumą ((2.66) formulė), naudojamą infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelyje

$$x_j = F(OQ_j; r_j); \quad (2.66)$$

čia r_j – j -osios naftotiekio atkarpos patikimumo rodiklis, kuris gali būti aprašomas (2.23)–(2.25) formulėmis, įvertinant j -osios naftotiekio atkarpos gedimo tikimybę kilometrui laiko momentu t .

Optimalaus mazuto tiekimo vamzdynais modelis sudaromas pagal (2.59)–(2.64) formules, kai naftotiekio linijų pralaidumas yra ribojamas nelygybėmis:

$$x_j \leq OQ_j, j = 1, 2, \dots, n; \quad (2.67)$$

čia j – orientuoto grafo briaunos numeris (naftotiekio vamzdžio atkarpa).

Kita, dažniausiai naudojama tiek mazutui ir jo produktams, tiek biokurui aprūpinti, kuro tiekimo sistema geležinkeliais ir valstybiniais keliais. Šių tiekimo sistemų privalumas – pakankamai didelis tiekimo produktų pralaidumas (vamzdynais yra didesnis). Šioms tiekimo technologijoms modeliuoti galima pritaikyti maksimalaus srauto optimizavimo uždavinį. Dažniausiai šios tiekimo technologijos naudojamos kaip rezervinio kuro tiekimas, bet tokios sistemos išsamiau nėra nagrinėjamos, laikant, kad šios sistemos pakankamai lanksčios. Taip pat priimama prielaida, kad šios tiekimo sistemos yra patikimos, nes jų gedimo atveju atstatymo laikas yra pakankamai trumpas, palyginus su sistemos modeliavimo periodu. Be to, šios tiekimo sistemos gedimų atveju turi pakankamai alternatyvių transportavimo linijų.

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos modelis

Centralizuoto šilumos tiekimo sistema apibūdinama kaip šilumos energijos, pagamintos vietinių šilumos generavimo technologijų, paskirstymas grupei vartotojų, tokių kaip gyvenamieji namai, administraciniai ar visuomeniniai pastatai, pramonės įmonės ir t. t.

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemą sudaro trys pagrindinės dedamosios dalys:

- šilumos generavimo šaltinis;
- šilumos tiekimo ir paskirstymo vamzdynų tinklas;
- vartotojai (šilumą naudojančios sistemos).

Šilumos tiekimo ir paskirstymo vamzdynais tinklas susideda iš vamzdynų, siurblių, kontrolės ir matavimo prietaisų bei kitų elementų, kuriais termofikacinis vanduo arba garas (šilumnešis) iš šilumos generavimo šaltinių tiekiamas ir skirstomas vartotojams.

Vamzdynai gali būti skirstomi į:

- magistralinius – nuo šilumos generavimo šaltinių iki kiekvieno mikrorajono arba kvartalo;
- skirstomuosius – nuo magistralinių tinklų iki atšakų į pastatus;
- pastatų įvadinius tinklus – atšakos nuo skirstomųjų (arba magistralinių) tinklų iki vartotojų individualių šilumos punktų.

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemą patogų aprašyti kaip orientuotą grafą ((2.52) formulė), kai grafo viršūnės atspindi mazgus, jungiančius vamzdyno linijas arba vartotojus, naudojančius tiekiamą šilumą, o grafo briaunos vaizduoja centralizuoto šilumos tiekimo sistemos vamzdynus. Patį šilumos tiekimo sistemos modelį galima aprašyti kaip maksimalaus srauto optimizavimo uždavinį (Grosswindhager, Voigt ir Kozek, 2011; Chinese, Meneghetti, 2005; Tveit, Savola, Gebremedhin ir Fogelholm, 2009). Kadangi šilumos vartotojai centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje dažnai būna skirstomi pagal prioritetus (šilumos tiekimo pirmumą), pvz., gydymo ar mokymo įstaigos, gyvenamieji namai, pramonės įstaigos ir t. t., tai šilumos tiekimo modelis yra supaprastintas, priimant tam tikras prielaidas dėl procesų,

vykstančių tokio tipo sistemose, ir formuluojamas, kaip daigiatikslis, maksimalaus srauto optimizavimo uždavinys. Šilumos tiekimo sistemos vamzdyno j -osios linijos maksimalus šilumnešio srautas (Johansson, Wernstedt, 2005; Vesterlund, Dahl, 2015):

$$HQ_j = m \cdot cp \cdot (t_1 - t_2); \quad (2.68)$$

čia m – šilumnešio srautas (kg/s); cp – specifinė šilumnešio šiluma (kJ/(kg·°C)); t_1 – tiekiamą šilumnešio temperatūra (°C); t_2 – grįžtama šilumnešio temperatūra (°C).

Šilumnešio srautą galima įvertinti kaip (Kveselis ir Strazdas, 2007):

$$m = \frac{d^{2,632} \cdot \rho^{0,5} \cdot R_l^{0,5}}{0,63^{2,632} \cdot \gamma^{0,125}}; \quad (2.69)$$

čia d – vamzdžio skersmuo (mm); ρ – šilumnešio tankis (kg/m³) (vandens tinklams priimtas $\rho = 975$ kg/m³); R_l – vidutinis slėgio nuostolis vamzdyne (Pa/m); γ – vamzdžių sienelių šiurkštumas.

Tuomet šilumos tiekimo sistemos optimizacinis modelis aprašomas bendrosiomis lygtimis (2.59)–(2.63), kai centralizuoto šilumos tiekimo sistemos vamzdyno linijų pralaidumas ribojamas nelygybėmis:

$$x_j = HQ_j, j = 1, 2, \dots, n; \quad (2.70)$$

čia j – orientuoto grafo briaunos numeris (šilumos vamzdžio atkarpa).

Taip aprašytas šilumos tiekimo sistemos modelis modeliuojamai sistemai leidžia prisitaikyti prie esamos situacijos, kai sistemos elementų darbas, įvertinant elementų patikimumą, yra atsitiktinis. Šis modelis yra deterministinis, tai yra vienas jo trūkumų, kadangi modeliuojant šilumos tiekimo sistemos darbą reikėtų atsižvelgti į slėgių dinamiką ir kitus hidraulinius bei termodinaminius procesus.

Elektros energijos tiekimo elektros tinklais modelis

Elektros energijos tiekimo sistemos yra vienos sudėtingiausių dėl sistemos elementų skaičiaus ir elektros srautų valdymo sistemoje bei procesų, vykstančių jų tinkluose. Netinkamas tokių sistemų valdymas akimirksniu gali sutrikdyti visos valstybės ar net kontinento darbą. Įvykus avarijai ar operatorių klaidai gali prasidėti „kaskadiniai“ gedimai, kai siekiant apsaugoti elektros energetikos sistemos gyvybingumą automatiškai atjungiamos elektros sistemų dalys, kad trikdys neplistų sistemoje. Tai gali lemti ištisų tinklo dalių atjungimą „blackout“. Todėl energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų analizėje elektros energijos tiekimo sistemos daugiausia nagrinėjamos atskirai (Fang, Zio, 2013; Johansson et al., 2013; Dai et. al., 2014). Dažniausiai analizuojami kintamosios srovės elektros tinklai (AC), kurie būna:

- elektros skirstomieji tinklai (10–35 kV),
- elektros perdavimo tinklai (110–330 kV), skirti perduoti elektros energiją dideliais atstumais, nuo stambių paskirstymo mazgų iki skirstomųjų tinklų,

Skirtingi elektros perdavimo tinklai per transformatorių pastotes yra sujungti į integralią sistemą. Daugiausia tiek perdavimo, tiek skirstomuosius elektros energijos tinklus sudaro oro linijų laidai. Tuo tikslu rečiau yra naudojamos kabelinės linijos. Taip pat elektros tinklai skirstomi pagal vardinę įtampą:

- žemos įtampos – 400 V;
- vidutinės įtampos – 10, 35 kV;
- aukštos įtampos – 110 kV;
- superaukštos įtampos – 330 kV.

Dažniausiai elektros tinklai projektuojami, kad galėtų dirbti su padidėjusia įtampa, 6–220 kV (izoliacijos apsauga 15 %), 330 kV (izoliacijos apsauga 10 %).

Elektros energetikos sistemos infrastruktūros elementų patikimumo charakteristikoms įvertinti galima pritaikyti (2.20)–(2.22) formules. Kadangi dauguma elektros energetikos sistemos elementų (transformatoriai, elektros linijos ir t. t.) eksploatuojami jau keletą dešimtmečių, tai šie elementai dažniausiai yra išdirbę įsidirbimo periodą ir dirba normalios eksploatacijos periodu, kai gedimų intensyvumas yra pastovus ir jį galima išreikšti pagal Veibulo dėsnį

$$\lambda_j(t) = \alpha \cdot \lambda_0 \cdot t^{\alpha-1}; \quad (2.71)$$

čia α – formos koeficientas; λ_0 – nusistovėjusio gedimo intensyvumo vertė; t – eksploatavimo trukmė.

Kadangi gedimų intensyvumas normalios eksploatacijos periodu yra pastovus, tai $\alpha = 1$, o $\lambda_j = const$ (pastovus dydis kiekvienu normalios eksploatacijos periodu t). Tuomet elektros energetikos sistemos elemento gedimo tikimybės skirstinys bus eksponentinis (atsitiktinis dydis)

$$Q_j = 1 - e^{-\lambda_j t}. \quad (2.72)$$

Elektros perdavimo linijos gedimo tikimybę atkarpai h per metus būtų galima išreikšti taip:

$$Q_h = \lambda_h \cdot e^{-\lambda_h}. \quad (2.73)$$

Kadangi elektros energetikos sistema yra kompleksinė ir joje vykstantys procesai sudėtingai modeliuojami, tai sudarytame infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelyje elektros energijos tiekimo sistemos modelis yra pagrįstas optimizaciniais elektros srautų skaičiavimais. Pati elektros energijos tiekimo sistema yra agreguota. Jos elementus sudaro transformatorių pastotės (neskaidomos ir smulkesnius sudedamuosius elementus) ir elektros tinklų linijų atkarpos (keletas linijų gali būti apjungiamos į vieną elementą). Taip pat elektros energijos tiekimo sistema dėl paprastumo nagrinėjama kaip perdavimo tinklai. Tokiai elektros perdavimo sistemai modeliuoti pasirinktas klasikinis elektros tinklo tiesinio programavimo uždavinys (Ramana, Ganesh ir Sivanagaraju, 2013; Frank, Steponavice ir Rebennack, 2012; Radziukynas, Radziukyniene, 2009). Šią kompleksinę sistemą patogiausia vaizduoti orientuotu grafu, kurį sudaro n grafo viršūnių (generavimo šaltiniai, vartotojai, pastotės ir t. t.), m briaunų ir elektros linijos atspindinčios sąryšius/jungtis tarp sistemos elementų $\{i, l\}$. k -osios elektros linijos perduodamą galią (angl. power flow) galima išreikšti, kaip linijos aktyviosios galios ir reaktyviosios galios kompleksinių skaičių sumą

$$\sum_{k \in N_i^-} f_k + \sqrt{-1} \cdot \sum_{k \in N_i^-} q_k ; \quad (2.74)$$

čia f_k – aktyviosios galios kiekis (MW); q_k – reaktyviosios galios kiekis (VAr).

Kadangi kintamosios srovės (AC) elektros energijos perdavimo srautas yra sudėtingai aprašomas ir tokio srauto modeliavimas reikalauja didelių skaičiavimo resursų, nes pats elektros energijos perduodavimo srautas priklauso nuo įtampos pokyčių mazguose, nuo kampų tarp įtampos ir srovės mazguose, bei nuo sistemos elementų aktyviųjų ir reaktyviųjų varžų (pvz. linijų, transformatorių ir t. t.), todėl dažniausiai literatūroje autoriai siūlo AC elektros energijos perdavimo srautus modeliuoti priimant tam tikras prielaidas ir atliekant tiesinimo procedūras, kaip nuolatinės srovės (DC) elektros energijos perduodamus srautus, ir imituojant stacionarų elektros energetikos sistemos režimą (Frank et al., 2012; Yu, Sparrow, 2006; Bakirtzis, Biskas, 2003). Elektros energijos srautams modeliuoti autoriai siūlo priimti supaprastinančias skaičiavimus prielaidas (Kirschen, Strbac, 2004).

Disertaciniame darbe siūloma panaudoti elektros energetikos sistemos, analizuojamos kaip grafas, jungumo analizės metodus, leidžiančius įvertinti sistemos vientisumą ir kritiškumą. Grafo jungumo analizė pagrįsta Kruskalio algoritmais (Sudhakar, Srinivas, 2011; Montoya, Ramirez, 2012), naudojant sveikaskaitinius optimizavimo modelius. Elektros energetikos sistema išreikšta kaip grafas ((2.11) išraiška), todėl svarbu įvertinti, ar visi sistemos vartotojai yra vientisoje sistemoje (ar nėra izoliuotų elektros energijos vartotojų). Tokia elektros energetikos sistemos analizė supaprastina visų energetikos sistemų kritiškumo vertinimą ir modeliavimą. Tuo atveju, kai visi elektros energijos vartotojai yra jungioje sistemoje, vartotojams paskirstoma elektros energija.

Šitaip aprašytas elektros energijos tiekimo optimizavimo modelis leidžia paskirstyti generuojamą elektros energiją vartotojams, atsižvelgiant į turimos energijos tiekimo patikimumo grupę, bei į tiekimo sistemos elementų prieinamumą. Vienas šio modelio trūkumų yra tai, kad jis yra diskretus ir analizuoja elektros energetikos sistemą topologiškai.

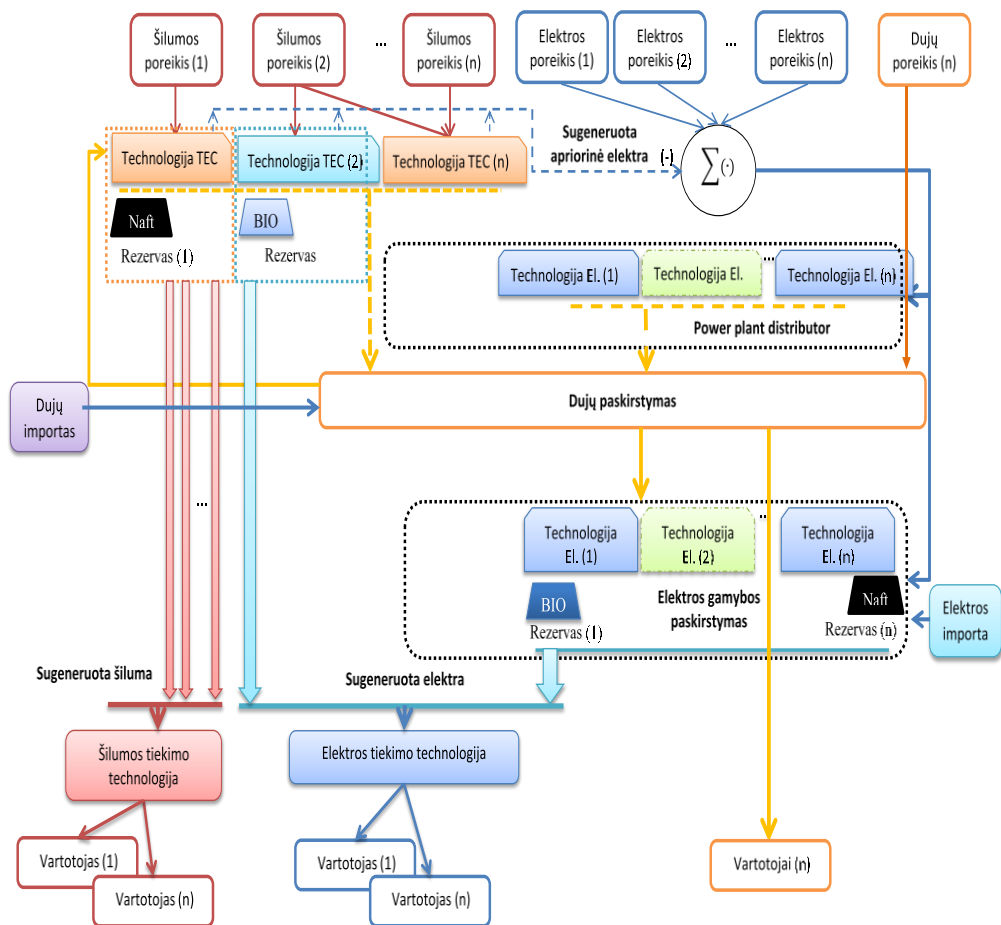
Sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo modelis

Sudarytas energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis, kuriame imituojamas integralios energetikos sistemos darbas, siekiant patenkinti galutinių vartotojų energijos poreikius ir taip išlaikyti gyvybingą energetikos sistemų darbą. Kadangi vertinimo modelyje analizuojama infrastruktūros elemento darbo (funkcionavimo) įtaka visų energetikos sistemų darbui, todėl labai svarbu sukaupti ir susisteminti kiek įmanoma tikslesnę informaciją apie atskirų energetikos sistemų darbą tiek esant normaliai situacijai, tiek ekstremaliai, kiekvienos sistemos infrastruktūros sudėtį (tai labai priklauso ir nuo nagrinėjamos valstybės geografinės padėties ir išsivystymo lygio) bei galimus sąryšius tarp atskirų energetikos sistemų. Kadangi vertinimas vyksta sistemų objektiniu lygiu, labai svarbu susisteminti technines specifikacijas apie sistemų infrastruktūros elementus (atsižvelgiant į analizuojamą detalumą), jų techninio darbo (funkcionavimo) charakteristikas, patikimumo rodiklius ir kitą su infrastruktūros elementu susijusią

informaciją.

Kritiškumo vertinimo modeliui reikia statistinių duomenų iš visų energetikos sektoriaus dedamųjų dalių, tiek pačių sistemų, tiek iš galutinių energijos vartotojų. Ši statistinė energetikos sistemų informacija svarbi tiek modeliuojant jų darbą, tiek vertinant infrastruktūros elementų kritiškumą. Statistiniai duomenys naudojami ir kaip pradiniai duomenys modelio parametrus įvertinti. Vienas pagrindinių šio vertinimo modelio tikslų yra įvertinti nagrinėjamos valstybės energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą, kaip įtaką valstybės energetikos sistemų darbui, vertinant galutinių vartotojų poreikių užtikrinimą ir nustatyti konkrečius energetikos sistemų infrastruktūros elementus ar jų grupes, turinčias įtakos valstybės energetikos sistemų darniai veiklai. Kadangi statistiniai duomenys dažniausiai skelbiami diskrečiais laiko/periodo intervalais, tai energetikos sistemų darbas irgi yra modeliuojamas diskretizuotais laiko intervalais. Galima analizuoti elementų kritiškumą laikotarpyje t : per metus, metų ketvirčiais, mėnesiais ar savaitėmis. Norint modeliuoti kiek įmanoma realesnių energetikos sistemų darbą, reikia išsamesnio laiko intervalų skaidymo, reikalaujančio smulkesnės informacijos apie sistemų darbą ir išsamesnių statistinių duomenų. Tačiau tiek išsamesnė informacija apie infrastruktūrą, tiek statistiniai duomenys dažniausiai yra konfidencialūs.

Pagrindinių vertinimo modelyje nagrinėjamų energetikos sistemų schema pateikiama 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modelis

Energetikos sistemų infrastruktūros modelyje stengiamasi analizuoti daugelyje pasaulio valstybių vyraujančias energetikos sistemas. Tokios energetikos sistemos (elektros, gamtinių dujų ir kito kuro tiekimo) įvardijamos kaip pagrindinės energetikos ypatingos svarbos infrastruktūros. Tačiau disertacijoje analizuojama ir centralizuoto šilumos tiekimo sistema, kuri yra ypač aktuali ir svarbi tokioms valstybėms, kurių geografinė padėtis dėl klimato sąlygų nėra palanki šaltuoju metų periodu. Viena šios sistemos nagrinėjimo priežasčių yra tai, kad tokios sistemos darbo sutrikdymas gali daryti didelį poveikį valstybės socialinei gerovei ir funkcionavimui. Centralizuoto šilumos tiekimo sistemos pasižymi tuo, kad jos, kitaip nei elektros energetikos sistemos, yra lokalias, todėl valstybės energetikos sistemų išplėtojimo lygis, tiek jų patikimumo prasme, tiek geografinės aplinkos prasme, turi didelę įtaką centralizuoto šilumos tiekimo sistemų tinkamam funkcionavimui.

Energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelyje šilumos energijos kiekio poreikis paskirstomas lokalioms šilumos gamybos technologijoms, tokioms kaip termofikacinės elektrinės, šiluminės katilinės, biokurą naudojančios katilinės bei termofikacinės elektrinės ir t. t. Paskirstoma atliekamas

atsižvelgiant į keletą faktorių:

- ar šilumos generavimo technologija yra prieinama;
- ar šilumos generavimo technologijai yra tiekama bent viena kuro rūšis, naudojama technologijos;
- pirmenybė šilumos energijos gamybai teikiama technologijoms pagal jų energijos gamybos naudingumo koeficientą.

Toks šilumos energijos kiekio paskirstymo optimizavimas yra kaip viena galimybių. Taip pat gali būti paskirstoma atliekamas atsižvelgiant ir į taršos, ekonominius rodiklius ir t. t. Įvairioms šilumos energijos paskirstymo gamybai strategijoms įgyvendinti pritaikytas klasikinis, daugiatikslis optimizavimo uždavinys (Kalanta, 2007), kuriam galima suformuoti tokius tikslus kaip: maksimalus vartotojų šilumos energijos poreikių patenkinimas; pirmumo suteikimas šilumos generavimo technologijoms pagal naudojamą paskirstymo strategiją. Optimizavimo modeliui galima įgyvendinti įvairias gamybos strategijas, pavyzdžiui:

- sistemai funkcionuojant normaliu režimu šilumos gamybą galima paskirstyti atsižvelgiant į ekonominius faktorius;
- sistemai funkcionuojant kritiniu režimu šilumos gamybą galima paskirstyti taip, kad su esamais kuro ištekliais būtų galima pagaminti kuo didesnę šilumos poreikio kiekį.

Gali būti ir kitokių gamybos paskirstymo strategijų. Optimizavimo uždavinys formuluojamas taip:

$$\min \sum_{a=1}^w b_a (d_a^- + d_a^+), \quad (2.75)$$

kai

$$s_a : \sum_{i=1}^m x_i + d_a^- + d_a^+ = s_a^0, \quad (2.76)$$

$$d_a^+, d_a^- \geq 0, a = 1, 2, \dots, n, \quad (2.77)$$

$$Q_i^{H \min} \leq x_i \leq Q_i^{H \max}; \quad (2.78)$$

čia d_a^+ , d_a^- – nukrypimai nuo tikslo funkcijos; x_j – priskiriamas šilumos energijos kiekis gamybai j -ajai šilumos gamybos technologijai; s_a – tikslo funkcija; s_a^0 – siekiama tikslo funkcijos reikšmė; b_a – svorinis koeficientas, nurodantis tikslo funkcijų prioritetų tvarką.

Taip suformuluotas optimalus šilumos energijos paskirstymo modelis leidžia imituoti paskirstymo veiklą, atsižvelgiant į lokalios regiono esamą situaciją centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje, kad būtų maksimaliai patenkinami vartotojų šilumos poreikiai. Kiekvienai šilumos generavimo technologijai pagal nustatytus šilumos energijos gamybos kiekius ir technines jos charakteristikas įvertinamas reikiamas naudojamo kuro kiekis.

Sudėtingesnė situacija yra elektros energetikos sistemoje, kadangi ši sistema yra kompleksinė ir globali tiek valstybės, tiek regiono ar kontinento atžvilgiu. Todėl elektros energijos poreikių paskirstymas gamybos technologijoms yra supaprastintas, priimant tam tikras prielaidas. Elektros energijos poreikiams patenkinti naudojamos visos klasikinės elektros energijos generavimo technologijos (išskyrus branduolines elektrines), kurios naudoja atsinaujinančius energijos išteklius, termofikacines ir šilumines elektrines bei importo jungtis su kaimyninėmis valstybėmis. Kadangi pati elektros energijos tiekimo sistema aprašoma kaip diskretinė sistema, todėl kaip ir šilumos energijos paskirstymo atveju, elektros energijos poreikiams paskirstyti galima pritaikyti daugiataksių optimizavimo uždavinį. Elektros energijos gamybos priskyrimas i -ajai generavimo technologijai įvertinamas pagal (2.75)–(2.77) formules:

$$P_i^{el\min} \leq x_i \leq P_i^{el\max}; \quad (2.79)$$

čia $P_i^{el\min}$, $P_i^{el\max}$ – i -osios elektros generavimo technologijos bloko minimali ir maksimali generuojama elektros energija (MW).

Toks optimalus elektros energijos paskirstymo gamybai modelis leidžia, atsižvelgiant į prieinamumą elektros generavimo technologijų energetikos sistemose, užtikrinti vartotojų elektros energijos poreikių patenkinimą. Deja, šis modelis yra diskretinis ir nėra įtrauktos elektros energijos gamybos kvotos generavimo technologijoms. Tai ir yra vienas šio modelio trūkumų. Pasinaudojant daugiataksių optimizavimo uždaviniu, galima įgyvendinti įvairias elektros energijos generavimo strategijas, pavyzdžiui, suteikti prioritetus elektros generavimo technologijoms, naudojančioms atsinaujinančius energijos išteklius, arba pasinaudojant technologijos pirminės energijos konvertavimo naudingumo koeficientais ir atsižvelgiant į taršos rodiklius parinkti ekonomiškiausias generavimo technologijas.

2.8 Svarbos ir jautrumo analizė

Šiame skyriuje aptariamos parametų jautrumo ir svarbos analizės bei rezultatų neapibrėžtumo klausimai.

Klasikiniam vertinimo (analizės) modeliui atliekant rezultatų neapibrėžties ir jautrumo analizes galima pritaikyti gerai žinomus ir išplėtus programinius paketus, skirtus tokio tipo analizei. Būtų galima paminėti keletą dažniausiai naudojamų programinių paketų: SUSA (angl. *Software System for Uncertainty and Sensitivity Analyses*) (Kloos, 2008), tai Vokietijos kompanijos GRS sukurtas įrankis; SIMLAB (angl. *SIMulation LABoratory for Uncertainty and Sensitivity Analysis*) (Joint Research Centre, 2013) ir kiti.

Energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis priklauso nuo pradinių parametų reikšmių, kurios dažniausiai nėra tiksliai žinomos. Taip pat jos gali keistis realiose situacijose. Daugelis modelio pradinių parametų (pradinių duomenų) įvertinami iš realių sistemų darbo statistinių rodiklių duomenų. Kadangi infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis pagrįstas Monte-Karlo imitaciniais modeliavimais (imituojant atsitiktinį sistemų darbą), kurių esmė nustatyti rezultato neapibrėžtį atsižvelgiant į faktorių atsitiktinumą prigimtį

(gedimo tikimybės, infrastruktūros elementų parengtumas ir t. t.), todėl atskira rezultatų neapibrėžties analizė nėra reikalinga, nes patys modelio rezultatai rodo rezultatų neapibrėžtumą, t. y. gauti infrastruktūros elementų kritiškumo rezultatai išreiškiami tikimybinėmis charakteristikomis (vidurkiais, dispersijomis, elementų kritiškumo skirstiniais). Galima teigti, kad pats modelis iš savęs elementų kritiškumo vertinimo metu įvertina parametrų neapibrėžtumą, kuris atsiranda dėl energetikos sistemų supaprastinimo ir energetikos sistemų modelio pradinių duomenų (gaunamų iš statistinių rodiklių).

Lieka atviri klausimai, kaip nustatyti, kurie iš sistemos elementų yra svarbiausi ir turi didžiausią įtaką modeliavimo rezultatams. Pagrindinė charakteristika, kuria nustatoma sistemos elementų svarba, yra infrastruktūros elementų kritiškumo įvertis. Kadangi energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimas pagrįstas tikimybiniais modeliais, kuriems nėra tinkami klasikiniai jautrumo analizės metodai, todėl jautrumo analizei pritaikomi tikimybiniai vertinimo matai (svarbos analizė). Pasinaudojant rizikos analizėje išplėta svarbos matavimų ir jautrumo analize, galima gauti papildomus rezultatus apie atskirų infrastruktūros elementų svarbą ir jautrumą skaičiavimo rezultatams.

Energetikos sistemų infrastruktūros elementų (kritiškumų) svarbos analizė (angl. importance measures) išskiria, kurie infrastruktūros elementai yra svarbesni sistemos kritiškumui. Elementų svarbos analizė vertinant elementų įtaką sistemos patikimu dažniausiai taikoma tikimybinėje saugos analizėje (Rausand, Høyland, 2004; Voronov, Alzbutas, 2013; Van der Borst, Schoonakker, 2001). Rizikai vertinti įprastai naudojami tokie svarbos matai:

- Birnbaumas matas;
- Fussell-Vesely matas;
- Rizikos pasiekimo vertė;
- Rizikos mažinimo vertė;
- Kritiškumo svarba;
- Diferencialinis svarbos matas.

Sistemos elementų svarbos analizė taip pat parodo, kaip pasikeistų energetikos sistemų kritiškumo įvertis (sistemų kritiškumo lygis), jei pasikeistų infrastruktūros elementų patikimumas (Rausand, Høyland, 2004; Voronov, Alzbutas, 2013; Contini, Fabbri ir Matuzas, 2009).

Dažniausiai jautrumo analizei, naudojant elementų svarbos analizę, yra įprasta naudoti Birnbaum ir Fussell-Vesely matavimus (Contini et al., 2009; Van der Borst, Schoonakker, 2001; Kuo, Zhu, 2012).

Birnbaumas matas apskaičiuojamas vertinant sistemos patikimumo pokytį, kai sistemos elementas yra sugedęs ir kai sistemos elementas yra veikiantis (Contini et al., 2009). Šis svarbos analizės metodas yra gerai žinomas iš klasikinės jautrumo analizės (Rausand, Høyland, 2004). M. van der Borst pasiūlė svarbos analize vertinti pasinaudojant sistemos rizikos lygių pokyčiu (Van der Borst, Schoonakker, 2001). Birnbaumas svarbos matas energetikos sistemų kritiškumo atžvilgiu išreiškiamas (2.80) formule:

$$I_k^{BI} = \bar{c}^{(z_k=1)} - \bar{c}^{(z_k=0)}, \quad \forall k \in \mathcal{K}; \quad (2.80)$$

čia $\bar{c}^{(z_k=1)}$ – vidutinis sistemų kritiškumo lygis, kai k -asis elementas yra sugedęs, kiti sistemos elementai veikia atsitiktinai, priklausomai nuo patikimumo; $\bar{c}^{(z_k=0)}$ – vidutinis sistemų kritiškumo lygis, kai k -asis elementas yra veikiantis (visiškai patikimas), kiti sistemos elementai priklauso nuo patikimumo ir veikia atsitiktinai.

Energetikos sistemų modelio jautrumo analizės metu naudojamas Birnbaumo svarbos matas. Jei infrastruktūros elemento I_k^{BI} įvertis (2.80) yra didelis, tai mažas k -ojo elemento patikimumo pokytis turės didelės įtakos sistemos kritiškumo lygiui. Birnbaumo svarbos matas priklauso tik nuo sistemos struktūros ir kitų elementų patikimumo, tačiau nepriklauso nuo k -ojo elemento patikimumo.

Fussell-Vesely matas apskaičiuojamas vertinant pokytį, kai sistemų darbas yra atsitiktinis, t. y. visi sistemų elementai dirba atsitiktinai, priklausomai nuo jų patikimumo (Bazinis sistemų kritiškumas) su sistemų kritiškumu, kai k -asis elementas yra veikiantis (visiškai patikimas), santykiu su baziniu sistemų kritiškumu. Taip yra vertinama k -ojo elemento patikimumo įtaka (elemento neprieinamumas) sistemų kritiškumui:

$$I_k^{FV} = \frac{\bar{c}^{(bazinis)} - \bar{c}^{(z_k=0)}}{\bar{c}^{(bazinis)}}, \quad \forall k \in \mathcal{K}; \quad (2.81)$$

čia $\bar{c}^{(bazinis)}$ – vidutinis sistemų kritiškumo lygis, kai elementai sistemoje veikia atsitiktinai, priklausomai nuo patikimumo; $\bar{c}^{(z_k=0)}$ – vidutinis sistemų kritiškumo lygis, kai k -asis elementas yra veikiantis (visiškai patikimas), kiti sistemos elementai, priklausomai nuo patikimumo, veikia atsitiktinai.

Fussell-Vesely matas taip pat gali būti naudojamas nustatant komponentus, kurių saugumą (patikimumą) reikėtų gerinti. Kai abu svarbos analizės rezultatai įgyja sąlyginai dideles reikšmes, kritiškumą galima sumažinti padidinus k -ojo elemento patikimumą arba pagerinus šio elemento apsaugą. Taip pat galima sumažinti kritiškumą dubliuojant kritinį sistemos elementą (Van der Borst, Schoonakker, 2001; Espiritu, Coit ir Prakash, 2007; Baroud, Ramirez-Marquez, Barker ir Rocco, 2014; Kim, Han, 2009). Kitaip tariant, kritiškumo rezultatai jautriai reaguotų į tokio k -ojo elemento parametrų pokytį. Todėl pirmajame žingsnyje pirmiausia galima įvertinti sistemos elementų svarbos matų įverčius, nustatant, kurie iš elementų turi įtakos kritiškumo rezultatų jautrumui, ir kitame žingsnyje įvertinti jau atrinktų elementų parametrų jautrumą.

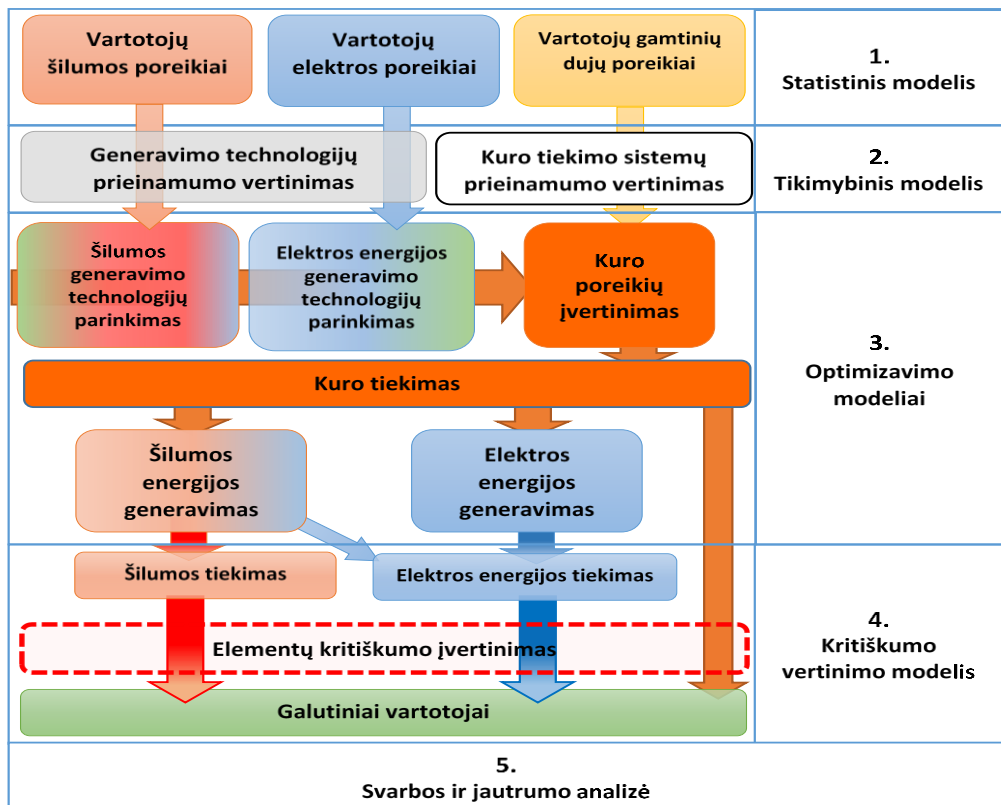
Jautrumo analizę būtų galima atlikti keičiant Δx % vieno iš svarbos matavimų metu atrinkto elemento (pvz., k -ojo elemento) kurio nors parametro reikšmę, kai likusių elementų parametrų reikšmės yra fiksuotos. Tada pakartoti k -ojo elemento kritiškumo vertinimą ir palyginti gautąjį kritiškumo rezultatą su pradiniu (kai analizuojamas elemento parametras nėra pakitęs) elemento kritiškumu. Šis palyginimas parodytų, kiek procentų pakito galutinis k -ojo elemento kritiškumo rezultatas Δy %, pakitus konkretaus k -ojo elemento analizuojamo parametro pradinei

vertei Δx %. Jeigu kritiškumo rezultato pokytis Δy % yra teigiamas, tai parametras turi teigiamą įtaką modeliavimo rezultatams. Kitu atveju, kai skirtumas yra neigiamas, parametras turi neigiamą įtaką kritiškumo rezultatui. Taip padidinamas elemento kritiškumo įvertis, kartu ir visos sistemos kritiškumo lygis.

Antrojo skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje pristatyta nauja energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo metodika, kurią taikant galima įvertinti energetikos sistemų infrastruktūros elementų ir jų grupių kritiškumą, kai yra atsižvelgiama į atsitiktinį sistemų darbą bei vertinimas atliekamas galutinių energijos vartotojų atžvilgiu. Ši vertinimo metodika pagrįsta keliais skirtingais kritiškumo vertinimo modeliais:

- infrastruktūros elementų (jų grupės) kritiškumo vertinimo metrika, skirta įvertinti elementų kritiškumą deterministiniu ir tikimybiniais metodais,
- infrastruktūros elementų (jų grupės) kritiškumo įvertis, kuris parodo, kokią poveikį galutinių vartotojų energijos poreikiams užtikrinti turi elemento pašalinimas iš sistemos,
- optimizaciniai energetikos sistemų modeliai, leidžiantys įgyvendinti įvairias energetikos sistemų valdymo strategijas, taip pat imituoti kuo realesnį sistemų darbą.



2.8 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo schema

Bendra energetikos sistemų kritiškumo vertinimo schema pateikta 2.8 pav. Pats elementų ar jų grupių kritiškumo vertinimo modelis pagrįstas Monte-Karlo iteraciniais skaičiavimais bei tikimybiniais vertinimais (elementai klasterizuojami pagal logistinę regresiją). Elementų arba jų grupių kritiškumas gali būti vertinamas pažingsniui.

Iš pradžių įvertinami pradiniai duomenys iš surinktos statistinės informacijos apie nagrinėjamų energetikos sistemų darbą, t. y. parenkant laiko, sezoniškumo periodą, kuriame bus analizuojami infrastruktūros elementai.

Antrajame etape įvertinamas energetikos sistemų elementų parengtumas/prieinamumas. Monte-Karlo metodu kiekvienos iteracijos metu imituojamas infrastruktūros elementų atsitiktinis darbas (elementų prieinamumas), atsižvelgiant į šių elementų patikimumo charakteristikas (2.5 poskyris).

Trečiajame etape modeliuojamas energetikos sistemų funkcionavimas, pasinaudojant sistemų optimizaciniais modeliais, atsižvelgiant į atsitiktinio sistemų darbo ir įgyvendinamų energetikos sistemų valdymo strategijas (2.5 poskyris).

Ketvirtajame etape atliekamas infrastruktūros elementų ar jų kombinacijų kritiškumo įvertinimas, kurį galima atlikti deterministiniu kritiškumo vertinimo modeliu (2.3 poskyris), kai analizuojama elementų ar jų kombinacijų (priverstinai pašalintų ir energetikos sistemų) įtaka priimant prielaidą, kad likę infrastruktūros elementai funkcionuoja patikimai. Tokiu deterministiniu vertinimo modeliu nustatoma dauguma kritinių infrastruktūros elementų, tačiau šių elementų kritiškumas nėra įvertintas konservatyviu atveju. Deterministiniu būdu įvertintų elementų ar jų grupės kritiškumui galima atlikti papildomą analizę, atsižvelgiant į tų elementų ar jų grupės patikimumo charakteristikas, taip įvertinant kritiškumo riziką (2.4 poskyris). Išsamesnį elementų ar jų grupės kritiškumą galima įvertinti tikimybinio elementų kritiškumo vertinimo modeliu, kai atsižvelgiama į visų energetikos sistemų atsitiktinį darbą (2.5 poskyris). Tokiems atsitiktinai dirbančių sistemų kritiniams elementams nustatyti naudojamas logistinės regresijos (elementų klasterizavimo) modelis (2.6 poskyris), kuriuo galima nustatyti tiek pavienius kritinius infrastruktūros elementus, tiek jų kombinacijas.

Penktajame etape vertinimo rezultatams atliekama modelio svarbos vertinimo ir jautrumo analizė (2.8 poskyris).

Sudarytą kritiškumo vertinimo metodiką galima pritaikyti bet kurios šalies energetikos sistemoms, sudarytoms iš įvairios struktūros infrastruktūrų, vertinti. Vertinimo metodikos silpnąją pusę būtų galima įvardyti, kad reikia ganėtinai išsamios informacijos ir techninių duomenų apie nagrinėjamas šalies energetikos sistemas, kurie dažniausiai yra konfidencialūs. Taip pat gauti vertinimo rezultatai turėtų būti koduojami dėl saugumo.

Pagrindinis skirtumas, palyginti su kitomis ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo/pažeidžiamumo vertinimo metodikomis, yra tai, kad atliekama detalios agreguotos infrastruktūros vertinimo analizė, atsižvelgiant tiek į atsitiktinį sistemų darbą, tiek į vartotojų energijos poreikių užtikrinimą.

3 AGREGUOTŲ LIETUVOS ENERGETIKOS SISTEMŲ KRITIŠKUMO TYRIMAS

3.1 Agreguotas Lietuvos energetikos sistemų modelis

Šiame skyriuje pristatomas Lietuvos energetikos sistemų kritiškumo vertinimas. Kaip tyrimo objektas buvo pasirinktos Lietuvos energetikos sistemos, kurioms buvo taikoma sukurta infrastruktūros kritiškumo vertinimo metodika. Tyrimui atrinktos svarbiausios Lietuvos energetikos agreguotos sistemos:

- Elektros;
- Centralizuoto šilumos tiekimo;
- Gamtinių dujų tiekimo (nafta ir jos produktai, naudojami kaip rezervinis kuras);
- Atsinaujančių energijos išteklių sistemos.

Agreguotų Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumui tirti parenkamas vienas modeliavimo periodas (metų ketvirtis), įvertinamas infrastruktūros kritiškumas ir nustatomi jos kritiniai elementai bei įvairios jų kombinacijos. Sudarytame energetikos sistemų modelyje pateikiami skirtingų sistemų sąryšiai, tiek infrastruktūros topologine, tiek funkcinė prasme. Disertacijos prieduose pateikiama pradinė informacija ir duomenys, kurių reikia sudarytam Lietuvos energetikos sistemų modeliui tirti. Infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimas atliekamas atsižvelgiant į jau įgyvendintus energetikos sektoriaus plėtros projektus. Taip pat palyginamas kai kurių numatomų plėtros projektų poveikis energetikos sistemų kritiškumui. Disertacijoje pateikiamas elementų kritiškumo vertinimas parinktose energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijose.

Infrastruktūros elementų kritiškumo pagrindiniai rezultatai pateikiami elektros ir centralizuoto šilumos tiekimo, nagrinėjamuose miestuose, sistemų galutinių vartotojų atžvilgiu. Pagrindinių energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumas, kaip pateikta metodikoje, yra vertinamas dviem etapais: kai vertinamas infrastruktūros elemento kritiškumas deterministiniu atveju (priimant prielaidą, kad visi infrastruktūros elementai veikia patikimai) ir vertinant infrastruktūros elementų kritiškumą, kai energetikos sistemų darbas atsitiktinis įvertinant elementų patikimumą (tikimybinis vertinimas). Energetikos sistemų kritiniai elementai ir jų kombinacijos (kartu su kritiškumo įverčiais) pateikiami kaip pagrindiniai rezultatai. Gauti rezultatai taip pat priklauso nuo prielaidų, priimtų energetikos sistemų modelio sudarymo metu. Modeliavimo prielaidos vertinant kritiškumą daugelyje energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų yra vienodos (prielaidos priklauso nuo nagrinėjamos infrastruktūros topologijos).

Vis dėlto, kadangi energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimo rezultatai atskleidžia (kritiškumo prasme) jautrias šių sistemų vietas, vertinant galutinių vartotojų poreikio užtikrinimo atžvilgiu, todėl energetikos sistemų infrastruktūros elementus žymėsime kodais (naudojama numeracija): $z_1, z_2, z_3, \dots, z_N$. Energetikos sistemų infrastruktūros nagrinėjami elementai koduojami intervalais. Gamtinių dujų tiekimo sistemos vamzdynų atkarpos žymimos intervale nuo z^1 iki z^{90} , nagrinėjamų miestų CŠT sistemų šiluminės energijos generavimo technologijos (termofikacinės elektrinės ir šiluminės katilinės, naudojančios gamtines dujas kaip

pagrindinį kurą) žymimos intervale nuo z^{91} iki z^{126} . Lietuvos elektrinės blokai žymimi nuo z^{127} iki z^{133} . Technologijos, naudojančios atsinaujinančius energijos išteklius (šilumos ir elektros generavimo technologijos, naudojančios biokurą, hidroelektrinės, vėjo jėgainės), žymimos nuo z^{134} iki z^{157} . Žinoma, ekspertui, išmanančiam Lietuvos energetikos sistemų struktūrą, gali būti nesudėtinga identifikuoti nagrinėjamus kritinius infrastruktūros elementus.

Modeliavimo prielaidos ir nagrinėjamos infrastruktūros modifikacijos

Sudarytam Lietuvos energetikos sistemų modeliui buvo naudojami prieinami statistiniai duomenys, informacija apie šalies energetikos sistemų infrastruktūros topologiją bei ekspertinis vertinimas priimant modeliavimo prielaidas.

Kadangi šios kritiškumo vertinimo metodikos tikslas yra įvertinti ir nustatyti šalies energetikos sistemų kritinius infrastruktūros elementus, tai agreguotų Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūra yra modeliuojama kaip vienas regionas (uždaras energetikos sektorius). Nagrinėjamos infrastruktūros modifikacijose priimama prielaida, kad modeliuojant energetikos sistemų darbą yra visiškai užtikrinamas kuro importavimas, t. y. nenagrinėjami galimi politiniai ar ekonominiai tiekimo trikdžiai. Elektros importas taip pat nėra įtraukiamas, priimant prielaidą, kad šalies energetikos sistemų turima infrastruktūra turi užtikrinti vartotojų energijos poreikio patenkinimą (elektros jungtys nenagrinėjamos).

Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumui vertinti pasirinktas šaltasis metų laikas (pirmas metų ketvirtis), nes šiuo periodu yra didžiausias šilumos ir elektros energijos poreikis, išskylantis dėl nepalankių oro sąlygų, tuo tarpu energijos gamybai modeliuoti pasirinktos pagrindinės šalies miestų šiluminės, termofikacinės elektrinės, miestų katilinės bei atsinaujinančius energijos išteklius naudojančios technologijos (hidroelektrinės, vėjo parkai, biokatilinės ir biokurą naudojančios termofikacinės elektrinės). Kadangi fotoninė elektros energija sudaro santykinai nedidelę procentinę dalį bendro šalies elektros energijos balanso, tai šio tipo energijos generavimo technologijos, dėl modeliavimo išteklių, nebuvo nagrinėjamos.

Modeliavimui pasirinktos elektros, šilumos ir gamtinių dujų tiekimo sistemos. Sistemų ir infrastruktūros elementų kritiškumas buvo nagrinėjamas tik elektros ir centralizuoto šilumos tiekimo sistemų galutinių vartotojų atžvilgiu.

Šilumos energijos poreikiai buvo analizuojami šešiuose didžiuosiuose šalies miestuose: Vilniaus, Kauno, Klaipėdos, Šiaulių, Panevėžio ir Mažeikių. Poreikiams nustatyti buvo naudojama prieinama statistinė informacija, pateikta leidiniuose (LŠTA, 2012; Lietuvos energetika, 2011). Modeliavimas atliekamas naudojant 2010–2011 m. energijos poreikių statistinius rodiklius (išsamesnė poreikių informacija pateikta prieduose) ir modeliuojant nėra atsižvelgiama į energijos poreikių ateities prognozes.

Centralizuotos šilumos tiekimo sistemų infrastruktūros pasirinktuose šalies miestuose nebuvo išsamiau analizuojamos, manant, kad šilumos tiekimas yra patikimas. Tokia prielaida pasirinkta dėl sudėtingų ir gerai išplėtotų CŠT sistemų, turinčių pakankamai dubliuojančių vamzdinių, bei šilumos generavimo technologijų CŠT sistemose. Šilumos vartotojų poreikiams patenkinti naudojamos termofikacinės elektrinės, dirbančios termofikaciniu režimu, dėl to, kad kritiškumo analizė atliekama

šaltuoju metų laiku. Taip pat šilumos poreikiai patenkinami naudojant šiluminės katilines, biokurą naudojančias katilines ir termofikacines elektrines. Šios šilumos generavimo technologijos yra analizuojamos, kaip atskiros technologijos, neapjungiant į vieną. Siekiant detalumo ir išsamesnio infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo, į modelį būtų galima įtraukti pasirinktų miestų agreguotų CŠT sistemų modelius, atsižvelgiant į elementų patikimumą.

Kadangi elektros energijos tiekimo sistema yra sudėtinga ir išplėtotą, pagal *N-1* sistemos patikimumo principą, bei informacija apie ją sunkiai prieinama, modeliuojant priimta prielaida, kad analizuojamas bendras (visas) šalies elektros energijos poreikis, neskaidant į atskirų šalies miestų poreikius ir energijos tiekimą jiems. Elektros energijos poreikiams nustatyti buvo naudojama statistinė informacija, pateikta leidiniuose (Lietuvos energetika, 2011; Lietuvos Respublikos energetikos ministerija, 2011) bei elektros perdavimo sistemos operatoriaus (LITGRID, 2013).

Elektros energijos poreikiams patenkinti naudojamos pagrindinės šalies elektros generavimo technologijos: Lietuvos elektrinė, didžiųjų miestų termofikacinės elektrinės ir elektros energiją generuojančios technologijos, naudojant AEI. Modeliuojant priimta prielaida, kad elektros energijos poreikius turi patenkinti turima šalies infrastruktūra. Suprantama, kad tai neatitinka šalies elektros sistemos realios situacijos, nes apie 60 % elektros energijos (nuo bendrųjų vidaus sąnaudų) importuojama iš kaimyninių šalių. Elektros energijos gamyba paskirstoma generavimo technologijoms, pirmumą suteikiant AEI naudojančioms elektrinėms: hidroelektrinėms (modeliavime naudojama Kauno hidroelektrinė ir mažosios šalies hidroelektrinės apjungiamos į vieną generavimo technologiją) ir vėjo elektrinėms, kurios modeliuojant apjungiamos į du šalies vėjo parkus. Taip pat, po AEI naudojančių elektros generavimo technologijų, elektros energijos gamybos prioritetą suteikiamas termofikacinėms elektrinėms (TE pagaminamas elektros energijos kiekis priklauso nuo generuojamo šilumos kiekio). Kadangi elektros energijos importas nėra nagrinėjamas, tai Lietuvos elektrinės darbo apkrovimas yra daug didesnis nei realus elektrinės darbas. Atominė elektrinė nėra analizuojama. Išsamesnė informacija apie elektros energetikos sistemą pateikta 1 priede.

Energetikos sistemų modelyje gamtinės dujos, kaip pagrindinė pirminė kuro rūšis, naudojama energijai gaminti, todėl ši kuro tiekimo infrastruktūra (gamtinių dujų tiekimo sistema) nagrinėjama objektų lygiu, išskaidant ją į atskirus elementus (šalies dujotiekio atkarpomis). Išlaikant topologinę sistemos struktūrą, modeliuojant naudojami tik magistraliniai dujotiekiai. Dujų kompresorių ir skirstymo stotys nėra analizuojamos. Dujotiekio sistemos patikimumo charakteristikoms įvertinti yra panaudoti patikimumo rodikliai, pateikti EGIS (EGIG, 2011) duomenų bazėse. Išsamesnė informacija apie gamtinių dujų tiekimo sistemą pateikta 1 priede.

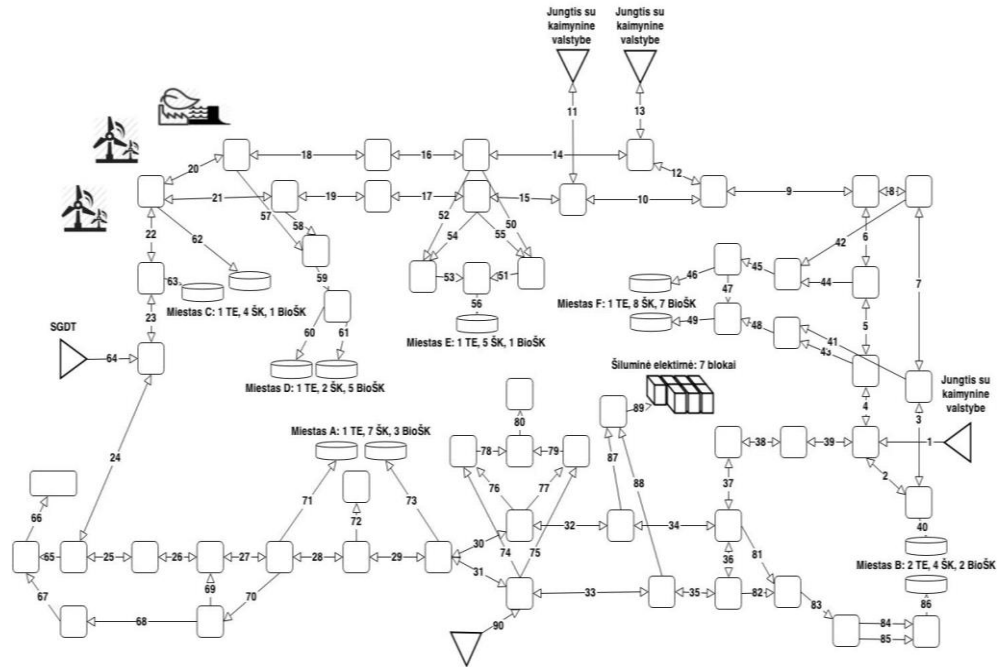
Kitos kuro rūšys (mazutas ir biokuras) modelyje naudojamos kaip rezervinis (alternatyvus) kuras, todėl jo tiekimo sistemos nėra išsamiau skaidomos ir analizuojamos. Priimama prielaida, kad šių kuro tiekimo sistemų (naftotiekių, tiekimas geležinkeliais ir valstybiniais keliais) darbas yra patikimas, t. y., šių tiekimo sistemų elementų atstatymo laikas (gedimo atveju) yra sąlyginai trumpas, palyginus su modeliavimo periodu. Modeliavimo metu atsižvelgta tik į rezervinio kuro prieinamumo rodiklius (ekspertiškai).

Modeliavimui pasirinktas žingsnis yra vienas metų ketvirtis. Kadangi infrastruktūros elementų kritiškumas vertinamas centralizuoto šilumos tiekimo ir elektros sistemų atžvilgiu, tai modeliavimui parinktas 2011 m. pirmas ketvirtis, kuriame šilumos poreikis yra didžiausias, palyginus su 2009 ir 2010 m.

Energetikos sistemų kritiniams infrastruktūros elementams nustatyti pasirinkti kritiškumo slenksčiai.

Vertinant infrastruktūrų elementų kritiškumą $N-1$, $N-2$ ir $N-3$ principu, kritiniams elementams ir jų kombinacijoms nustatyti buvo naudojami kritiškumo slenksčiai: atitinkamai 0,1, 0,5 ir 0,6 (rekomenduojami kritiškumo slenksčiai). Visi elementai po vieną, po du ar tris, kurių kritiškumas yra didesnis už atitinkamą kritiškumo slenkstį, yra laikomi kritiniais nagrinėjamos sistemos atžvilgiu. Taip yra sudaromos kritinių elementų ir jų kombinacijų aibės, kurių apsaugai ar patikimumui užtikrinti reikėtų skirti papildomą dėmesį.

Vertinant energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą, energetikos sistemų infrastruktūra yra sudaryta iš 157 elementų. Šių energetikos sistemų topologinis modelis pavaizduotas 3.1 pav.



3.1 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros topologinė schema

Šios pagrindinės modeliavimo prielaidos tinka daugeliu nagrinėtų elementų kritiškumo vertinimo atvejų. Papildomos prielaidos arba jų konfigūravimas bus paminėti prie atitinkamų kritiškumo vertinimo rezultatų (energetikos sistemų arba infrastruktūros elementų).

Lietuvos energetikos sektorius aktyviai plėtojamas naujais infrastruktūros plėtros projektais. Pastaruoju metu nemažai svarbių energetikos infrastruktūros projektų yra užbaigti arba pradėti plėtoti, tokie kaip: suskystintų gamtinių dujų

terminalas, elektros jungtys su Švedija ir Lenkija ir t. t. Todėl modeliuojant būtina apibrėžti, kokia energetikos sistemų konkreti modifikacija yra analizuojama. Norint atskirai įvertinti esamų energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo situaciją ir naujų energetikos projektų įtaką kritiškumui, darbe pirmiausia modeliuojama bazinės energetikos sistemų infrastruktūros sudėtis (modelis), kuris yra agreguotas ir artimas 2013–2014 m. Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros struktūrai (M2). Šio energetikos sistemų modelio išsamesnis aprašymas pateiktas 1 priede.

Tiek energetikos sistemų, tiek energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumui vertinti taikomas bazinis energetikos sistemų modelis. Energetikos sistemų kritiškumui sumažinti nagrinėjami trys energetikos sistemų infrastruktūros projektai, susiję su gamtinių dujų tiekimo sistemos plėtra, kurie pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros modelio modifikacijos

Infrastruktūros modelio žymėjimas	Energetikos sistemų modelio apibūdinimas
M1	Infrastruktūros struktūra artima M2 modelio modifikacijai nenagrinėjant suskystintų gamtinių dujų terminalo įtakos energetikos sistemų kritiškumui.
M2	Bazinės energetikos sistemų infrastruktūros modelis (struktūra artima 2013–2014 m. situacijai).
M3	Infrastruktūros struktūra artima M1. Dujotiekių jungties tarp Lietuvos ir Latvijos pajėgumų padidinimas iki 12 mln. m ³ dujų per parą.
M4	Infrastruktūros struktūra artima M1. Dujotiekių jungtis tarp Lenkijos ir Lietuvos, kai numatomas pajėgumas 4,1 mlrd. m ³ dujų per metus.

Pirmiausia nagrinėjama energetikos sistemų struktūra M1, kuri atvaizduoja bazinės modifikacijos energetikos sistemų infrastruktūros modelį, kai pagrindinis gamtinių dujų tiekimas yra užtikrinamas iš Baltarusijos ir Latvijos, o suskystintų gamtinių dujų terminalas nėra įtraukiamas į modelį. Tokia prielaida priimama siekiant nustatyti, kokią įtaką SGDT turi mažinant kritiškumą energetikos sistemų infrastruktūroms. Vertinamas esamos energetikos sistemų infrastruktūros poveikis elektros ir centralizuoto šilumos tiekimo sistemų vartotojų poreikiams užtikrinti.

Antrosios – M2 energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijos sudėtis yra bazinė, kai pagrindinis gamtinių dujų tiekimas užtikrinamas iš Baltarusijos ir Latvijos bei suskystintų gamtinių dujų terminalo. Ši modifikacija laikoma bazine, kadangi tokios agreguotos struktūros energetikos sistemų infrastruktūra realiausiai atspindi 2014 m. Lietuvos energetikos sistemų situaciją. Ši bazinė energetikos sistemų infrastruktūros modifikacija bus analizuojama siekiant nustatyti kritinius infrastruktūros elementus (jų kombinacijas) tiek deterministiniu, tiek tikimybinu kritiškumo vertinimo metodu. Vertinama, kokią įtaką tai turi elektros ir centralizuoto šilumos tiekimo sistemų vartotojų poreikiams užtikrinti.

Trečiosios – M3 energetikos sistemų infrastruktūros sudėtis ir prielaidos yra tokios pačios kaip ir M1 infrastruktūros modifikacijos, t. y. pagrindinis gamtinių dujų tiekimas yra užtikrinamas iš Baltarusijos ir Latvijos. Papildomai šioje M3 modifikacijoje nagrinėjamos sistemos, kai yra padidintas gamtinių dujų tiekimo

pajėgumas iš Latvijos į Lietuvą. Žinant, kad šioje infrastruktūros vietoje susidaro gamtinių dujų tiekimo butelio kaklelio (angl. bottleneck) problema (Focus Group on Regional Cooperation, 2013.) ir dėl to gali padidėti sistemų kritiškumas.

Ketvirtosios – M4 energetikos sistemų infrastruktūros sudėtis ir prielaidos yra tokios pačios kaip ir M1 infrastruktūros modifikacijos, t. y. pagrindinis gamtinių dujų tiekimas užtikrinamas iš Baltarusijos ir Latvijos, priimant prielaidą, kad yra įgyvendinta gamtinių dujų tiekimo jungtis tarp Lenkijos ir Lietuvos, vertinant, kokią įtaką tai turės mažinant kritiškumą energetikos sistemų infrastruktūroms.

3.2 Rezultatų analizė

Kritinių energetikos sistemų infrastruktūros elementų nustatymas deterministiniu metodu

Pagrindinių Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros kritiniams elementams nustatyti, kai yra atsižvelgiama tik į infrastruktūros topologiją, atlikta bazinės sudėties (M2) energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo analizė (deterministinis vertinimas). Šis vertinimas atliktas nagrinėjant elementų gedimų kombinacijas po vieną, po du ir po tris elementus, kai šie elementai sistemoje priverstinai išjungiami (2.3 poskyris). Analizuojant modeliavimo rezultatus, reikėtų turėti omenyje, kad energetikos sistema laikoma kaip uždara ir artima esamai Lietuvos energetikos struktūrai, todėl kai kurių energetikos sistemų (rodikliai) ar jos infrastruktūros elementų darbas nebūtinai atvaizduojamas, kaip yra realiame energetikos sektoriuje. Pagrindiniai rezultatai pateikiami vertinant infrastruktūros elementų kritiškumą (metodika pateikta antrajame disertacijos skyriuje) elektros sistemos ir kelių būdingų miestų CŠT sistemos vartotojų atžvilgiu. Likusių miestų vartotojų atžvilgiu elementų kritiškumo rezultatai pateikiami disertacijos 2 priede.

Nagrinėjant infrastruktūros elementų kritiškumą (po vieną elementą) elektros sistemos atžvilgiu kritinių elementų skaičius yra mažas (kai elementų kritiškumas yra didesnis už slenkstį 0,1). Vertinant buvo nustatytas tik vienas tokį kritiškumą turintis elementas z^{89} , ($c^{89} = 0,326$, t. y. apie 33 % elektros energijos poreikių būtų nepatenkinta, kai šis elementas būtų atjungtas). Tokia situacija yra natūrali, kadangi sistemos suprojektuotos pagal $N-1$ principą. Tokio kritinio elemento nustatymas nėra sudėtingas, turint omenyje, kad pagrindinis kuras energijai gaminti yra gamtinės dujos. Todėl šioje analizėje nesudėtingai galima identifikuoti kritinį elementą. z^{89} yra dujotiekio atkarpa, jungianti magistralinį dujotiekį su Lietuvos elektrinės blokais. Norint sumažinti sistemos kritiškumą (pateikiant kaip rekomendaciją), reikėtų papildomą dėmesį skirti elemento z^{89} patikimumui ir apsaugai užtikrinti.

Nagrinėjant infrastruktūros elementų kritiškumą elektros sistemos atžvilgiu po du elementus ($N-2$ principu), kritinių elementų porų kombinacijų skaičius išauga, palyginti su analize, kai buvo vertinama po vieną elementą. Elementų pora laikoma kritine, kai elementų kritiškumas yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,5 ir tenkina sąlygas ((2.14)–(2.15) formulės). Didžiausią elementų po du kritiškumą turinčios kombinacijos pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Didžiausią kritiškumą elektros sistemos vartotojams turinčios elementų kombinacijos (po du elementus)

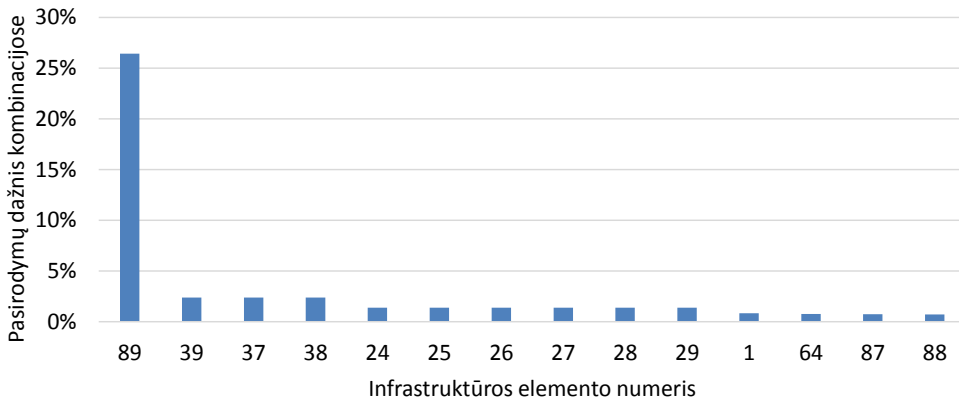
$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l}$	z^k	z^l
0,557	89	131	0,357	29	37
0,383	89	133	0,357	29	38
0,380	89	130	0,357	29	39
0,377	89	128	0,343	24	37
0,375	89	129	0,343	24	38
0,366	89	102	0,343	24	39
0,364	89	156	0,343	25	37
0,362	89	135	0,343	25	38
0,361	89	91	0,343	25	39
0,357	28	37	0,343	26	37
0,357	28	38	0,343	26	38
0,357	28	39	0,326	1	64

Kaip matyti 3.2 lentelėje., didžiausias ir dažniausiai susidarantis kritiškumas, esant įvairių elementų kombinacijoms (po du), įgyjamas su z^{89} elementu. Tokia situacija yra natūrali, kadangi kartu su kritiniu elementu, sugedus ar priverstinai išjungus dar vieną infrastruktūros elementą, kritiškumas išlieka toks pats (kaip ir su z^{89} elementu) arba padidėja. Nagrinėjant visas galimas vienu metu elementų gedimų kombinacijas buvo gautos 174 kombinacijos, kurių kritiškumas yra nenulinis. Atrinkta viena kritinė elementų kombinacija (kai kritiškumas didesnis už kritiškumo slenkstį 0,5), kurią sudaro elementų z^{89} ir z^{131} gedimas vienu metu (įgyja didžiausią kritiškumą – 0,56). Sprendžiant šios kritinės elementų poros kritiškumo sumažinimo klausimą, reikėtų pirmiau išspręsti elemento z^{89} kritiškumo sumažinimo klausimą, kadangi jis yra laikomas kritiniu analizuojant sistemą $N-1$ principu. z^{131} elementas – didžiausią elektros generuojamą galią turintis elektrinės blokas, kuris taip pat gali dirbti ir su alternatyviu kuru. Sumažinus atskiro elemento kritiškumą, sumažėtų ir su juo sudaromų porų kritiškumas. Tuo pačiu sumažėtų ir kritinių porų kombinacijų skaičius. Nagrinėjant elementų porų po du kritiškumą elektros sistemai, buvo pastebėtos susidaranti tokios nenulinį kritiškumą turinčios elementų poros, kurių elementai nebuvo užfiksuoti, nagrinėjant kritiškumą elektros sistemai po vieną elementą. Kaip pateikta 3.2 lent., tokių, kaip būtų galima pavadinti unikalių, nenulinį kritiškumą turinčių elementų kombinacijos po du elementus dažniausiai susidaro su z^{24} , z^{25} , z^{26} , z^{28} , z^{29} , z^{37} , z^{38} , z^{39} elementais. Taip pat tarp unikalių, nenulinį kritiškumą turinčių, elementų kombinacijų yra tokia z^1 , z^{64} , kai dirbtinai pašalinama dujų importo atkarpa su Baltarusija ir SGDT. Ši elementų kombinacija nesudėtingai nustatoma, nes sutrikdomas pagrindinių gamtinių dujų importo šaltinių darbas.

Nagrinėjant infrastruktūros elementų kritiškumą (po tris elementus) elektros sistemos atžvilgiu, kritinių elementų po tris kombinacijų skaičius išauga, palyginti su analize, kai buvo vertinama po vieną arba po du elementus. Elementų kombinacija po tris elementus laikoma kritine, kai kritiškumas šių trijų, vienu metu sugedusių, elementų yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,6 ir tenkina sąlygas ((2.16) –(2.17) formulės). Didžiausią kritiškumą elementų po tris turinčios kombinacijos pateiktos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Elektros sistemos vartotojams didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos (po tris elementus)

$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j
0,613	89	131	133	0,587	28	39	131	0,573	26	37	131
0,610	89	130	131	0,587	29	37	131	0,573	26	38	131
0,607	89	128	131	0,587	29	38	131	0,573	26	39	131
0,606	89	129	131	0,587	29	39	131	0,573	27	37	131
0,597	89	102	131	0,573	24	37	131	0,573	27	38	131
0,595	89	131	156	0,573	24	38	131	0,573	27	39	131
0,592	89	131	135	0,573	24	39	131	0,573	83	89	131
0,591	89	91	131	0,573	25	37	131	0,573	86	89	131
0,587	28	37	131	0,573	25	38	131	0,572	89	131	142
0,587	28	38	131	0,573	25	39	131	0,570	73	89	131



3.2 pav. Didžiausią pasirodymų dažnį, nenulinio kritiškumo kombinacijose, turintys infrastruktūros elementai

Analogiškai, kaip ir prieš tai nagrinėtu atveju, iš pateiktos 3.3 lentelės duomenų matyti, kad didžiausią kritiškumą įgyja kombinacijos, sudarytos jau iš nustatytų kritinių elementų analizuojant sistemą po vieną ir po du elementus. Vertinant infrastruktūros elementų kombinacijos po tris elementus kritiškumą, nustatyta 15053 kritiškumą turinčių kombinacijų ir kaip kritinė elementų po tris kombinacija buvo atrinkta 4 kombinacijos, kurių kritiškumas didesnis už kritiškumo slenkstį 0,6. Didžiausią kritiškumą elektros sistemos atžvilgiu sukelia gamtinių dujų tiekimo sistemos elemento ir Lietuvos elektrinės blokų gedimai. Dažniausiai šios kritinės po tris elementus kombinacijos susidarydavo iš šios elementų aibės $\{z^1, z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{27}, z^{28}, z^{29}, z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{64}, z^{87}, z^{89}, z^{131}, z^{156}\}$. Visi šie infrastruktūros elementai yra dujų tiekimo sistemos elementai, kurie jungia dvivamzdes atskiras dujų tiekimo sistemos dalis arba susilpnina pralaidumą. Išskyrus z^{131}, z^{156} , šie elementai yra didžiausią generuojamą galią turintys elementai sistemoje. Didžiausią kritiškumą elektros sistemai sukelia elementų z^1, z^{131}, z^{133} ($c^{89,131,133} = 0,613$) gedimas vienu metu.

Išanalizavus infrastruktūros elementų kombinacijų po vieną, po du ir po tris kritiškumą, gaunama aibė elementų, kurie vieni arba poromis, arba trejetais sukelia didesnę kritiškumą ir yra laikomi kritiniais infrastruktūros elementais elektros sistemai

$\{z^1, z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{22}, z^{23}, z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{28}, z^{29}, z^{27}, z^{89}, z^{131}, z^{102}, z^{83}, z^{86}, z^{156}, z^{135}\}$.

Nagrinėjant infrastruktūros elementų kritiškumą kombinacijomis po vieną, po du ir tris elementus, jų kritiškumas buvo įvertintas kiekvienos centralizuoto šilumos tiekimo sistemos atžvilgiu. Išsamesnė gautų elementų kombinacijų kritiškumo (Miesto A ir Miesto E centralizuoto šilumos tiekimo sistemų atžvilgiu) vertinimo rezultatų analizė pateikiama šiame skyriuje. Kiti elementų kombinacijų kritiškumo vertinimo (nagrinėjant kitų miestų CŠT sistemų atžvilgiu) rezultatai pateikiami disertacijos 2 priede.

Išnagrinėjus infrastruktūros elementų kritiškumą po vieną elementą, Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu gauta, kad kritinių elementų skaičius nėra didelis (kai kritiškumas elementų yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,1) ir sistemos kritiškumą sukeliantis elementas yra z^{73} , kurio kritiškumo įvertinimas yra $c^{73} = 0,26$.

Kritinis elementas, pagal šio miesto CŠT sistemos vartotojų poreikių užtikrinimą, gali būti nesudėtingai identifikuotas iš topologinės infrastruktūros sudėties. Didžiausią kritiškumą sukeliantis gamtinių dujų infrastruktūros elementas atjungia didžiausią šiluminę generuojamą galią turinčias technologijas.

Išnagrinėjus infrastruktūros elementų kritiškumą po vieną elementą Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu gauta, kad kritinių elementų skaičius nėra didelis (kai kritiškumas elementų yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,1) ir sistemos kritiškumą sukeliantis elementas yra z^{56} (jungiantis miesto šilumos generavimo technologijas su visu magistraliniu dujotiekiu), kurio kritiškumo įvertinimas yra $c^{56} = 0,644$.

Nagrinėjant infrastruktūros elementų po du ($N-2$ principu) kritiškumą Miesto A ir Miesto E CŠT sistemų atžvilgiu kritinių elementų porų kombinacijų skaičius išauga, palyginti su analize, kai buvo vertinamos kombinacijos po vieną elementą. Elementų pora, sugedusi vienu metu, laikoma kritine, kai jos kritiškumas yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,5. Didžiausią kritiškumą elementų po du turinčios kombinacijos pateiktos 3.4 ir 3.5 lent.

3.4 lentelė. Didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos (po du elementus) Miesto A CŠT sistemos vartotojams

$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l}$	z^k	z^l
0,601	24	37	0,601	1	25
0,601	24	38	0,601	1	26
0,601	24	39	0,601	1	27
0,601	25	37	0,601	1	64
0,601	25	38	0,601	1	99
0,601	25	39	0,601	37	64
0,601	26	37	0,601	37	102
0,601	26	38	0,601	38	64
0,601	26	39	0,601	38	102
0,601	27	37	0,601	39	64
0,601	27	38	0,601	39	102
0,601	27	39	0,590	39	91
0,601	71	73	0,590	37	91
0,601	1	24	0,590	38	91

3.5 lentelė. Didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos (po du elementus) Miesto E CŠT sistemos vartotojams

$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l}$	z^k	z^l
0,991	56	148	0,645	9	56	0,645	19	56
0,653	56	113	0,645	10	56	0,645	20	56
0,645	1	56	0,645	11	56	0,645	21	56
0,645	2	56	0,645	12	56	0,645	22	56
0,645	3	56	0,645	13	56	0,645	23	56
0,645	4	56	0,645	14	56	0,645	24	56
0,645	5	56	0,645	15	56	0,645	25	56
0,645	6	56	0,645	16	56	0,645	26	56
0,645	7	56	0,645	17	56	0,645	27	56
0,645	8	56	0,645	18	56	0,645	28	56

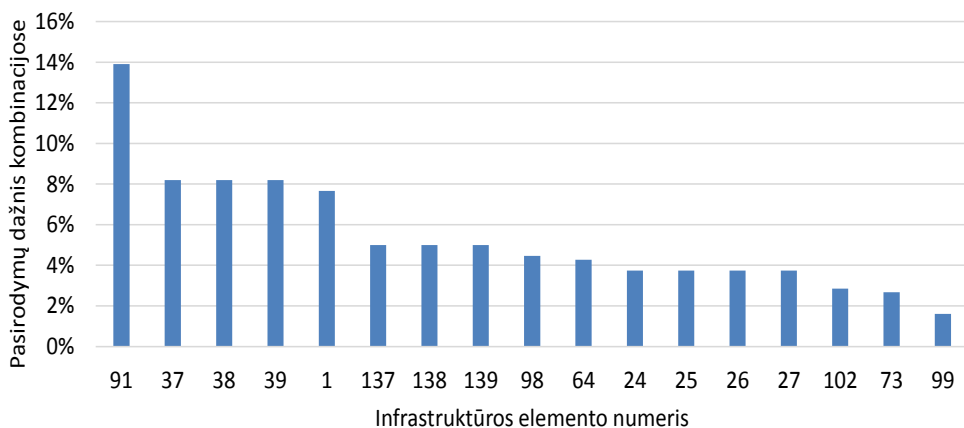
Kaip matyti 3.4 lentelėje, didžiausias susidarantis kritiškumas įgyjamas esant įvairių elementų kombinacijoms po du su $z^1, z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{27}, z^{37}, z^{38}, z^{39}$ elementais, kurie jungia dvivamzdes atskiras dujų tiekimo sistemos dalis. Lyginant gautus kritiškumo rezultatus, kai buvo vertinamas kritiškumas $N-1$ principu, nustatyta, kad kritinis elementas yra z^{73} , $N-2$ principu yra gautos unikalios kritinės elementų kombinacijos, kurios ir turi didžiausią kritiškumą Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu. Nagrinėjant visas galimas elementų porų gedimų vienu metu kombinacijas, buvo gauta 171 kombinacija, kurios kritiškumas yra nenulinis, ir atrinkta, kaip kritinėmis elementų poromis, 163 kombinacijos (kai kritiškumas yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,5). Miesto A CŠT sistemos atveju didžiausią kritiškumą įgyja keletas kombinacijų, sudarytų su elementais $\{z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{27}\}$ ir $\{z^1, z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{64}\}$, kurių kritiškumas lygus 0,6, ir parodo, kad Miesto A CŠT sistemos vartotojų poreikių užtikrinimas stipriai sutrikdomas. Šie elementai yra dujų tiekimo sistemos, kurie jungia dvivamzdes atskiras dujų tiekimo sistemos dalis, arba jungia magistralinių dujotiekių su miesto šilumos generavimo technologijomis.

Infrastruktūros elementų porų po du Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu kritiškumo vertinimo metu buvo nustatyta 171 kritiškumą turinti kombinacija ir tik dvi kritinių elementų porų kombinacijos, kurių kritiškumas yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,5 ir tenkina sąlygas ((2.14)–(2.15) formulės). Kadangi elementas z^{56} ($c^{56} = 0,644$) buvo atrinktas kaip kritinis pagal $N-1$ principą, tai kritinės kombinacijos z^{56}, z^{148} ($c^{56, 148} = 0,991$) ir z^{56}, z^{113} ($c^{56, 113} = 0,653$). Tai rodo, kad atsižvelgiant į šiluminės energijos poreikį Miesto E CŠT sistemoje yra diversifikuota šilumos gamyba įvairaus tipo šilumos generavimo technologijomis, palyginti su kitais analizuojamais miestais.

Išnagrinėjus infrastruktūros elementų kritiškumą Miesto A ir Miesto E CŠT sistemų atžvilgiu, kai buvo vertinamos kombinacijos po tris elementus, buvo atrinktos tos kombinacijos, kurių kritiškumas yra didesnis už kritiškumo slenkstį 0,6 ir tenkina sąlygas ((2.16)–(2.17) formulės). Didžiausią kritiškumą elementų po tris turinčios kombinacijos pateiktos 3.6 ir 3.7 lent.

3.6 lentelė. Miesto A CŠT sistemos vartotojams didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos (po tris elementus)

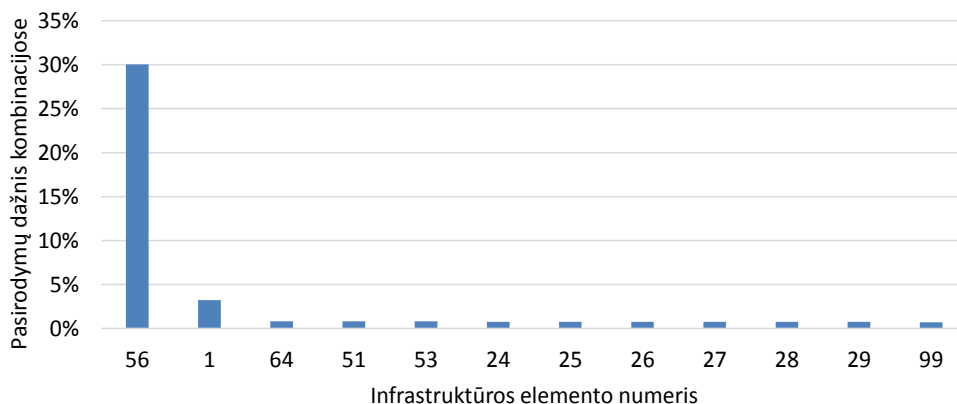
$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j
0,874	1	9	91	0,874	24	37	91	0,874	27	38	91
0,874	1	22	91	0,874	24	38	91	0,874	27	39	91
0,874	1	23	91	0,874	24	39	91	0,874	37	40	91
0,874	1	24	91	0,874	25	37	91	0,874	37	64	91
0,874	1	25	91	0,874	25	38	91	0,874	37	91	99
0,874	1	26	91	0,874	25	39	91	0,874	37	91	102
0,874	1	27	91	0,874	26	37	91	0,874	37	91	134
0,874	1	64	91	0,874	26	38	91	0,874	37	91	135
0,874	1	91	99	0,874	26	39	91	0,874	37	91	156
0,874	1	91	102	0,874	27	37	91	0,874	38	40	91



3.3 pav. Didžiausią pasirodymų dažnį, kritinių elementų kombinacijose vertinant $N-3$ principu, turintys infrastruktūros elementai Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu

3.7 lentelė. Miesto E CŠT sistemos vartotojams didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos (po tris elementus)

$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j
1	56	113	148	0,991	10	56	148	0,991	20	56	148
0,991	1	56	148	0,991	11	56	148	0,991	21	56	148
0,991	2	56	148	0,991	12	56	148	0,991	22	56	148
0,991	3	56	148	0,991	13	56	148	0,991	23	56	148
0,991	4	56	148	0,991	14	56	148	0,991	24	56	148
0,991	5	56	148	0,991	15	56	148	0,991	25	56	148
0,991	6	56	148	0,991	16	56	148	0,991	26	56	148
0,991	7	56	148	0,991	17	56	148	0,991	27	56	148
0,991	8	56	148	0,991	18	56	148	0,991	28	56	148
0,991	9	56	148	0,991	19	56	148	0,991	29	56	148



3.4 pav. Didžiausią pasirodymų dažnį, nenulinį kritiškumą turinčiose kombinacijose vertinant $N-3$ principu, turintys infrastruktūros elementai Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu

Ištyrus infrastruktūros elementų kritiškumą Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu, nustatytos 17392 kritiškumą turinčios kombinacijos (po tris elementus) ir 187 kombinacijos buvo atrinktos kaip kritinės elementų kombinacijos, kurių kritiškumas viršijo kritiškumo slenkstį 0,6 ir tenkino sąlygas ((2.16)–(2.17) formulės). Susidariusios kritinės infrastruktūros elementų kombinacijos po tris elementus gautos iš elementų, kurie jau buvo atrinkti kaip kritiniai, vertinant sistemą $N-2$ ir $N-1$ principais. Unikalių kritinių elementų kombinacijų nesusidarė. Nustatytos ($N-3$ principu) kritinės elementų kombinacijos dažniausiai susidarydavo (kaip parodyta 3.3 pav.) su šios aibės elementais $\{z^1, z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{27}, z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{64}, z^{73}, z^{91}, z^{98}, z^{102}, z^{137}, z^{138}, z^{139}\}$. Didžiausią kritiškumą, Miesto A CŠT sistemos vartotojams, turinčios elementų kombinacijos pateiktos 3.6 lent. Iš viso nustatytos 44 elementų kombinacijos (vertinant $N-3$ principu), kurių kritiškumas yra didžiausias (0,874).

Išanalizavus kritiškumą infrastruktūros elementų po vieną, po du ir po tris kombinacijas Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu, gaunama aibė elementų, kurie vieni arba poromis, arba po tris sukelia didesnę kritiškumą ir yra laikomi kritiniais infrastruktūros elementais Miesto A CŠT sistemai $\{z^1, z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{27}, z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{64}, z^{73}, z^{91}, z^{98}, z^{102}, z^{137}, z^{138}, z^{139}\}$. Šie elementai yra dujų tiekimo sistemos, jungiančios dvivamzdes atskiras dujų tiekimo sistemos dalis arba miesto šilumos generavimo technologijas su magistraliniu dujotiekiu, išskyrus elementus $z^{91}, z^{98}, z^{102}, z^{137}, z^{138}, z^{139}$, kurie yra didžiausią šilumos generuojamą galią turinčios technologijos.

Analizuojant infrastruktūros elementų kritiškumą Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu nustatytos 14270 kombinacijų (po tris elementus), turinčios kritiškumą, ir tik viena elementų kombinacija $\{z^1, z^{56}, z^{113}\}$ ($c^{1,56,113} = 1$) buvo atrinkta kaip kritinė, kurios kritiškumas viršijo 0,6 ir tenkino sąlygas ((2.16)–(2.17) formulės). Ši elementų kombinacija visiškai sutrikdo Miesto E CŠT sistemos darbą. Didžiausią kritiškumą Miesto E CŠT sistemos vartotojams turinčios elementų kombinacijos pateiktos 3.3 pav.

Iš viso buvo nustatytos 156 elementų kombinacijos (vertinant $N-3$ principu), kurių kritiškumas yra vienas didžiausių (0,991, 3.7 lent.). Nustatyta, kad didžiausią kritiškumą sukeliančių elementų kombinacijos dažniausiai susidarydavo (kaip

parodyta 3.4 pav.) su šios aibės elementais $\{z^1, z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{27}, z^{28}, z^{29}, z^{51}, z^{53}, z^{56}, z^{64}, z^{99}\}$. Visi šie infrastruktūros elementai yra gamtinių dujų tiekimo sistemos elementai, išskyrus z^{99} , kuris yra Miesto E CŠT sistemos didžiausią generuojamą galią turinti šilumos generavimo technologija.

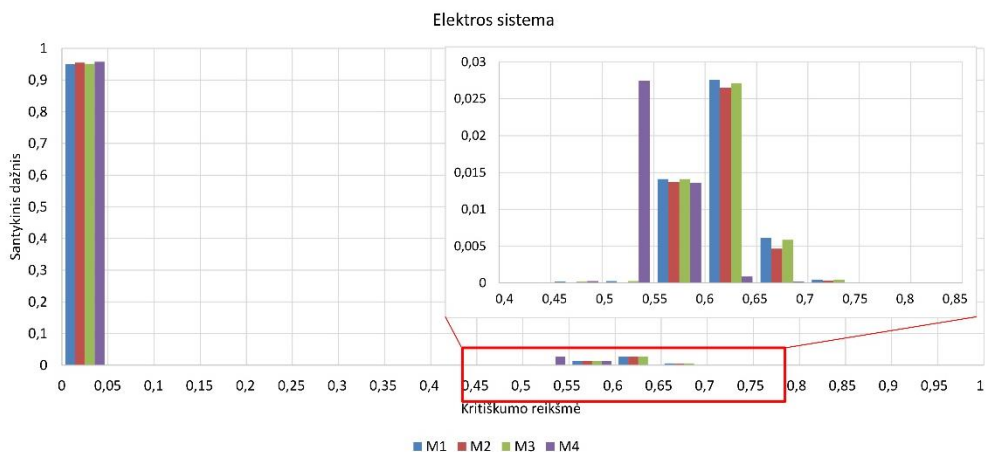
Įvertinus kritinius elementus deterministiniu kritiškumo vertinimo modeliu, visų analizuojamų sistemų atžvilgiu galima išskirti grupę elementų, kritinių bendrai paėmus visoms sistemoms $\{z^1, z^2, z^4, z^5, z^6, z^{14}, z^{16}, z^{18}, z^{20}, z^{22}, z^{23}, z^{24}, z^{25}, z^{26}, z^{27}, z^{34}, z^{35}, z^{36}, z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{40}, z^{73}\}$. Gauti elementų kritiškumo vertinimo rezultatai atskleidžia energetikos infrastruktūros vietas, kurioms reikėtų skirti papildomo dėmesio, siekiant sumažinti šių elementų ir sistemos kritiškumą. Nustatyta, kad visi šie infrastruktūros elementai yra gamtinių dujų tiekimo sistemos elementai. Deterministiniu būdu nustatyti kritiniai infrastruktūros elementai įvertinti tik atsižvelgiant į topologinę infrastruktūros struktūrą. Tai leidžia nustatyti pagrindinius kritinius elementus, tačiau toks vertinimas nėra konservatyvus.

Analizuojant energetikos infrastruktūros elementų kritiškumą, svarbu įvertinti jų kritiškumą, atsižvelgiant ne tik į topologinę sistemų sudėtį ir vartotojų poreikius, bet ir į atsitiktinį sistemų darbą. Toks elementų kritiškumo vertinimas nustato išsamesnį elemento kritiškumą, atsižvelgiant į sistemų darbą ir taip pat padeda nustatyti kritinių elementų kombinacijas, susidarančias atsižvelgiant į sistemos elementų patikimumo charakteristikas.

Naujos infrastruktūros įtakos energetikos sistemų kritiškumui sumažinti vertinimas

Atliekant energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimą, kai sistemų darbas atsitiktinis, pirmiausia pateikiami vidutiniai energetikos sistemų kritiškumo vertinimo rezultatai, gauti nagrinėjant energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijas M1, M2, M3 ir M4. Modeliavimui pritaikytas disertacijos metodinėje dalyje (2.5 poskyris) aprašytas kritiškumo vertinimo modelis, pagal Monte-Karlo imitacinius skaičiavimus. Pasirenkamas 1 mln. iteracijų kiekvienai nagrinėjamai infrastruktūrai ir jos modifikacijai. Gauti vidutinio kritiškumo rezultatai pateikiami tik elektros sistemos atveju ir būdingų miestų Miesto A ir Miesto E CŠT sistemų atžvilgiu. Likusių miestų CŠT sistemų atžvilgiu vidutiniai kritiškumo rezultatai pateikiami disertacijos 2 priede.

Vertinant energetikos sistemų vidutinį kritiškumą, kai sistemų darbas atsitiktinis, kartu buvo analizuojamos energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijos M2, M3 ir M4 (gamtinių dujų tiekimo sistemos įgyvendinti ir planuojami plėtros projektai). Nagrinėta, kokią įtaką jie turi sistemų vidutiniam kritiškumui. Kiekvienai analizuojamai infrastruktūros sudėties modifikacijai elektros sistemos vidutinis kritiškumas yra iš intervalo $[0; 0,05]$, t. y. kai vartotojų elektros energijos poreikiai yra visiškai užtikrinami, su tikimybe $p = 0,95$, (3.5 pav.). Kadangi energetikos sistemos yra adaptyvios, tai atsitiktinai funkcionuojant infrastruktūros elementams yra stengiamasi užtikrinti vartotojų elektros energijos poreikius. Tais atvejais, kai sugenda bent vienas arba nesugenda nė vienas infrastruktūros elementas, sistemos vartotojų poreikiai yra visiškai patenkinami (kritiškumo intervalas $[0; 0,05]$).

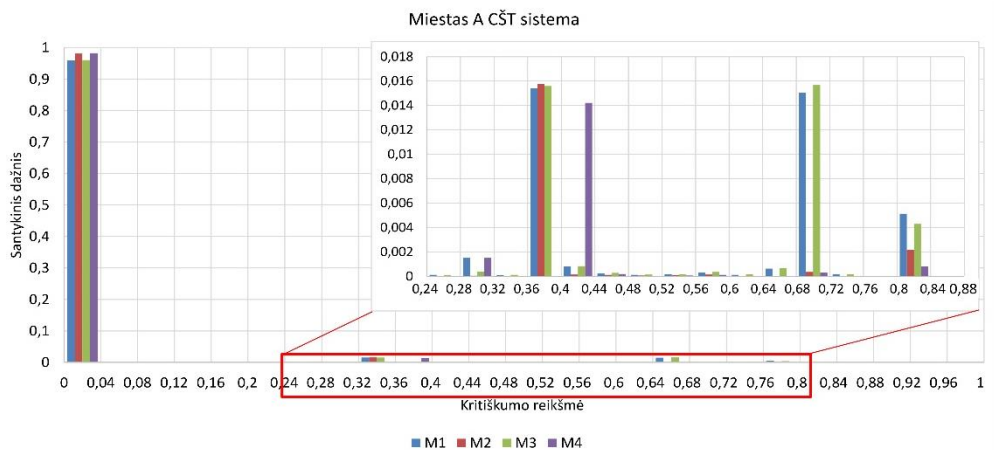


3.5 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų kritiškumo elektros sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas

Sudėtingesnė situacija susidaro sugedus poroms arba didesnėms energetikos sistemų infrastruktūros elementų kombinacijoms. Esant tokiai situacijai, elektros sistemos atveju pakankamai dažnai kritiškumas įgyja didesnes reikšmes, t. y. iš intervalo nuo 0,45 iki 0,8, kaip parodyta 3.5 pav.

Gamtinių dujų tiekimo sistemos plėtros projektai M2 ir M3 neturi didelės įtakos (palyginus su M1 modifikacija) elektros sistemos dideliam kritiškumui mažinti (išlieka dažnas kritiškumas intervale nuo 0,525 iki 0,725). Tačiau infrastruktūros modifikacijos M4 kritiškumą dažnis didesnis intervale nuo 0,475 iki 0,625, taip lemiant mažesnę vidutinę elektros sistemos kritiškumą. Nors tokių didesnių sistemos kritiškumą susidarymo dažniai nėra dideli, tačiau svarbu nustatyti, kokioms sąlygoms esant šie elektros sistemos kritiškumai susidaro.

Nagrinėjant CŠT sistemų (Miesto A ir Miesto E) kritiškumą ir gamtinių dujų plėtros projektų įtaką šių sistemų kritiškumui pastebėta, kad plėtros projektai nevienodai lemia CŠT sistemų kritiškumą. Miesto A CŠT sistemos kritiškumo empirinis tankis pateiktas 3.6 pav. ir sistemos vartotojų poreikiai užtikrinami su tikimybe $p = 0,98$ (kritiškumo intervale $[0; 0,04]$).

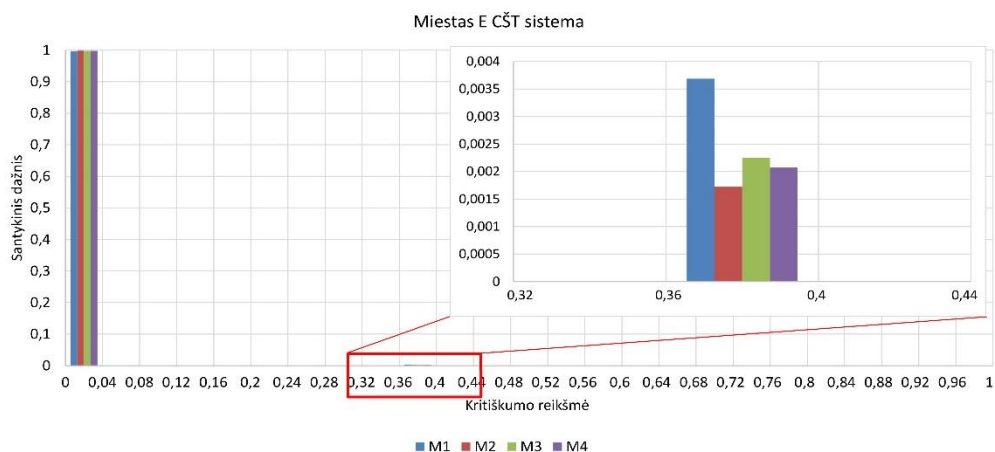


3.6 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų kritiškumo Miesto A CŠT sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas

Didesnis sistemos kritiškumas pakankamai dažnai įgyjamas dviejuose kritiškumo intervaluose, nuo 0,22 iki 0,46 ir nuo 0,58 iki 0,82. Tokie, dažnesni ir didesni, sistemos kritiškumai susidaro taip pat dėl vienu metu sugendančių įvairių kombinacijų infrastruktūros elementų. Vertinant plėtros projektų įtaką, labiausiai Miesto A CŠT sistemos kritiškumą sumažina gamtinių dujų tiekimo sistemos plėtros projektas, infrastruktūros modifikacija M4 (palyginus su M1 modifikacija). Šis projektas sumažina tiek sistemos kritiškumą, tiek tokio kritiškumo pasirodymų dažnį kritiškumo intervale nuo 0,62 iki 0,68, tačiau padidina kritiškumo pasirodymo dažnį iš intervalo nuo 0,34 iki 0,42. Infrastruktūros modifikacija M3 neturi reikšmingos įtakos sistemos kritiškumui mažinti (palyginus su energetikos sistemų infrastruktūros modifikacija M1). Ji nežymiai sumažina sistemos kritiškumo dažnį intervale nuo 0,74 iki 0,82 (palyginus su energetikos sistemų infrastruktūros modifikacija M1).

Vidutinį Miesto A CŠT sistemos kritiškumą apie 68 % sumažina M4 modifikacija, gamtinių dujų plėtros projektas, o M2 modifikacija sistemos kritiškumą sumažina apie 63 %.

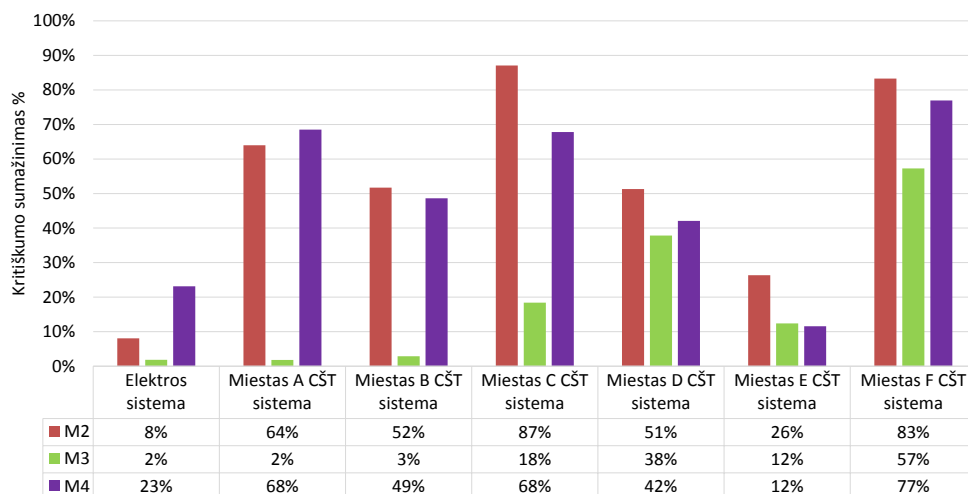
Miesto E CŠT sistemos kritiškumo empirinis tankis, kaip parodyta 3.7 pav., leidžia nustatyti, kad sistemos kritiškumai dažniausi būna dviejuose kritiškumo intervaluose. Pirmasis kritiškumo intervalas parodo, kad sistemos vartotojų poreikiai užtikrinami su tikimybe $p = 0,99$ (kritiškumo intervale $[0; 0,04]$). Kitas šios sistemos kritiškumo intervalas, kuris su nežymiai didesniu dažniu, yra įgyjamas intervale nuo 0,34 iki 0,42.



3.7 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų kritiškumo Miesto E CŠT sistemai santykinių dažnių pasiskirstymas

Labiausiai Miesto A CŠT sistemos vidutinį kritiškumą sumažina: M2 infrastruktūros modifikacija apie 83 % ir M4 infrastruktūros modifikacija apie 76 % (palyginti su M1 modifikacija).

Kitų nagrinėtų miestų CŠT sistemos kritiškumo ir infrastruktūros modifikacijų įtakos rezultatai pateikiami disertacijos 2 priede. Apibendrinant gautus sistemų kritiškumo ir infrastruktūros modifikacijų įtakos vertinimo rezultatus galima teigti, kad plėtros projektai turi nevienodą įtaką skirtingų sistemų kritiškumo lygiui sumažinti. Pastebėta, kad didžiausią sistemų kritiškumo sumažinimo poveikį daro M2 ir M4 infrastruktūros modifikacijos (įgyvendinant naujus energetikos projektus), susijusios su didelio gamtinių dujų pralaidumo infrastruktūros įvedimu į energetikos sektorių (3.8 pav.).



3.8 pav. Energetikos sistemų plėtros projektų įtaka mažinant sistemų vidutinį kritiškumą

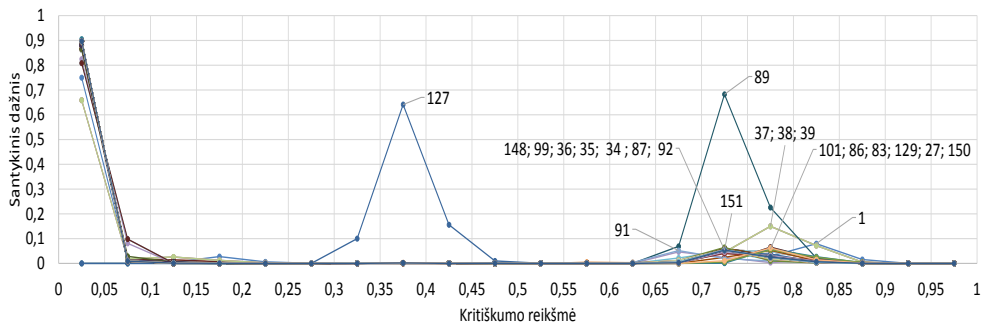
Gauti rezultatai parodė, kad M4 infrastruktūros modifikacija sumažina elektros sistemos vidutinį kritiškumą apie 21 % ir Miesto A CŠT sistemos kritiškumą apie 69 %, t. y. daugiausiai, palyginus su kitomis infrastruktūros modifikacijomis. Infrastruktūros modifikacija M2 labiausiai sumažina likusių nagrinėtų miestų CŠT sistemų vidutinį kritiškumą, palyginti su kitomis infrastruktūros modifikacijomis (25 % – 88 %).

Kritinių energetikos sistemų infrastruktūros elementų nustatymas logistinės regresijos metodu

Tikimybinės energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo metodikai pademonstruoti (2.6 ir 2.7 poskyriai), nustatant tokios sistemos kritinius elementus, buvo pasirinkta M2 energetikos sistemų infrastruktūros modifikacija (bazinė). Buvo imituojamas atsitiktinis šios sistemos darbas pagal Monte-Karlo imitacinius skaičiavimus (iteracijų skaičius 100.000).

Taip pat buvo priimta prielaida, kad Lietuvos elektrinė infrastruktūros modelyje yra nagrinėjama kaip vienas infrastruktūros elementas, neskaidant jos į atskirus blokus. Tokia prielaida priimta siekiant sumažinti elementų skaičių sistemoje, dėl ilgai trunkančių imitacinių skaičiavimų. Įvertinus kiekvieno energetikos sistemų infrastruktūros elemento kritiškumą, gauti rezultatai pateikiami nagrinėjamų sistemų atžvilgiu (elektros sistemos, Miesto A CŠT ir Miesto E CŠT sistemų atžvilgiu).

Energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo elektros sistemai santykinų dažnių daugiakampis (empirinės tankio funkcijos) pateiktas 3.9 pav.



3.9 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo elektros sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas

Toks infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimas leidžia nustatyti elektros sistemai didžiausią kritiškumą turinčius elementus, atsižvelgiant į sistemos elementų patikimumo rodiklius. Infrastruktūros elementų vertinimas buvo atliekamas dirbtinai pašalinant kiekvieną infrastruktūros elementą ir imituojant sistemų atsitiktinį darbą. Taip modeliuojant susidarydavo įvairios kombinacijos sugedusių infrastruktūros elementų, kartu su dirbtinai pašalintu elementu.

Elektros sistemos atžvilgiu analizuojant modeliavimo rezultatus galima išskirti tris susidariusius elementų klasterius pagal jų kritiškumą šios sistemos vartotojams (3.9 pav.). Elementai ir jų kombinacijos, pagal jų kritiškumą, į šiuos klasterius patenka su skirtingomis tikimybėmis.

Pirmąjį elementų klasterį sudaro elementai ar jų kombinacijos, kurių kritiškumas yra intervale nuo 0 iki 0,05. Didžiausią tikimybę patekti į šį intervalą turi atskiri infrastruktūros elementai, kurių priverstinis išjungimas (gedimai) nesukelia arba sukelia nedideles, bet tam tikras problemas elektros vartotojų poreikiams užtikrinti. Šis elementų klasteris gaunamas iš paeilui išjungiamų po vieną infrastruktūros elementų ir analizuojant kokį jie kritiškumą įgyja elektros sistemos atžvilgiu. Didelė dalis infrastruktūros elementų (po vieną) patenka į šį pirmąjį klasterį, kai patekimo tikimybės kinta iš intervalo [0,65; 0,91], atsižvelgiant į vertinamą infrastruktūros elementą. Dalis infrastruktūros elementų nepatenka, nes jų išjungimas sutrikdo elektros sistemos vartotojų poreikių užtikrinimą. Pvz., elementai z^{89} ir z^{127} sutrikdo elektros sistemos vartotojų poreikių užtikrinimą ir šie elementai patenka į kritinių elementų aibę.

Antrąjį elementų, pagal jų kritiškumą, klasterį sudaro dirbtinai pašalintų elementų ir vieno arba dviejų atsitiktinai kartu sugedusių elementų kombinacijos, kurios sukelia nedidelį kritiškumą intervale [0,06; 0,225]. Elementų kombinacijų, su dirbtinai pašalintu elementu, patekimas į šį klasterį yra su mažomis tikimybėmis iš intervalo [0,0002; 0,09].

Trečiąjį elementų, pagal jų kritiškumą, klasterį sudaro kombinacijos po du ar daugiau infrastruktūros elementų kartu su dirbtinai pašalintu tiriamu elementu, kurių kritiškumas yra intervale nuo 0,625 iki 0,925. Kombinacijų patekimo į trečiąjį klasterį tikimybės yra iš intervalo [0,08; 0,28]. Šio klasterio elementų ar jų kombinacijų gedimas stipriai paveikia elektros vartotojų poreikių užtikrinimą.

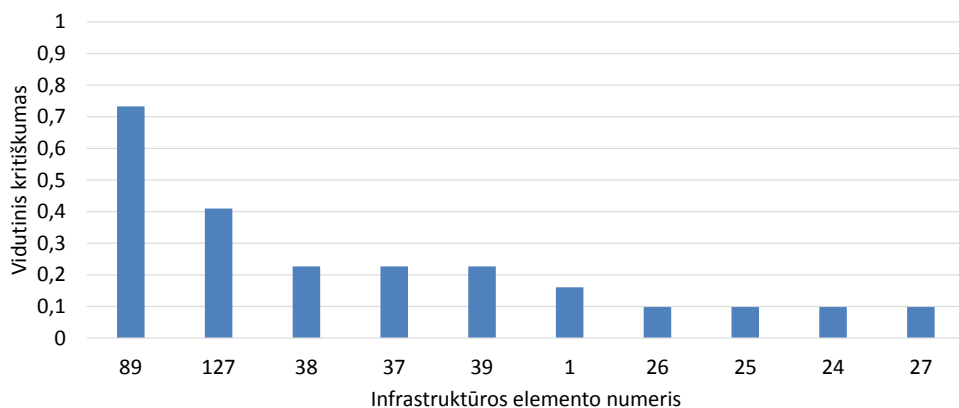
Trečiasis klasteris, kai elektros sistemoje yra didelis infrastruktūros elementų kritiškumas intervale nuo 0,625 iki 0,925, bet dažnis tokio kritiškumo nėra didelis, tačiau šiame kritiškumo klasteryje vartotojų poreikiai nėra visiškai patenkinami. Trečiasis kritiškumo klasteris susidaro, kai priverstinai pašalinus infrastruktūros elementą, kartu sugenda įvairios kitų infrastruktūros elementų kombinacijos. Tuomet sistemoje susidaro neveikiančių infrastruktūros elementų kombinacijos po du, po tris ar daugiau elementų. Gauti rezultatai parodo, kad atsižvelgiant į sistemų atsitiktinį darbą z^{127} ($\bar{c}^{127} = 0,375$) įgyja vidutinį kritiškumą su tikimybe $p = 0,64$.

Infrastruktūros elementą z^{89} taip pat būtų galima išskirti, nes šis elementas (pakanka, kad jis vienas būtų sugedęs) energetikos sistemoms dirbant atsitiktinai su tikimybe $p = 0,68$ įgyja vidutinį kritiškumą $\bar{c}^{89} = 0,775$ elektros sistemos vartotojų atžvilgiu.

Taip pat gauti modeliavimo rezultatai leido nustatyti, kurių infrastruktūros elementų (dirbtinai pašalinus) kritiškumas elektros sistemos atžvilgiu ir kiek dažnai įgyja didelę reikšmę. Būtų galima įvardyti aibę kritinių elementų (po vieną elementą), kurių dirbtinis pašalinimas (išjungimas) iš sistemos sutrikdo elektros vartotojų poreikių užtikrinimą $\{z^{89}, z^{127}, z^{38}, z^{37}, z^{39}, z^1, z^{26}, z^{25}, z^{24}, z^{27}, z^{86}, z^{83}, z^{148}, z^{150}, z^{87}, z^{99}, z^{36}, z^{35}\}$. Šie elementai yra dujų tiekimo sistemos, jungiančios dvivamzdes atskiras dujų tiekimo sistemos dalis, išskyrus elementus $z^{127}, z^{148}, z^{150}, z^{99}$, kurie yra didžiausią elektros energijos generuojamą galią turinčios technologijos.

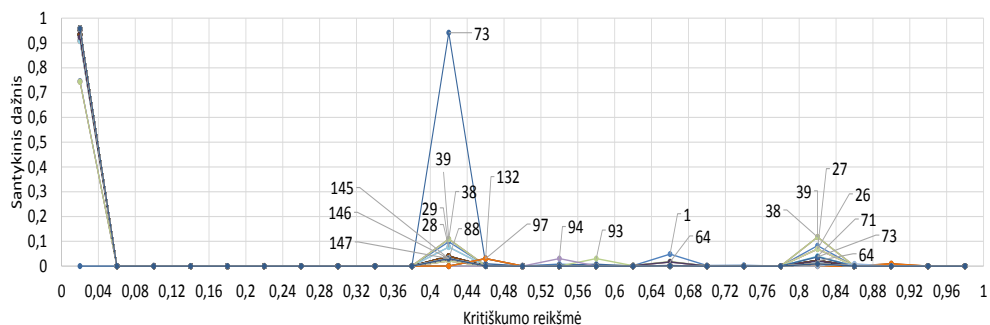
Didžiausią vidutinį kritiškumą įgyjantys infrastruktūros elementai pateikti 3.10 pav. Reikia pabrėžti, kad šių elementų dažnas ir didelis kritiškumas susidaro ir

dėl atsitiktinio sistemų darbo įvertinant elementų patikimumą.



3.10 pav. Didžiausią vidutinį kritiškumą elektros sistemai turintys infrastruktūros elementai

Analogiškai, vertinant atskirų energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą, buvo analizuojamas šių elementų kritiškumas ir CŠT sistemų atžvilgiu. Energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo Miesto A CŠT sistemai santykinų dažnių daugiakampis (empirinės tankio funkcijos) pateiktas 3.11 pav.



3.11 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo Miesto A CŠT sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas

Analizuojant infrastruktūros elementų kritiškumą Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu, galima išskirti keturis elementų ir jų grupių klasterius, kai elementų patekimas į šiuos klasterius yra su skirtingomis tikimybėmis.

Pirmąjį elementų klasterį dažniausiai sudaro elementai ar jų kombinacijos, kurių kritiškumas yra intervale nuo 0 iki 0,04. Didžiausią tikėtinumą patekti į šį intervalą turi atskiri infrastruktūros elementai, kurių priverstinis išjungimas (gedimai) nesukelia arba sukelia nedideles problemas Miesto A CŠT sistemos vartotojų poreikiams užtikrinti. Šis elementų klasteris gaunamas paeiliui išjungiant po vieną infrastruktūros elementus, analizuojant kokį kritiškumą įgyja CŠT sistemos atžvilgiu. Didelė dalis infrastruktūros elementų (po vieną) patenka į šį pirmąjį klasterį, kai patekimo tikimybės kinta iš intervalo $[0,75; 0,96]$ priklausomai nuo vertinamo infrastruktūros elemento. Dalis infrastruktūros elementų nepatenka, pavyzdžiui,

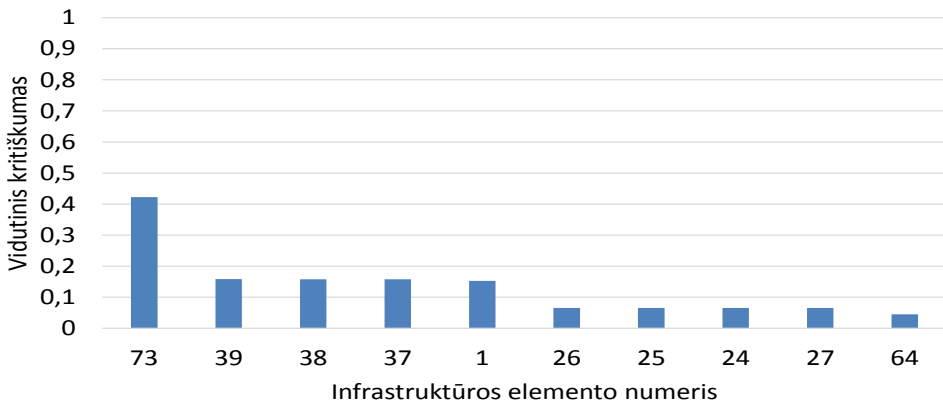
elementas z^{73} , kuris sutrikdo CŠT sistemos vartotojų poreikių užtikrinimą. Šis elementas yra įtraukiamas į kritinių elementų aibę.

Antrąjį klasterį dažniau sudaro nedidelės kombinacijos infrastruktūros elementų, kartu su dirbtinai pašalintu elementu, kai jų kritiškumo reikšmės yra iš intervalo $[0,38; 0,5]$ ir patekimo į antrąjį klasterį tikimybės yra iš intervalo $[0,0001; 0,12]$. Atskiras atvejis yra elementui z^{73} , kurio gedimas sukelia kritiškumą iš šio intervalo su vidutine tikimybe 0,95.

Trečiasis elementų klasteris, pagal jų kritiškumą, susidaro kritiškumo intervale nuo 0,5 iki 0,7. Patekimo į šį klasterį tikimybės kinta intervale $[0,0004; 0,06]$.

Ketvirtasis elementų ir jų kombinacijų klasteris gaunamas, kai šių elementų ar kombinacijų kritiškumas yra intervale $[0,78; 0,86]$. Šį klasterį dažniausiai sudaro didesnės elementų kombinacijos, kartu sugedusios su dirbtinai pašalintu elementu, esant patekimo tikimybėms intervale $[0,6 \cdot 10^{-4}; 0,117]$.

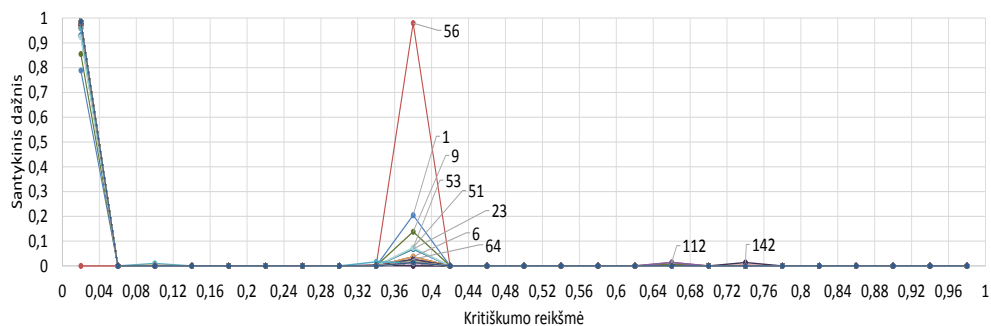
Nustatyta, kad į trečiąjį ir ketvirtąjį klasterius patenka tie patys nagrinėjami infrastruktūros elementai, pvz., z^{38} , z^{37} , z^{39} , z^{26} , z^{27} ir pan. Tokia situacija susidaro, kai nagrinėjamas infrastruktūros elementas (dirbtinai išjungus) sudaro kombinacijas su dviem arba daugiau skirtingų infrastruktūros elementų, kurie vienu metu yra sugedę. Dažniausiai Miesto A CŠT sistemos vartotojų poreikiai buvo neužtikrinami, kai buvo dirbtinai pašalintas z^{73} elementas, atsižvelgiant į energetikos sistemų darbą. Šio elemento vidutinis kritiškumas $\bar{c}^{73} = 0,42$ yra su tikimybe $p = 0,94$. Šis elementas jungia miesto šilumos generavimo technologijas su magistraliniu dujotiekiu. Didžiausių vidutinį kritiškumą įgyjantys infrastruktūros elementai pateikti 3.12 pav.



3.12 pav. Didžiausių vidutinį kritiškumą Miesto A CŠT sistemai turintys infrastruktūros elementai

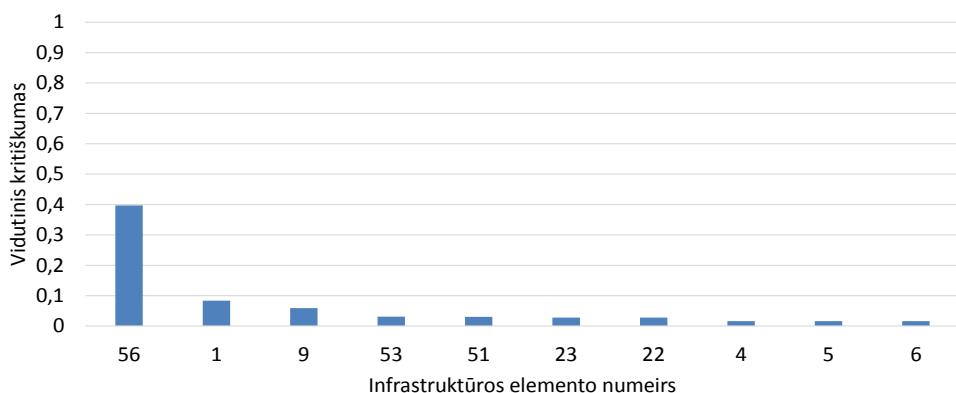
Įvairios atsitiktinai sugedusių infrastruktūros elementų kombinacijos su z^{73} , z^{39} , z^{38} , z^{37} , z^1 , z^{26} , z^{27} įgyja didelį kritiškumą iš intervalo $[0,42; 0,82]$.

Analogiška situacija susidaro vertinant infrastruktūros elementų kritiškumą Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu 3.13 pav.



3.13 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo Miesto E CŠT sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas

Čia susidaro tik du elementų klasteriai pagal jų kritiškumą. Į pirmąjį klasterį (kritiškumo intervalas $[0; 0,04]$) elementų patekimo tikimybės kinta nuo 0,799 iki 0,99. Antrasis elementų ir jų kombinacijų klasteris gaunamas, kai kritiškumas vertinimo metu yra intervale $[0,34; 0,42]$, o patekimo tikimybės įgyja reikšmes intervale $[0,03; 0,2]$. Taip pat gauti elementų kritiškumo vertinimo rezultatai parodė, kad dažniausiai sistemos vartotojų poreikiai yra neužtikrinami dirbtinai pašalinus z^{56} elementą, jo vidutinis $\bar{c}^{56} = 0,38$ kritiškumas įgyjamas su tikimybe $p = 0,97$, atsižvelgiant į atsitiktinį sistemų darbą. Šis elementas vienintelis jungia miesto šilumos generavimo technologijas su magistraliniu dujotiekiu. Taip pat būtų galima paminėti, kad elementai z^1 , z^9 tokį patį vidutinį kritiškumą įgyja su mažesnėmis tikimybėmis, atitinkamai $\bar{c}^1 = 0,38$, $p = 0,2$; $\bar{c}^9 = 0,38$, $p = 0,14$. Elementas z^1 yra pagrindinio gamtinių dujų importo vamzdžio atkarpa, o elementas z^9 jungia dvivamzdes atskiras dujų tiekimo sistemos dalis, esančias netoli nagrinėjamo miesto. Didžiausią vidutinį kritiškumą Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu įgyjantys infrastruktūros elementai pateikti 3.14 pav.



3.14 pav. Didžiausią vidutinį kritiškumą Miesto E CŠT sistemai turintys infrastruktūros elementai

Kaip pateikta 3.14 pav., didžiausias vidutinis kritiškumas yra z^{56} elemento $\bar{c}^{56} = 0,4$. Palyginus gautus didžiausią vidutinį kritiškumą įgyjančius elementus abiejų nagrinėjamų miestų CŠT sistemų atžvilgiu nustatyta, kad infrastruktūros elementai turi nevienodą kritiškumą nagrinėjamų sistemų atžvilgiu, šių elementų kritiškumas taip pat priklauso ir nuo padėties infrastruktūros topologijoje, ir nuo kitų infrastruktūros elementų patikimumo. Taip pat Miesto E CŠT sistemoje šiluminės energijos gamyba yra diversifikuota, t. y. didesnė dalis generuojančių technologijų naudoja biokurą, palyginti su Miesto A situacija, kai šiame mieste dauguma šilumos generavimo technologijų naudoja gamtines dujas kaip pagrindinį kurą.

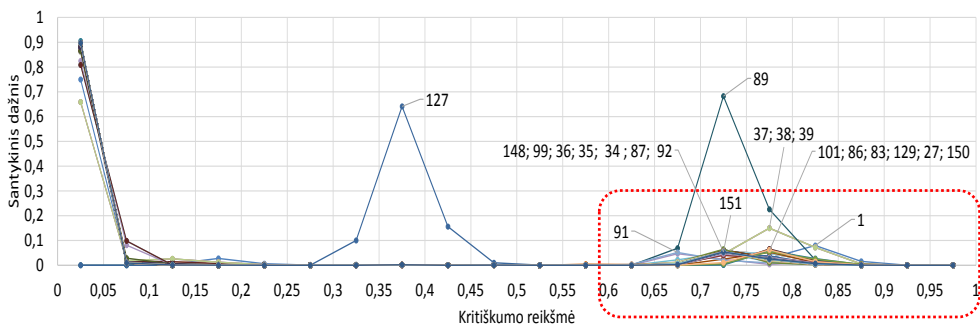
Kitų nagrinėjamų miestų CŠT sistemų atžvilgiu gauti infrastruktūros elementų kritiškumo (sistemoms dirbant atsitiktinai) rezultatai pateikiami disertacijos 2 priede.

Dirbtinai pašalintų infrastruktūros elementų suskirstymas į klasterius, pagal jų kritiškumą nagrinėjamoms sistemoms, dar neatsako į klausimą, kokios kombinacijos elementų, atsitiktinai sugendančių sistemose kartu su dirbtinai pašalintu infrastruktūros elementu, lemia tokių klasterių susidarymą.

Tokio klasterio sudėčiai įvertinti reikia išsamesnės atsitiktinai dirbančių sistemų elementų kritiškumo rezultatų analizės, kuri leistų nustatyti elementus ir jų kombinacijas, patenkančias, pagal elementų kritiškumą, į konkretų klasterį.

Infrastruktūros elementams ir jų kombinacijoms klasterizuoti kritiškumo intervale C_s buvo pasirinktas logistinės regresijos modelis (2.6 poskyris). Dėl šio modelio gana lanksčių tinkamumo ir pritaikymo prielaidų, pagal imitacinių skaičiavimų kritiškumo ir sistemų atsitiktinio darbo rezultatus, galima klasterizuoti elementus ir jų kombinacijas pasirinktame kritiškumo intervale.

Metodikai pristatyti, nustatant infrastruktūros elementų klasterio sudėtį pagal nagrinėjamą kritiškumo intervalą, parinkti elektros sistemos kritiškumo ir atsitiktinai dirbančių energetikos sistemų rezultatai, gauti analizuojant energetikos sistemų infrastruktūros modifikaciją M2, kai modeliavimo iteracijų skaičius 100.000. Konkrečiai parinktas klasteris, gaunamas iš elementų, kurių kritiškumas yra didesnis už $c^k > 0,6$ (3.15 pav.).



3.15 pav. Nagrinėjamas elementų klasteris kritiškumo intervale $[0,6; 1]$ elektros sistemos atžvilgiu

Toks klasteris pasirinktas siekiant nustatyti, kokios kombinacijos, atsitiktinai dirbant energetikos sistemoms, turi didelį kritiškumą, ir taip randant elektros sistemos

atžvilgiu svarbius kritinius elementus. Pagal gautus kritiškumo vertinimo rezultatus buvo sudaryti pseudokintamieji:

$$Y = \begin{cases} 1, & c^{(k|\bar{z}_t)} \in [0,6; 1], \\ 0, & c^{(k|\bar{z}_t)} \notin [0,6; 1] \end{cases} \quad (3.1)$$

Pagal disertacijos metodikoje aprašytą logistinės regresijos modelį ((2.34) formulė) nustatyti nagrinėjamą klasterį sudarantys infrastruktūros elementai ir logistinės regresijos modelio reikšmingi koeficientai, kurie pateikti 3.8 lent. Sudarant logistinės regresijos modelį z^{89} elementas buvo pašalintas, nes analizė parodė, kad z^{89} elementas iš karto patenka į klasterį, t. y. sugedus z^{89} elementui kritiškumo reikšmė yra iš intervalo $[0,6; 1]$ su tikimybe $\hat{P}(Y=1|z^{89})_{c_t} = 1$. Todėl šis elementas įtrauktas į kritinių elementų aibę $\mathbb{C}_{0,6}^{Log}$ (klasterį).

3.8 lentelė. Kritiškumo intervalo $[0,6; 1]$ klasterį sudarantys elementai ir jų logistinės regresijos lygties koeficientai

Koeficientas	Logistinės regresijos modelio koeficiento reikšmė	Standartinė paklaida	p -reikšmė
b ₀ (const.)	-3,28	0,0085	$1,23 \cdot 10^{-156}$
b ₉	0,42	0,0314	$2,15 \cdot 10^{-40}$
b ₁₂	0,26	0,0201	$3,67 \cdot 10^{-39}$
b ₁₆	0,09	0,0432	0,028
b ₁₇	0,12	0,0424	0,0065
b ₁₈	0,15	0,0642	0,0175
b ₂₂	0,41	0,0205	$1,89 \cdot 10^{-90}$
b ₂₃	0,44	0,0336	$9,44 \cdot 10^{-40}$
b ₂₅	0,42	0,0274	$5,88 \cdot 10^{-52}$
b ₂₇	0,40	0,0244	$4,36 \cdot 10^{-60}$
b ₂₈	0,37	0,0327	$3,1 \cdot 10^{-30}$
b ₂₉	0,40	0,0212	$2,3 \cdot 10^{-78}$
b ₃₂	0,12	0,0351	0,0009
b ₃₄	0,19	0,0220	$1,09 \cdot 10^{-18}$
b ₃₅	0,16	0,0224	$6,7 \cdot 10^{-13}$
b ₃₇	2,07	0,0358	$1,23 \cdot 10^{-156}$
b ₃₈	2,13	0,0171	$1,23 \cdot 10^{-156}$
b ₃₉	2,12	0,3089	$7,18 \cdot 10^{-12}$
b ₄₀	-0,70	0,0318	$1,43 \cdot 10^{-106}$
b ₆₂	-0,08	0,0240	0,0006
b ₇₁	-0,39	0,0606	$1,28 \cdot 10^{-10}$
b ₇₂	-0,20	0,0972	0,0395
b ₉₁	-0,87	0,3749	0,0208
b ₁₀₀	-0,16	0,0635	0,0139
b ₁₂₈	0,73	0,0604	$7,61 \cdot 10^{-34}$
b ₁₃₅	0,30	0,1421	0,0326
b ₁₄₂	0,24	0,0859	0,0051
b ₁₅₆	0,06	0,0124	$6,61 \cdot 10^{-6}$

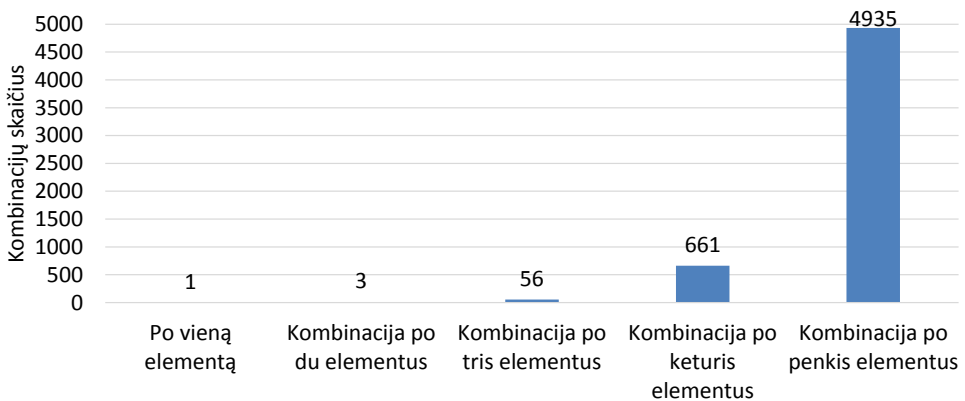
Nagrinėjamą klasterį sudaro kombinacijos sugedusių (dirbtinai pašalintų) elementų, pateiktų 3.8 lent., ir z^{89} elementas.

Pagal gautus rezultatus sudarytas logistinės regresijos modelis (kai $\tau = 0,6$):

$$\hat{P}(Y=1|Z)_{C_\tau} = \frac{e^Z}{1+e^Z},$$

$$\begin{aligned} Z = & -3,28 + 0,42 \cdot z^9 + 0,26 \cdot z^{12} + 0,09 \cdot z^{16} + 0,12 \cdot z^{17} + 0,15 \cdot z^{18} + 0,41 \cdot z^{22} + \\ & + 0,44 \cdot z^{23} + 0,42 \cdot z^{25} + 0,4 \cdot z^{27} + 0,37 \cdot z^{28} + 0,4 \cdot z^{29} + 0,12 \cdot z^{32} + 0,19 \cdot z^{34} + \quad (3.2) \\ & + 0,16 \cdot z^{35} + 2,07 \cdot z^{37} + 2,13 \cdot z^{38} + 2,12 \cdot z^{39} - 0,7 \cdot z^{40} - 0,08 \cdot z^{62} - 0,39 \cdot z^{71} - \\ & - 0,2 \cdot z^{72} - 0,87 \cdot z^{91} - 0,16 \cdot z^{100} + 0,73 \cdot z^{128} + 0,3 \cdot z^{135} + 0,24 \cdot z^{142} + 0,06 \cdot z^{156}, \\ & z^k \in \{0,1\}. \end{aligned}$$

Prenkant z^k kintamųjų kombinacijas ($z^k = 0$, kai k -asis elementas funkcionuoja; $z^k = 1$, kai k -asis elementas sugedęs), gaunamas prognozės tikimybės įvertis $\hat{P}(Y=1|Z)_{C_\tau}$, kad tokios elementų kombinacijos, gedimo atveju, kritiškumas pateks į intervalą $[0,6; 1]$. Infrastruktūros elementų kombinacijų skaičius, patenkantis į klasterį (kritiškumo intervalas $[0,6; 1]$), pateiktas 3.16 pav.

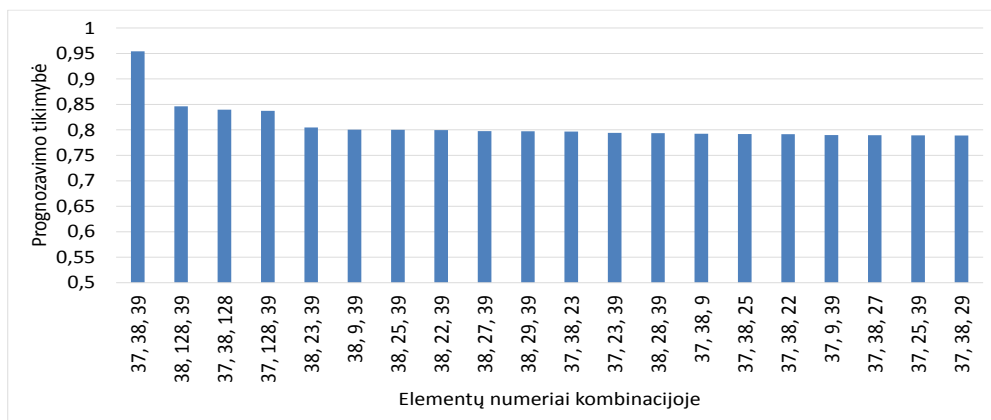


3.16 pav. Nustatytų elementų kombinacijų skaičius klasteryje (kritiškumo intervalas $[0,6; 1]$ elektros sistemos atžvilgiu)

Gautų rezultatų apibendrinimas (3.16 pav.), nustatant prognozuojamų elementų kombinacijų skaičių, kai kombinacijos sudaromos po vieną, po du elementus ir t. t., parodo, kaip išauga kritinių elementų kombinacijų skaičius didėjant kombinacijos elementų sudėties skaičiui.

Didžiausią prognozuojamą tikimybę turinčių infrastruktūros elementų kombinacijų po du elementus, kurių kritiškumas gedimo atveju bus įgyjamas iš intervalo $[0,6; 1]$, skaičius nėra didelis. Iš viso susidaro trys kombinacijos: elementai z^{36} ir z^{38} , kai prognozės tikimybė yra $\hat{P}(Y=1|z^{36}, z^{38})_{C_\tau} = 0,73$; elementai z^{37} ir z^{38} , kai prognozės tikimybė yra $\hat{P}(Y=1|z^{37}, z^{38})_{C_\tau} = 0,71$; elementai z^{37} ir z^{39} , kai prognozės tikimybė yra $\hat{P}(Y=1|z^{37}, z^{39})_{C_\tau} = 0,71$.

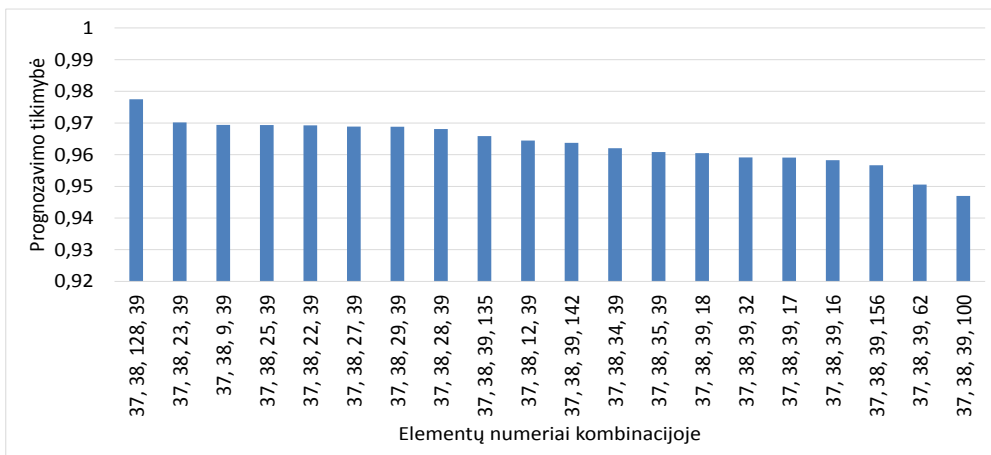
Didžiausią prognozuojamą tikimybę turinčių infrastruktūros elementų kombinacijų po tris elementus rezultatai pateikti 3.17 pav.



3.17 pav. Patekimo į klasterį (kritiškumo intervalą [0,6; 1]) kombinacijų po tris elementus prognozavimo tikimybės

Apibendrinant 3.17 pav. pateiktus rezultatus, galima teigti, kad didžiausia prognozuojama tikimybė, jog sugedusių elementų kombinacijos kritiškumas pateks į klasterį (kritiškumo intervalas [0,6; 1]), įgis $\hat{P}(Y = 1 | z^{37}, z^{38}, z^{39})_{C_t} = 0,96$, kai elementų kombinacija sudaroma iš z^{37} , z^{38} , z^{39} . Šie elementai jungia dvivamzdes atskiras dujų tiekimo sistemos dalis. Kitos didžiausios prognozavimo tikimybės yra kombinacijų, kurių pagrindą sudaro elementai z^{37} , z^{38} ir z^{39} , prijungiant kitus infrastruktūros elementus, pateiktus 3.8 lent.

Analogiška situacija yra nagrinėjant kombinacijų, kurios sudarytos po keturis elementus prognozavimo tikimybės, 3.18 pav.



3.18 pav. Patekimo į klasterį (kritiškumo intervalą [0,6; 1]) kombinacijų po keturis elementus prognozavimo tikimybės

Didžiausią tikimybę turi kombinacija elementų z^{37} , z^{38} , z^{39} , z^{128} , kai tikimybė

$\hat{P}(Y=1|z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{128})_{C_\tau} = 0,98$. Gauti kombinacijų patekimo į klasterį prognozavimo tikimybių rezultatai parodė, kad kombinacijos po keturis elementus prognozavimo tikimybės yradidelės.

Apibendrinant gautus infrastruktūros elementų klasterizavimo rezultatus kritiškumo intervale [0,6; 1] elektros sistemos atžvilgiu, galima sudaryti kritinių elementų aibę (klasterį), gautą nagrinėjant po vieną, po du, po tris ir keturis elementus (3.9 lentelė.).

3.9 lentelė. Kritinių elementų aibė (klasteris) elektros sistemos atžvilgiu kritiškumo intervale [0,6; 1] sistemoms dirbant atsitiktinai

Kritinių elementų kombinacijų aibė \tilde{C}_τ^{Log}			
Po vieną elementą $P(Y=1 z^i)_{C_\tau} > 0,5$	Po du elementus $P(Y=1 z^i)_{C_\tau} > 0,5$	Po tris elementus $P(Y=1 z^i)_{C_\tau} > 0,8$	Po keturis elementus $P(Y=1 z^i)_{C_\tau} > 0,96$
z^{89}	$(z^{38}, z^{39}),$ $(z^{37}, z^{38}),$ $(z^{37}, z^{39}).$	$(z^{37}, z^{38}, z^{39}),$ $(z^{37}, z^{128}, z^{39}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{128}),$ $(z^{38}, z^{23}, z^{39}),$ $(z^{38}, z^9, z^{39}),$ $(z^{38}, z^{25}, z^{39}).$	$(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{128}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{23}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^9),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{25}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{22}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{27}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{29}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{28}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{135}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{12}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{142}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{34}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{35}),$ $(z^{37}, z^{38}, z^{39}, z^{18}).$

Taip pat apibendrinant rezultatus, gautus vertinant energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą, reikėtų paminėti, kad abiejų kritiškumo vertinimo modelių (deterministinio ir tikimybinio) rezultatai koreliuoja. Deterministiniu modelių vertinant elementų ir jų grupių kritiškumą atsižvelgiama į energetikos sistemų topologiją ir esančius sąryšius tarp sistemų (fizinis priklausomumas), tačiau nėra atsižvelgiama į galimą situaciją, kai vienu metu sugenda didesnis skaičius elementų kombinacijų. Be to, reikėtų pabrėžti, kad deterministiniu metodu yra paprasčiau vertinti elementų ar jų kombinacijų kritiškumą (nedidelės eilės), nereikia daug skaičiavimo resursų. Vertinant atsitiktinai dirbančių sistemų elementų kritiškumą, gaunami rezultatai leidžia išsamiau nustatyti galimus kritinius elementus ir kombinacijas, kiekviename kritiškumo intervale atsižvelgiant į visų sistemų atsitiktinį darbą. Šiam vertinimo modeliui reikia daugiau skaičiavimo resursų ir išsamesnės informacijos apie kiekvieną infrastruktūros elementą. Taip pat reikia paminėti, kad tikimybinio vertinimo modelių galima analizuoti infrastruktūros modifikacijas, įvertinant jų įtaką vidutiniam sistemos kritiškumui.

3.3 Svarbos ir jautrumo analizės rezultatai

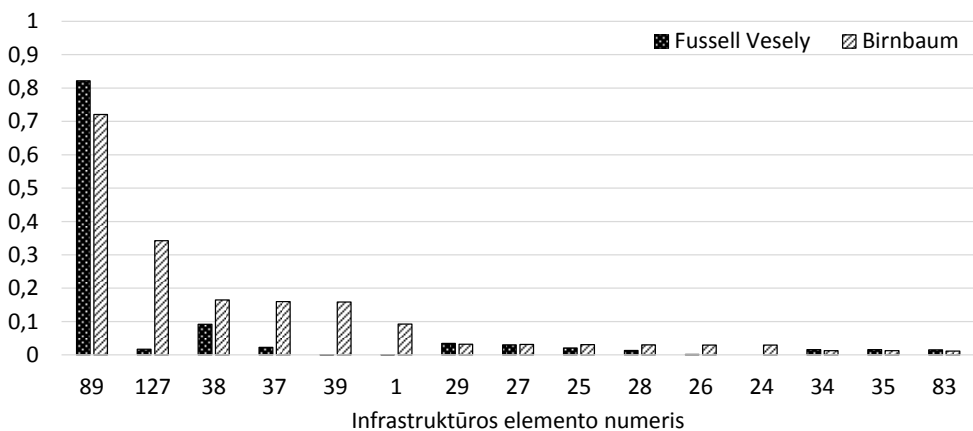
Jautrumo ir neapibrėžtumo analizę nėra įprasta taikyti tikimybiniam energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modeliams. Kaip

minėta metodinėje dalyje, rezultatai, vertinant infrastruktūros elementų kritiškumą, aprašomi kaip tikimybiniai dydžiai (tikimybinėmis charakteristikomis). Infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo modelis pagrįstas Monte-Karlo imitaciniais skaičiavimais ir jau kritiškumo vertinimo metu yra įvertinama parametru neapibrėžtis (parenkant didelį iteracijų skaičių). Todėl neapibrėžties analizė nėra tikslinga taikyti šiam kritiškumo vertinimo modeliui.

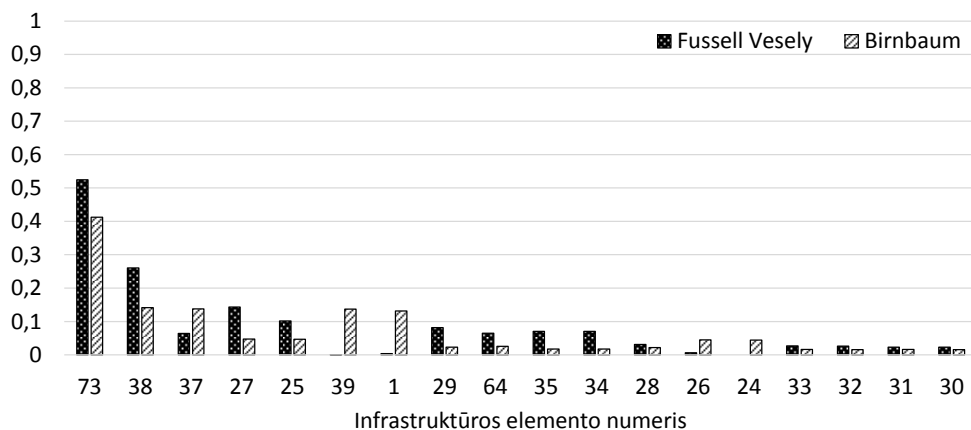
Analizuojant energetikos sistemų infrastruktūros elementų kritiškumą, pačiame vertinimo modelyje, kaip pradiniai duomenys, aprašantys energetikos sistemų darbą, naudojama statistinė informacija, gauta iš įvairios literatūros. Todėl sąlyginė jautrumo analizė pasirinkta atlikti sudarytam energetikos sistemų modeliui, atliekant infrastruktūros elementų svarbos analizę. Ši analizė parodo, kaip pasikeistų energetikos sistemų kritiškumo įvertis (sistemų kritiškumo lygis), jei pasikeistų infrastruktūros elementų patikimumas. Taip pat toks vertinimas dažniausiai yra taikomas tikimybinėje saugos analizėje (tikimybinuose modeliuose), vertinant elementų įtaką sistemos patikimumui. Pasinaudojant infrastruktūros elementų kritiškumo vertinimo rezultatais, sistemoms dirbant atsitiktinai, buvo atlikta infrastruktūros elementų svarbos analizė, pagal Birnbaumo ir Fussell-Vesely svarbos matus, agreguotam Lietuvos energetikos sistemų baziniam modeliui.

Birnbaumo matas apskaičiuojamas vertinant sistemos patikimumo pokytį, kai sistemos elementas yra sugedęs ir kai sistemos elementas yra veikiantis ((2.80) formulė). O Fussell-Vesely matas apskaičiuojamas vertinant pokytį tarp vidutinio sistemos kritiškumo (dirbtinai nepašalinant k -ojo elemento) ir vidutinio kritiškumo, kai k -asis elementas yra veikiantis (visiškai patikimas), santykiu su vidutiniu sistemų kritiškumu. Taip yra vertinama k -ojo elemento patikimumo įtaka (elemento neprieinamumas) sistemų kritiškumui (2.81).

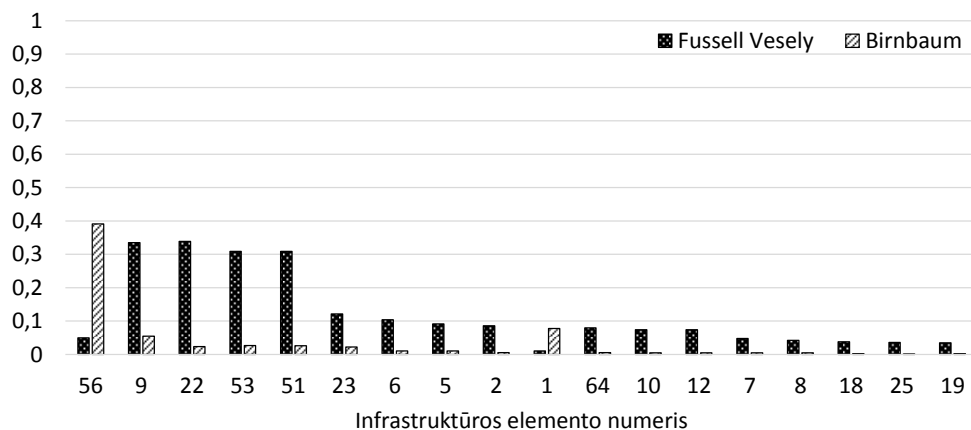
Apibendrinantys infrastruktūros elementų svarbos analizės rezultatai elektros ir Miesto A bei Miesto E CŠT sistemų atžvilgiu pateikiami 3.19, 3.20 ir 3.21 paveiksluose.



3.19 pav. Infrastruktūros elementų svarbos analizė elektros sistemos atžvilgiu



3.20 pav. Infrastruktūros elementų svarbos analizė Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu



3.21 pav. Infrastruktūros elementų svarbos analizė Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu

Šiuos rezultatus galima interpretuoti taip: kuo sąlyginai didesnė Birnbaum svarbos mato reikšmė, vertinant infrastruktūros elementą, tuo mažesnis k -ojo elemento patikimumo rodiklių pokytis turės didelės įtakos sistemos kritiškumo lygiui. Birnbaum svarbos matas priklauso tik nuo sistemos struktūros ir kitų elementų patikimumo, tačiau nepriklauso nuo k -ojo elemento patikimumo. Kiekvienos sistemos atžvilgiu galima išskirti aibę elementų, kurie turi įtakos rezultatų jautrumui. Elektros sistemos atžvilgiu būtų galima tokią aibę sudaryti iš $\{z^{89}, z^{127}, z^{38}, z^{37}, z^{39}\}$ elementų. Miesto A CŠT sistemos atžvilgiu jautrumą rezultatams lemia $\{z^{73}, z^{38}, z^{37}, z^{39}, z^1\}$, o Miesto E CŠT sistemos atžvilgiu $\{z^{56}, z^1\}$ elementai. Fussell-Vesely elementų svarbos matai, kurie gali būti naudojami nustatant komponentus, kurių saugumą (patikimumą) reikėtų gerinti, norint sumažinti sistemų kritiškumą, koreliuoja su elementų kritiškumo (sistemoms dirbant atsitiktinai) identifikuotais kritinių elementų rezultatais.

IŠVADOS

Disertacijoje sukurta nauja energetikos sistemų ypatingos svarbos infrastruktūrų kritiškumo vertinimo metodika, skirta įvertinti tiek bendram sistemai, tiek atskirų elementų ar jų grupių kritiškumui galutinių vartotojų energijos poreikių užtikrinimo atžvilgiu bei palyginti naujų infrastruktūros elementų įtaką sistemų kritiškumui. Pagal šią metodiką atliktas agreguotų Lietuvos energetikos sistemų infrastruktūros (uždaros sistemos) tyrimas, vertinant esamų energetikos sistemų kritiškumą bei naujų energetikos infrastruktūrų įtaką kritiškumui sumažinti. Atsižvelgus į pasirinktus kritiškumo lygio priimtinumą parametrus, nustatyti nagrinėjamų sistemų elementai ir jų grupės, kurių kritiškumas viršija šiuos parametrus. Atliktų mokslinių tyrimų pagrindu galima daryti šias išvadas:

1. Pagal sukurta integralią energetikos ypatingos svarbos infrastruktūrų vertinimo metodiką galima tiksliau nustatyti sistemos kritinius elementus, nei naudojant tik deterministinius metodus. Nagrinėtų energetikos sistemų atveju buvo nustatyta, kad taikant deterministinius metodus identifikuoti tik 3 kritiniai elementai, o tikimybinis metodus – 10 kritinių elementų.
2. Energetikos sistemų infrastruktūros elementų patikimumo rodiklių įtraukimas į kritiškumo vertinimo matematinį modelį leidžia nustatyti bendrą sistemos kritiškumo lygį, kas įmanoma tik įvertinant elementų patikimumą. Darbe parodyta, kad nagrinėtų energetikos sistemų atveju dėl elementų patikimumo bendras elektros sistemos kritiškumas padidėja apie 7 %, analizuotų CŠT sistemų bendras kritiškumas atitinkamai padidėja apie 2 %.
3. Atlikus nagrinėtos energetikos sistemų infrastruktūros kritiškumo vertinimą nustatyta, kad:
 - didžiausią kritiškumą elektros sistemai turi penki elementai, kurių kritiškumas yra nuo 0,16 iki 0,72. Taip pat nustatyta, kad yra viena elementų pora (iš 12246 kombinacijų), kurios kritiškumas yra didesnis nei 0,5. Identifikuoti keturi elementų trejetai (iš 632710 kombinacijų), kurių kritiškumas didesnis nei 0,6;
 - nagrinėtų miestų CŠT sistemų atžvilgiu rasti 7 atskiri elementai, kurių vidutinis kritiškumas yra nuo 0,1 iki 0,42; identifikuotos 0,3 % elementų poros, kurių kritiškumas didesnis nei 0,5 ir 2,8 % elementų trejetai, kurių kritiškumas didesnis už 0,6.
4. Naudojant logistinę regresiją galima nustatyti tikimybes, kad elementai ar jų grupės pateks į pasirinktus kritiškumo intervalus. Darbe nagrinėtose energetikos sistemose buvo nustatyti elementai ir jų kombinacijos, kurie su tikimybe didesne už 0,5 turi kritiškumą ne mažesnę nei 0,6. Rasta 60 tokių elementų kombinacijų.

5. Nagrinėjant energetikos sistemų infrastruktūros dujų tiekimo sistemos plėtros projektus (suskystintų gamtinių dujų terminalas; dujotiekių jungtis tarp Lenkijos ir Lietuvos; dujotiekių jungties tarp Lietuvos ir Latvijos pajėgumų padidinimas) nustatyta, kad didžiausią įtaką kritiškumui sumažinti CŠT sistemose turi suskystintų gamtinių dujų terminalas. Nagrinėtų miestų CŠT sistemose dėl jo įtakos kritiškumas sumažėja vidutiniškai 60 %. Elektros sistemos atžvilgiu kritiškumą suskystintų gamtinių dujų terminalas sumažina mažiau, apie 7 %, Tuo tarpu dujų jungtis su Lenkija – daugiau, apie 21 %.

LITERATŪRA

- AJAH, A. N., et al. Hierarchical markov reliability / availability models for energy & industrial infrastructure systems conceptual design. In: MARQUARDT, W. ir PANTELIDES, C. (eds.). *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier. 2006. 21, p 1753-1758, ISSN 1570-7946
- AUGUTIS, J., et al. Risk management of hazardous material transportation. *Management of natural resources, sustainable development and ecological hazards*. 2007. 99, 393-402. ISBN 978-1-84564-048-4.
- BAGAJEWICZ, M. ir G. VALTINSON. Computation of Natural Gas Pipeline Hydraulics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. 53, 10707-10720. ISBN 0-8493-2785-7.
- BAKIRTZIS, A. G. ir P. N. BISKAS. A decentralized solution to the DC-OPF of interconnected power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*. 2003. 18, 1007-1013, ISSN 0885-8950
- BAROUD, H., et al. Stochastic Measures of Network Resilience: Applications to Waterway Commodity Flows. *Risk Analysis*. 2014. 34, 1317-1335. ISSN 1539-6924.
- BARRETT, C., et al. Cascading failures in multiple infrastructures: From transportation to communication network. *Critical Infrastructure (CRIS)*, 2010 5th International Conference on, 20-22 Sept. 2010. 1-8. ISBN 978-1-4244-8080-7.
- BELLUCK, D. A., et al. Environmental Security, Critical Infrastructure and Risk Assessment. In: LINKOV, I., KIKER, G. & WENNING, R. (eds.) *Environmental Security in Harbors and Coastal Areas*. Springer Netherlands. 2007. 1. 3-17. ISBN 978-1-4020-5800-4.
- BOMPARD, E., et al. Assessment of information impacts in power system security against malicious attacks in a general framework. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. 94, 1087-1094. ISSN 0951-8320.
- CAGNO, E., et al. Risk analysis of underground infrastructures in urban areas. *Reliability Engineering & System Safety*. 2011. 96, 139-148. ISSN 0951-8320.
- CEN/CENELEC. Manual for Determination of Combined Heat and Power (CHP), CWA 45547. 2004.
- CHEN, B. Y., et al. Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2012a. 46, 501-516. ISSN 0965-8564.
- CHEN, M., et al. Application of system dynamics model for municipal solid waste generation and landfill capacity evaluation in Singapore. *The Macrotheme Review*. 2012b. 1. 101-114. ISSN 1848-4735.
- CHINESE, D. ir A. MENEGHETTI. Optimisation models for decision support in the development of biomass-based industrial district-heating networks in Italy. *Applied Energy*. 2005. 82, 228-254. ISSN 0306-2619.
- COMMITTEE, E. C. The Pipeline Inspection, Protection, Enforcement, and Safety Act of 2006: Implementation Review and Discussion of Safety Reassessment Intervals for Natural Gas Pipelines / Committee On Energy And Commerce (U.S.A.). 2008.
- CONCAWE. *Performance of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2006 and since 1971. Prepared by CONCAWE oil Pipeline Management Group's Special Task Force on oil pipeline spillages (OP/STF-1) (Report no. 7/08)* [interaktyvus]. 2006. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <https://www.concawe.eu/Content/Default.asp?>
- CONTINI, S., et al. Concurrent Importance and Sensitivity Analysis applied to multiple Fault Trees. *European Commission, Joint Research Centre*. 2009. EUR 23825 EN. ISSN

- 1018-5593 [interaktyvus]. 2006. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC51432/reqno_jrc51432_cisa_eur_final_report.pdf%5B1%5D.pdf
- CORREA-HENAO, G. J., et al. Using interconnected risk maps to assess the threats faced by electricity infrastructures. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2013. 6, 197-216. ISSN 1874-5482
- CORREA, G. J. Ir J. M. YUSTA. Grid vulnerability analysis based on scale-free graphs versus power flow models. *Electric Power Systems Research*. 2013. 101, 71-79. ISSN 0378-7796.
- CORROSION-DOCTORS. Pipeline Failure Cause / Corrosion doctors. [interaktyvus]. 2006. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.corrosion-doctors.org/Pipeline/Pipeline-failures.htm>
- DAI, Y., et al. An improved framework for power grid vulnerability analysis considering critical system features. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2014. 395, 405-415. ISSN 0378-4371.
- DE PORCELLINIS, S., et al. A Holistic-Reductionistic Approach for Modeling Interdependencies. In: PALMER, C. & SHENOI, S. (eds.) *Critical Infrastructure Protection III*. Springer Berlin Heidelberg. 2009. 4. 215-227. ISBN 978-3-642-04797-8.
- DEVORE, J. L. ir K. N. BERK. *Modern Mathematical Statistics with Applications*, Springer. 2011. XII, 845p. ISBN 978-1-4614-0391-3
- DUEÑAS-OSORIO, L. ir A. KWASINSKI. Quantification of Lifeline System Interdependencies after the 27 February 2010 Mw 8.8 Offshore Maule, Chile, Earthquake. *Earthquake Spectra*. 2012. 28, S581-S603.
- EGIG. 8th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group, 1970-2011, Doc. Number EGIG 11.R.0402. 2011. [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.egig.eu/>.
- ERDENER, B. C., et al. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. 61, 410-420. ISSN 0142-0615
- ESPIRITU, J. F., et al. Component Criticality Importance Measures for the Power Industry. *Electric Power Systems Research*. 2007. 77, 407-420. ISSN 0378-7796.
- EUROPOS KOMISIJA. Green Paper On A European Programme For Critical Infrastructure Protection. 2005. COM(2005) 576
- EUROPOS KOMISIJA TARYBOS DIREKTYVA 2008/114/EC dėl Europos ypatingos svarbos infrastruktūros objektų nustatymo ir priskyrimo jiems bei būtinybės gerinti jų apsaugą vertinimo. 2008. L 345/75.
- EUROPOS KOMISIJA. ENISA - European Union Agency for Network and Information Security. 2011. [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.enisa.europa.eu/>.
- EUROPOS KOMISIJA DIREKTYVA 2012/27/ES dėl energijos vartojimo efektyvumo, kuria iš dalies keičiamos direktyvos 2009/125/EB ir 2010/30/ES bei kuria panaikinamos direktyvos 2004/8/EB ir 2006/32/EB. 2012. [interaktyvus]. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: http://www.enmin.lt/lt/activity/veiklos_kryptys/strateginis_planavimas_ir_ES/EEO_ataskaita_2013_09_27_skelbimui.pdf
- EUSGELD, I., et al. The role of network theory and object-oriented modeling within a framework for the vulnerability analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. 94, 954-963. ISSN 0951-8320.

- FANG, Y.-P. ir E. ZIO. Unsupervised spectral clustering for hierarchical modelling and criticality analysis of complex networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2013, 116, 64-74. ISSN 0951-8320.
- FRANK, S., et al. Optimal power flow: a bibliographic survey I. *Energy Systems*. 2012. 3, 221-258. ISSN 1868-3967
- FOCUS GROUP ON REGIONAL COOPERATION. Joint risk assessment of security of gas supply of Estonia, Latvia, Lithuania 2012. Baltic Energy Market Interconnection Plan (BEMIP) [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/4/44/Joint_risk_assessment_of_security_of_gas_supply_of_Estonia_Latvia_Lithuania.pdf
- GAMBINI, M. ir M. VELLINI. High Efficiency Cogeneration: Performance Assessment of Industrial Cogeneration Power Plants. *Energy Procedia*. 2014, 45, 1255-1264. ISSN 1876-6102
- GIANNOPOULOS, G., et al. Risk assessment methodologies for Critical Infrastructure Protection. Part I: A state of the art. *European Commission, Joint Research Centre*. EUR 25286 EN - 2012.
- GROSSWINDHAGER, S., et al. Efficient Physical Modelling Of District Heating Networks. *Proceedings of the 22nd IASTED International Conference "Modelling and Simulation"*. 2011. 41-48. ISBN: 978-0-88986-891-5
- HENNEAUX, P., et al. Blackout Probabilistic Risk Assessment and Thermal Effects: Impacts of Changes in Generation. *IEEE Transactions on Power Systems* 2013. 28, 4722-4731. ISSN 0885-8950
- HOMELAND SECURITY. *National Infrastructure Protection Plan* [interaktyvus]. 2009. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: http://www.dhs.gov/files/programs/editorial_0827.shtm.
- HOWELLS, M., et al. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy*. 2011. 39, 5850-5870. ISSN 0301-4215
- HUANG, X., et al. Robustness of interdependent networks under targeted attack. *Physical Review E*. 2011. 83, 065101. DOI: 10.1103/PhysRevE.83.065101
- HULL, R., et al. A Framework For Multi-Criteria Decisionmaking With Special Reference To Critical Infrastructure: Policy And Risk Management Working Group Summary And Recommendations. In: ARAPIS, G., GONCHAROVA, N. & BAVEYE, P. (eds.) *Ecotoxicology, Ecological Risk Assessment and Multiple Stressors*. Springer Netherlands. 2006. 5, 355-369. ISBN 978-1-4020-4474-8.
- IIASA-ECS. *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts (MESSAGE)* [interaktyvus] 2011. Prieiga internete: <http://www.iiasa.ac.at/Research/ECS/docs/models.html#MESSAGE>.
- YU, L. Fault Tree Analysis and Reliability Assessment of Auxiliary Power Supply system for an HVDC Plant. *Scientia et Technica Año XIV*. 2008. 39, 141-146. ISSN 0122-1701.
- YU, Z. F. T. SPARROW. The Difficulty in Adding DC Power Flow Equations to Transmission Network Expansion. [interaktyvus]. 2006. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <https://www.purdue.edu/dp/energy/assets/pdfs/DCPowerFlow.pdf>
- YUSTA, J. M., et al. Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art. *Energy Policy*. 2011. 39, 6100-6119. ISSN 0301-4215.
- JENELIUS, E. ir L. G. MATTSSON. Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2012. 46, 746-760. ISSN 0965-8564.

- JENELIUS, E. ir L. G. MATTSSON. Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2015. 49, 136-147. ISSN 0198-9715.
- JOHANSSON, A., et al. The typology for allocations of societal risk and safety management tasks at the local governmental level – Framing the current directions in Sweden. *Safety Science*. 2009. 47, 680-685. ISSN 0925-7535.
- JOHANSSON, C. Ir F. WERNSTEDT. Dynamic Simulation Of District Heating Systems. *3rd European Simulation and Modelling Conference*. 2005. Oporto, Portugal.
- JOHANSSON, J. Ir H. HASSEL. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2010. 95, 1335-1344. ISSN 0951-8320.
- JOHANSSON, J., et al. Reliability and vulnerability analyses of critical infrastructures: Comparing two approaches in the context of power systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2013. 120, 27-38. ISSN 0951-8320.
- JOINT RESEARCH CENTRE. *SIMLAB 2.2 Reference Manual, Software package for uncertainty and sensitivity analysis*, [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://simlab.jrc.ec.europa.eu>.
- JUNG, J., et al. International Trade Inoperability Input-Output Model (IT-IIM): Theory and Application. *Risk Analysis*. 2009. 29, 137-154. ISSN 1539-6924.
- KAEGI, M., et al. Analyzing maintenance strategies by agent-based simulations: A feasibility study. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. 94, 1416-1421. ISSN 0951-8320
- KALANTA, S. *Taikomosios optimizacijos pagrindai*, Vilnius: Technika. 2007.
- KARACA, F., et al. A comparative analysis framework for assessing the sustainability of a combined water and energy infrastructure. *Technological Forecasting and Social Change*. 2015. 90, 456-468. ISSN 0040-1625.
- KEENER, R. W. *Theoretical Statistics: Topics for a Core Course*, Springer. 2010.
- KIM, K. ir S. HAN. A study on importance measures and a quantification algorithm in a fire PRA model. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. 94, 969-972. ISSN 0951-8320.
- KIRSCHEN, D. ir G. STRBAC. Fundamentals of Power System Economics. *John Wiley & Sons*. 2004.
- KJØLLE, G. H., et al. Risk analysis of critical infrastructures emphasizing electricity supply and interdependencies. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012. 105, 80-89. ISSN 0951-8320.
- KLOOS, M. SUSA Version 3.6 User's Guide and Tutorial. Software for Uncertainty and Sensitivity Analyses. *GRS*. 2008.
- KOLLIKATHARA, N., et al. A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. *Waste Management*. 2010. 30, 2194-2203. ISSN 0956-053X.
- KUO, W. Ir X. ZHU. Importance Measures In Reliability, Risk, And Optimization. *A John Wiley & Sons*. 2012. 472. ISBN: 978-1-119-99344-5.
- KVESELIS, V. ir D. STRAZDAS. Šilumos tinklų su per didelio skersmens vamzdynais renovacijos ekonominės problemos. *Energetika*. 2007. 1, 28-33. ISSN 0235-7208.
- LIETUVOS ENERGETIKA, Lietuvos energetikos instituto kasmetinis leidinys 2001-2012, ISSN 1822-5268. [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.lei.lt/main.php?m=141&k=1>
- LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA, Tiekimo saugumas Lietuvos elektros energijos rinkoje monitoringo ataskaita. [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.enmin.lt/lt/>

- LŠTA, Šilumos Tiekimo Bendrovių 2011 metų ūkinės veiklos apžvalga, LIETUVOS ŠILUMOS TIEKĖJŲ ASOCIACIJA, [interaktyvus] 2012. [žiūrėta. 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.lsta.lt/>
- LITGRID, Elektros perdavimo sistemos operatorius Litgrid. [interaktyvus] 2013. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.litgrid.eu/>
- LIETUVOS RESPUBLIKOS SEIMAS Dėl gamtinių dujų perdavimo, paskirstymo, laikymo ir tiekimo taisyklių patvirtinimo, Nr. 15-598 *Valstybės žinios*. 2002.
- LOCHNER, S. ir BOTHE, D. The development of natural gas supply costs to Europe, the United States and Japan in a globalizing gas market—Model-based analysis until 2030. *Energy Policy*. 2009. 37, 1518-1528. ISSN 0301-4215.
- LÖSCHEL, A., et al. Energy security—concepts and indicators. *Energy Policy*. 2010. 38, 1607-1608. ISSN 0301-4215.
- LURIE, M. V. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation. *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co*. 2008.
- MARKAL. Energy Technology Systems Analysis Programme [interaktyvus] 2001. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.etsap.org/Tools/MARKAL.htm>
- MATUZAS, V., AUGUTIS, J. ir UŠPURAS, E. Ageing assessment in network systems. *Safety and reliability for managing risk: proceedings of the European safety and reliability conference (ESREL 2006)*, 2006. p. 559-562. ISBN 0-415-41620-5.
- MENON, E. S. *Gas Pipeline Hydraulics*, Taylor & Francis. 2005.
- MERLE, G., et al. Improving the Efficiency of Dynamic Fault Tree Analysis by Considering Gates FDEP as Static. *European Safety and Reliability Conference (ESREL 2010)*. Rhodes, Greece. Taylor & Francis. 2010. 845-851.
- MONFORTI, F. ir A. SZIKSZAI. A MonteCarlo approach for assessing the adequacy of the European gas transmission system under supply crisis conditions. *Energy Policy*. 2010. 38, 2486-2498. ISSN 0301-4215.
- MONTOYA, D.P., ir J. M. RAMIREZ. A minimal spanning tree algorithm for distribution networks configuration. *Power and Energy Society General Meeting. IEEE* . 2012. 1-7. ISSN 1944-9925.
- NAVICKAS, A. Elektros energetikos sistemų patikimumas, *Technologija*. 2007.
- OLIVA, G., et al. Fuzzy dynamic input–output inoperability model. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2011. 4, 165-175. ISSN 1874-5482.
- PANT, R., et al. Interdependent impacts of inoperability at multi-modal transportation container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2011. 47, 722-737. ISSN 1366-5545.
- RADZIUKYNAS, V. ir I. RADZIUKYNIENE. Optimization Methods Application to Optimal Power Flow in Electric Power Systems. *Optimization in the Energy Industry*. 2009. 3, 409-436. ISBN 978-3-540-88965-6.
- RAMANA, T., et al. Simple and Fast Load Flow Solution for Electrical Power Distribution Systems. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 2013. 5, 245-255. ISSN: 2085-6830.
- RAMESH, V. ir R. SARAVANNAN. Reliability Assessment of Cogeneration Power Plant in Textile Mill Using Fault Tree Analysis. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2010. 11, 56-70. ISSN 1547-7029.
- RAUSAND, M. ir A. HØYLAND. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, Wiley. 2004.
- RAVN, H. Ir F. BALMOREL. *A Model for Analyses of The Electricity and CHP Markets in the Baltic Sea Region* [interaktyvus]. 2001. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.balmorel.com>.

- REED, D. A., et al. Methodology for Assessing the Resilience of Networked Infrastructure. *Systems Journal, IEEE*. 2009. 3, 174-180. ISSN 1932-8184.
- REPUBLIC OF LATVIA. *Procedures for the Supply of Energy Users and Sale of Heating Fuel During Declared Energy Crisis (Regulation No. 312)* [interaktyvus]. 2011. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: http://www.vvc.gov.lv/export/sites/default/docs/LRTA/MK_Noteikumi/Cab_Reg_No_312_-_Supply_of_Energy_Users_and_Sale_of_Heating_Fuel.doc
- RIGOLE, T., et al. Agents controlling the electric power infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructures*. 2008. 4, 96-109. ISSN 1475-3219.
- RIMKEVICIUS, S., et al. Development of approach for reliability assessment of pipeline network systems. *Applied Energy*. 2012. 94, 22-33. ISSN 0306-2619.
- RINALDI, S. M. Modeling and simulating critical infrastructures and their interdependencies. *System Sciences, Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on*, 5-8 Jan. 2004. 8. ISBN 0-7695-2056-1.
- THE PIPELINE INSPECTION, Protection, Enforcement, and Safety Act of 2006: Implementation Review and Discussion of Safety Reassessment Intervals for Natural Gas Pipelines / Committee On Energy And Commerce (U.S.A.). [interaktyvus]. 2006. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: http://energycommerce.house.gov/index.php?option=com_content&view=article&id=566&catid=28&Itemid=58
- SANTOS, J. R., et al. A Framework for Linking Cybersecurity Metrics to the Modeling of Macroeconomic Interdependencies. *Risk Analysis*. 2007. 27, 1283-1297. ISSN 1539-6924.
- SATUMTIRA, G. ir L. DUEÑAS-OSORIO. Synthesis of Modeling and Simulation Methods on Critical Infrastructure Interdependencies Research. In: GOPALAKRISHNAN, K. ir PEETA, S. (eds.) *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*. Springer Berlin Heidelberg. 2010. ISBN 978-3-642-11404-5.
- SHUANG, Q., et al. Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. 124, 132-141. ISSN 0951-8320.
- SINGH, A. N., et al. Identifying critical infrastructure sectors and their dependencies: An Indian scenario. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2014. 7, 71-85. ISSN 1874-5482.
- SUDHAKAR, T.D. ir K. N. SRINIVAS. Power system restoration based on Kruskal's algorithm. *Electrical Energy Systems (ICEES)*. 1st International Conference. 2011. 281-287. ISBN 978-1-4244-9732-4.
- TARVYDAS, D. Energetinės sistemos plėtros analizei skirtų modelių apžvalga. *Energetika*. 2005. 1, 40-45. ISSN: 0235-7208.
- THEOHARIDOU, M., et al. A multi-layer Criticality Assessment methodology based on interdependencies. *Computers & Security*. 2010, 29, 643-658. ISSN 0167-4048.
- TRUCCO, P., et al. Dynamic functional modelling of vulnerability and interoperability of Critical Infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012. 105, 51-63. ISSN 0951-8320.
- TVEIT, T.-M., et al. Multi-period MINLP model for optimising operation and structural changes to CHP plants in district heating networks with long-term thermal storage. *Energy Conversion and Management*. 2009, 50, 639-647. ISSN 0196-8904.
- U.S.-CANADA POWER SYSTEM OUTAGE TASK FORCE. *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations* [interaktyvus]. 2004. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete:

<http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/BlackoutFinal-Web.pdf>.

- UKOPA. *The United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association* [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga per internetą: <http://www.ukopa.co.uk/>.
- UTNE, I. B., et al. A method for risk modeling of interdependencies in critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2011. 96, 671-678. ISSN 0951-8320.
- VAN DER BORST, M. ir H. SCHOONAKKER. An overview of PSA importance measures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2001. 72, 241-245. ISSN 0951-8320.
- VESTERLUND, M. ir J. DAHL. A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks, *Energy Conversion and Management*. 2015. 89, 555-567, ISSN 0196-8904.
- VILLADA, J. ir Y. OLAYA. A simulation approach for analysis of short-term security of natural gas supply in Colombia. *Energy Policy*. 2013. 53, 11-26. ISSN 0301-4215.
- VORONOV, R. ir R. ALZBUTAS. Application of probabilistic safety and reliability analysis for a system of fusion facility. *Energetika*. 2013. 59, 183-193. ISSN: 0235-7208.
- ZIO, E. ir G. SANSAVINI. Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins. *Reliability, IEEE Transactions on*. 2011. 60, 94-101. ISSN 0018-9529.
- WANG, S., et al. Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems: A methodological framework. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012. 391, 3323-3335. ISSN 0378-4371.
- XU, J., DONG, R. ir D. D. WU. On simulation and optimization of one natural gas industry system under the rough environment. *Expert Systems with Applications*. 2010. 37, 1854-1862. ISSN 0957-4174.
- XU, W., et al. Supply-Driven Dynamic Inoperability Input-Output Price Model for Interdependent Infrastructure Systems. *Journal of Infrastructure Systems*. 2011. 17, 151-162. ISSN 1076-0342.
- АБРАМЧУК, Ф. И., ХАРЧЕНКО, А. И., ВОРОНКОВ, А. И. ir НИКИТЧЕНКО, И. Н. Использование эксергетического метода при термодинамическом анализе газовых процессов в тепловых машинах. *Вестник ХНАДУ*. 2011. 53. ISSN 2219-5548
- ПЛОТНИКОВ, В. В. ir ПЕТРОВА, О. Г. 2009. Эксергетический метод в системном анализе химико-технологических схем. *Современные наукоемкие технологии*.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

STRAIPSNIAI

Thomson Reuters „Web of Knowledge“ duomenų bazėje esančiuose mokslo žurnaluose, turinčiuose citavimo indeksą

1. Augutis J., Jokšas B., Krikštolaitis R., Žutautaitė I. Criticality assessment of energy infrastructure // Technological and economic development of economy. ISSN 2029-4913. 2014, Vol. 20, No. 2, p. 312-331. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); ICONDA]

Thomson Reuters „Web of Knowledge“ duomenų bazėje esančiuose mokslo žurnaluose, neturinčiuose citavimo indekso

2. Augutis J., Jokšas B., Krikštolaitis R., Urbonas R., The criticality measure of energy systems // Energy Procedia. ISSN 1876-6102. 2014 Vol. 61. p.1025-1028. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)].

Tarptautinių konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

1. Jokšas B., Žutautaitė-Šeputienė I., Augutis J., Ušpuras E. Assessment of hazard distribution within network systems with resistance feature // Risk analysis VII & Brownfields V : Seventh international conference on computer simulation in risk analysis and hazard mitigation & Fifth international conference on prevention, assessment, rehabilitation and development of brownfield sites. Ashurst, Southampton: WitPress, 2010. ISBN 978-1-84564-472-7, p. 13-22.
2. Jokšas B., Žutautaitė I. Energy critical infrastructure assessment methods // CYSENI 2012 [elektroninis išteklius] : 9th International Conference of Young Scientists on Energy Issues, May 24-25, 2012, Kaunas, Lithuania: conference proceedings / Lithuania Energy Institute, Young Scientist Association of LEI. Kaunas : LEI. ISSN 1822-7554, 2012. p. 405-417.
3. Jokšas B., Žutautaitė I. Method for criticality assessment of energy infrastructure // 10 CYSENI anniversary [elektroninis išteklius]: 10th International Conference of Young Scientists on Energy Issues, May 29-31, 2013, Kaunas, Lithuania: conference proceedings / Lithuania Energy Institute, Young Scientist Association of LEI. Kaunas: LEI. ISSN 1822-7554, 2013. p. 274-284.
4. Jokšas B., Žutautaitė I., Ušpuras E. A gas supply system criticality assessment // Risk analysis IX : 9th international conference on risk analysis and hazard mitigation. Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton : WitPress, 2014. ISBN 978-1-84564-792-6, p.321-330.
5. Martišauskas, L.; Urbonas, R.; Jokšas, B.; Krikštolaitis, R. Energy security level assessment application for nuclear power. In *Nuclear Energy for New Europe*

2011 – 20th International Conference, September 12–15, 2011, Bovec, Slovenia, 2011, p. 1103.1–1103.8.

6. Jokšas, B., Žutautaitė, I., Augutis, J., Rekašius, T. Dependence of the gas supply system criticality indicator(s) on the system elements' reliability // ESREL 2014: In Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, September 14–18, 2014, Poland, Wrocław. London: Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-138-02681-0. 2010, p. 1035–1041. [Conference proceedings citation index].

PRIEDAI

Priedas Nr. 1. Bazinės infrastruktūros (M2 modifikacija), struktūra artima Lietuvos energetikos sistemoms, modelis

Šis bazinės infrastruktūros modelis sudarytas iš elektros energetikos sistemos, šešių didžiųjų Lietuvos miestų centralizuoto šilumos tiekimo sistemų, gamtinių dujų tiekimo sistemos. Šalies energetikos sistemų modelis sudarytas kaip uždaros valstybės be elektros importo jungčių, ir pagrindinis pirminis kuras (gamtinės dujos) į šalį tiekiamos nepertraukiamai. Taip pat gamtinės dujos nėra transportuojamos į Kaliningradą. Gamtinės dujos naudojamos kaip pagrindinė pirminė energijos rūšis, naftos produktai – kaip rezervinis kuras. Šis šalies energetikos sistemų modelis skirtas nustatyti kritinius energetikos sistemų infrastruktūros elementus galutinių vartotojų atžvilgiu.

Elektros energetikos sistema

Elektros energetikos sistema apima elektros energijos gamybą, perdavimą, skirstymą, tiekimą ir vartojimą (prekyba su kaimyninėmis valstybėmis nėra nagrinėjama). Lietuvoje elektros energetikos sistemos darbą apibrėžia Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas (Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas, 2000). Elektros energijos gamybos pirmumas suteikiamas atsinaujinančius energijos išteklius naudojančioms generavimo technologijoms (hidroelektrinėms, vėjo elektrinių parkams). Pirmumas elektros energijai gaminti suteikiamas termofikacinėms elektrinėms, dirbančioms termofikaciniu režimu, ir termofikacinėms elektrinėms, naudojančioms biokurą. Bazinio infrastruktūros modelio elektros energetikos sistemoje naudojamos generavimo technologijos pateiktos 1 lent., suminė generavimo technologijų galia yra 3077 MW. Planuojama Lietuvos branduolinė elektrinė modelyje nėra analizuojama.

1 lentelė. Bazinio infrastruktūros modelio elektros energijos generavimo technologijos ir jų charakteristikos (Lietuvos energetika, 2011, Lietuvos Respublikos energetikos ministerija, 2011, LŠTA, 2014)

Žymėjimas	Elektrinės ir generuojantys šaltiniai	Įrengtoji elektrinė galia MW	Įrengtoji šiluminė galia MW
K_TEC_1	Kauno TE	170	389
V_TEC_1	Vilniaus TE2	24	928
V_TEC_2	Vilniaus TE3	360	604
KL_TEC_1	Klaipėdos elektrinė	10,8	43,8
M_TEC_1	Mažeikių elektrinė	160	600
S_TEC_1	Šiaulių elektrinė	3	44
P_TEC_1	Panevėžio TE	35	33
PP_1	„Lietuvos Elektrinė“ Blokas Nr.1	150	282
PP_2	„Lietuvos Elektrinė“ Blokas Nr.2	150	282
PP_3	„Lietuvos Elektrinė“ Blokas Nr.5	300	239
PP_4	„Lietuvos Elektrinė“ Blokas Nr.6	300	239
PP_5	„Lietuvos Elektrinė“ Blokas Nr.7	300	239
PP_6	„Lietuvos Elektrinė“ Blokas Nr.8	300	239
PP_7	„Lietuvos Elektrinė“ Blokas Nr.9	455	0

Žymėjimas	Biokuro elektrinės	Įrengtoji elektrinė galia MW	Įrengtoji šiluminė galia MW
K_BIO_BH_1	Klaipėda "Fortum"	20	63
S_BIO_BH_1	Šiauliai	11	40,4
Žymėjimas	Vėjo elektrinės	Įrengtoji elektrinė parko galia MW	
V_P_1	Vėjo parkas 1	161,93	
V_P_2	Vėjo parkas 2	39,805	
Žymėjimas	Hidroelektrinės (HE)	Įrengtoji elektrinė galia MW	
HE_1	Kauno hidroelektrinė	100,8	
HE_2	Mažosios hidroelektrinės	25,67	

Centralizuoto šilumos tiekimo sistema

Baziniame energetikos sistemų infrastruktūros modelyje CŠT sistema yra viena svarbiausių energetikos sistemų. Modelyje įrengtoji šilumos energijos šaltinių šiluminė galia sudaro apie 7073 MW. Modelyje įtrauktos Vilniaus, Kauno, Klaipėdos, Panevėžio, Šiaulių ir Mažeikių CŠT sistemos. Šiluma gaminama daugiausia termofikacinėse elektrinėse, katilinėse ir biokurą naudojančiose katilinėse. Bazinio infrastruktūros modelio CŠT sistemoje naudojamos generavimo technologijos pateiktos 1 ir 2 lent.

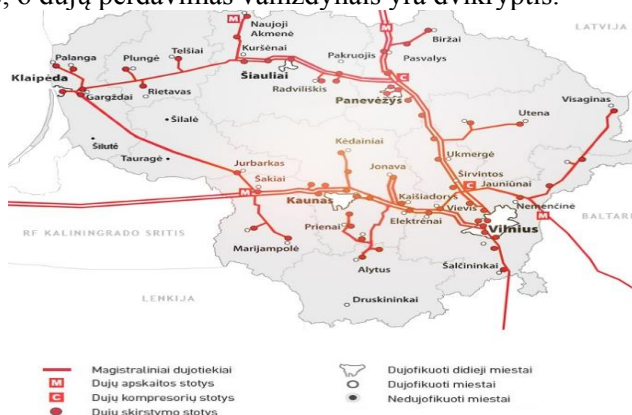
2 lentelė. Bazinio infrastruktūros modelio CŠT sistemų generavimo technologijos ir jų charakteristikos (LŠTA, 2014)

Žymėjimas	Katilinės ir generuojantys šaltiniai	Įrengtoji šiluminė galia MW
K_BH_1	Petrašiūnų elektrinė	381,4
K_BH_2	Pergalės katilinė	70
K_BH_3	Garliavos katilinė	64,2
K_BH_4	Noreikiškių katilinė	49
K_BH_5	Šilko katilinė	44,8
K_BH_6	64 Katilinė	16,8
K_BH_7	Ežerėlio katilinė	12,8
V_BH_1	RK-8 Ateities g 12	495
V_BH_2	RK-2 Naujoji Vilnia	139
V_BH_3	Elektrinė NR-2	478
V_BH_4	RK-7 šaltas rezervas	96
KL_BH_1	Rajoninė katilinė	528,3
KL_BH_2	Elektrinė	303,7
KL_BH_3	Lypkių rajono katilinė	116
KL_BH_4	Paupių katilinė	7,2
M_BH_1	Mažeikių katilinė	96,8
M_BH_2	Reivyčių katilinė	4,7
S_BH_1	Pietinė katilinė	495,6
S_BH_2	Tilvyčio g. katilinė	16,7
S_BH_3	Zoknių katilinė	6,75
S_BH_4	Šiaurinė katilinė	5,8
S_BH_5	Rėkyvos katilinė	4,04
P_BH_1	Panevėžio elektrinė	245,6
P_BH_2	Panevėžio rajoninė katilinė	149,8
P_BH_3	Rokiškio rajoninė katilinė	98,9
P_BH_4	Kėdainių pikinė katilinė	93
P_BH_5	Pasvalio rajoninė katilinė	34
P_BH_6	Zarasų rajoninė katilinė	21,38

P_BH_7	Vilainių katilinė	8
P_BH_8	Zarasų NR-2 rezervinė katilinė	8
Biokatilinės		
K_BIO_BH_1	Garliava	6,5
K_BIO_BH_2	Kaunas "GECO"	24
K_BIO_BH_3	Kaunas "Lorinzon"	10
V_BIO_BH_1	Vilniaus "Bionovus"	60
V_BIO_BH_2	Vilnius	55
M_BIO_BH_1	Mažeikių	12
M_BIO_BH_2	Mažeikių	10
M_BIO_BH_3	Reivyčių	1,5
M_BIO_BH_4	Reivyčių	2,5
M_BIO_BH_5	Mažeikiai	5
P_BIO_BH_1	Noriūnų	2,04
P_BIO_BH_2	Šepetos	1,8
P_BIO_BH_3	Šepetos	1,2
P_BIO_BH_4	Zarasų	4
P_BIO_BH_5	Akademijos	2,5
P_BIO_BH_6	Panevėžio	16
P_BIO_BH_7	Panevėžio	22,8

Gamtinių dujų tiekimo sistema

Baziniame energetikos sistemų infrastruktūros modelyje nagrinėjama tik gamtinių dujų perdavimo sistema, sudaryta iš magistralinių perdavimo tinklų, kurių ilgis yra apie 1,9 tūkst. km. Skirstymo stotys ir kompresorinės nėra nagrinėjamos, siekiant supaprastinti elementų kritiškumo vertinimo modelį. Gamtinių dujų tiekimo sistema sudaryta iš 89 infrastruktūros elementų (magistralinio dujotiekio atkarpų). Daroma prielaida, kad gamtinės dujos į perdavimo sistemą tiekiamas nepertraukiamai. Bazinėje gamtinių dujų sistemos infrastruktūroje dujos tiekiamos iš Baltarusijos į Lietuvą per Kotlovkos DAS, kurios pajėgumas 31,2 mln. m³/parą, iš Latvijos į Lietuvą per Kiemėnų DAS, kurios pajėgumas 6,24 mln. m³/parą, taip pat dujų tiekimas užtikrinamas iš suskystintų gamtinių dujų terminalo, kurio maksimalus pajėgumas yra 3 000 mln. m³ dujų per metus. Modelyje daroma prielaida, kad gamtinių dujų magistralinio dujotiekio sistema yra artima Lietuvos gamtinių dujų tiekimo sistemos struktūrai (1 pav.), o dujų perdavimas vamzdynais yra dvikryptis.



1 pav. Lietuvos gamtinių dujų perdavimo sistemos schema ir duomenys (Amber Grid, 2014)

Naftos produktų tiekimo sistema

Baziniam energtikos sistemų infrastruktūros modelyje naftos produktų tiekimo sistema nėra analizuojama, o priimama prielaida, kad naftos produktų (mazuto) tiekimas yra patikimas. Mazutas naudojamas kaip alternatyvus rezervinis kuras, kuris sandėliuojamas termofikacinėse ir šiluminėse elektrinėse. Daroma prielaida, kad Kauno TE yra įrengtas mazuto ūkis su 60 000 m³ bendros talpos metalinėmis talpyklomis ir sumontuotos dar dvi metalinės, kiekviena po 30 000 m³ talpos, talpyklos. Vilniaus TE2 įrengtas mazuto ūkis su 26 000 t mazuto talpyklomis, Vilniaus TE3 įrengtas mazuto ūkis su keturiomis talpyklomis po 20 000 t. Mažeikių elektrinei mazuto tiekimas užtikrinamas, ir yra dvi po 5 000 m³ ir 2 000 m³ mazuto talpyklos. Lietuvos elektrinėje mazutui saugoti įrengta keliolika 5 000–9 300 m³ talpos metalinių ir gelžbetoninių talpyklų. Petrašiūnų elektrinėje įrengtas mazuto ūkis su 6 000 m³ bendros talpos talpyklomis.

Bazinio energtikos sistemų modelio vartotojų energijos poreikiai

Infrastruktūros elementų kritiškumas vertinamas pagal galutinių energijos vartotojų poreikių užtikrinimą. Baziniame energtikos sistemų modelyje naudojami vartotojų energijos poreikiai pagrįsti 2010 m. duomenimis. Naudojami šiluminės energijos poreikiai per metus: Kaunas (1696,7 tūkst. MWh) (Kauno Energija, 2014), Vilnius (3063,3 tūkst. MWh) (Vilniaus Energija, 2014), Klaipėda (1086,87 tūkst. MWh) (Klaipėdos Energija, 2014), Šiauliai (556,3 tūkst. MWh) (Šiaulių Energija, 2014), Panevėžys (850,2 tūkst. MWh) (Panevėžio Energija, 2014), Mažeikiai (180 tūkst. MWh) (Mažeikių Šilumos Tinklai, 2014). Bendras elektros energijos poreikis yra 9637,21 tūkst. MWh (Lietuvos Respublikos energtikos ministerija, 2011).

Priedas Nr. 2. Kritinių energtikos sistemų infrastruktūros tyrimo rezultatai

3 lentelė. Didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos Miesto B CŠT sistemos vartotojams

Po 1 elementą		Po 2 elementus			Po 3 elementus							
c^k	z^k	$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j
0	0	0,474	1	24	0,63	1	64	99	0,581	1	27	99
		0,474	1	25	0,63	40	83	99	0,581	1	28	99
		0,474	1	26	0,63	40	86	99	0,581	1	29	99
		0,474	1	27	0,583	40	83	102	0,581	1	91	99
		0,474	1	28	0,583	40	86	102	0,581	1	99	106
		0,474	1	29	0,581	1	9	99	0,564	1	9	102
		0,474	1	64	0,581	1	12	99	0,564	1	22	102
		0,474	40	83	0,581	1	22	99	0,564	1	23	102
		0,474	40	86	0,581	1	23	99	0,564	1	24	102
		0,271	39	102	0,581	1	24	99	0,564	1	25	102
		0,228	30	37	0,581	1	25	99	0,564	1	26	102
		0,228	30	38	0,581	1	26	99	0,564	1	27	102

4 lentelė. Didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos Miesto C ČŠT sistemos vartotojams

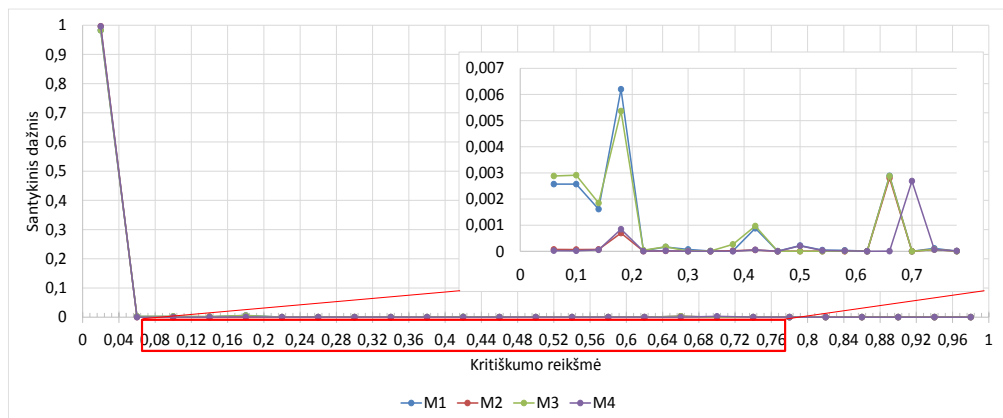
Po 1 elementą		Po 2 elementus			Po 3 elementus			
c^k	z^k	$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j
0,016	63	0,544	1	64	0,858	1	64	142
		0,544	37	64	0,858	37	64	142
		0,544	38	64	0,858	38	64	142
		0,544	39	64	0,858	39	64	142
		0,544	62	63	0,858	62	63	142
		0,513	63	108	0,832	63	108	142
		0,274	9	23	0,671	1	64	105
		0,270	63	142	0,671	37	64	105
		0,175	1	99	0,671	38	64	105
		0,175	1	102	0,671	39	64	105
		0,046	63	109	0,671	62	63	105
		0,029	63	105	0,659	1	63	64
		0,019	63	107	0,659	37	63	64
		0,018	63	106	0,659	38	63	64
		0,016	1	63	0,659	39	63	64
		0,016	2	63	0,643	63	105	108
		0,016	3	63	0,627	63	106	108
		0,016	4	63	0,606	9	23	142
		0,016	5	63	0,606	1	64	106
		0,016	6	63	0,606	9	23	106

5 lentelė. Didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos Miesto D ČŠT sistemos vartotojams

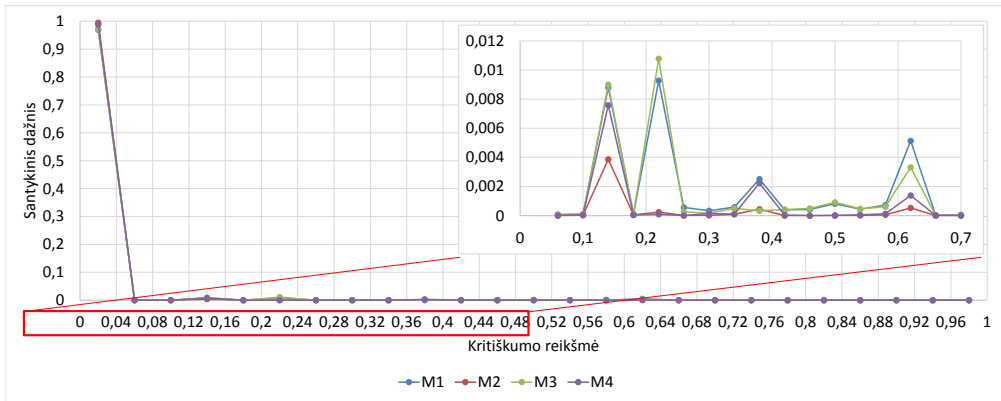
Po 1 elementą		Po 2 elementus			Po 3 elementus			
c^k	z^k	$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j
0	0	0,161	59	110	0,858	1	64	142
		0,161	1	24	0,858	37	64	142
		0,161	1	25	0,858	38	64	142
		0,161	1	26	0,858	39	64	142
		0,161	1	27	0,858	62	63	142
		0,161	1	28	0,832	63	108	142
		0,161	1	29	0,671	1	64	105
		0,161	1	64	0,671	37	64	105
		0,161	1	99	0,671	38	64	105
		0,161	1	102	0,671	39	64	105
		0,034	60	110	0,671	62	63	105
		0,034	110	111	0,659	1	63	64
					0,659	37	63	64
					0,659	38	63	64
					0,659	39	63	64
					0,643	63	105	108
					0,627	63	106	108
					0,606	9	23	142
					0,606	1	64	106
					0,606	9	23	106

6 lentelė. Didžiausią kritiškumą turinčios elementų kombinacijos Miesto F CŠT sistemos vartotojams

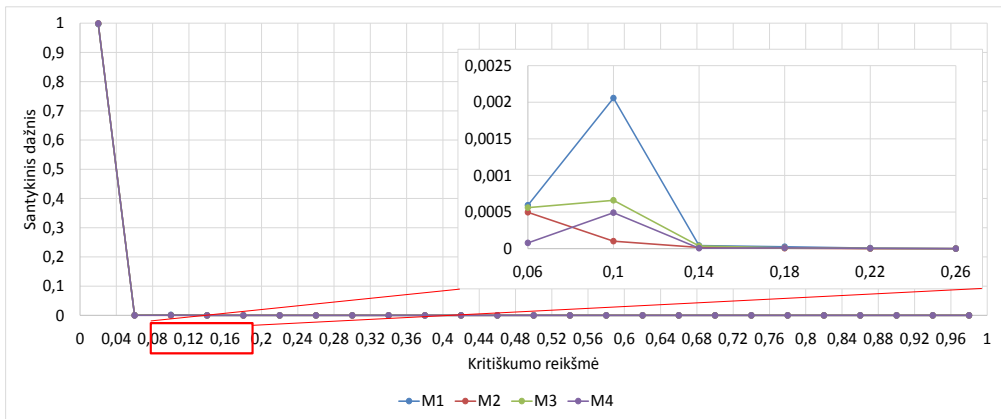
Po 1 elementą		Po 2 elementus			Po 3 elementus			
c^k	z^k	$c^{k,l}$	z^k	z^l	$c^{k,l,j}$	z^k	z^l	z^j
0	0	0,691	1	24	0,817	1	24	155
		0,691	1	25	0,817	1	25	155
		0,691	1	26	0,817	1	26	155
		0,691	1	27	0,817	1	27	155
		0,691	1	28	0,817	1	28	155
		0,691	1	29	0,817	1	29	155
		0,691	1	64	0,817	1	64	155
		0,691	45	48	0,817	45	48	155
		0,691	45	49	0,817	45	49	155
		0,691	46	49	0,817	46	49	155
		0,273	45	123	0,779	1	24	154
		0,273	46	123	0,779	1	25	154
		0,166	1	99	0,779	1	26	154
		0,166	1	102	0,779	1	27	154
					0,779	1	28	154
					0,779	1	29	154
					0,779	1	64	154
					0,779	45	48	154
					0,779	45	49	154
					0,779	46	49	154



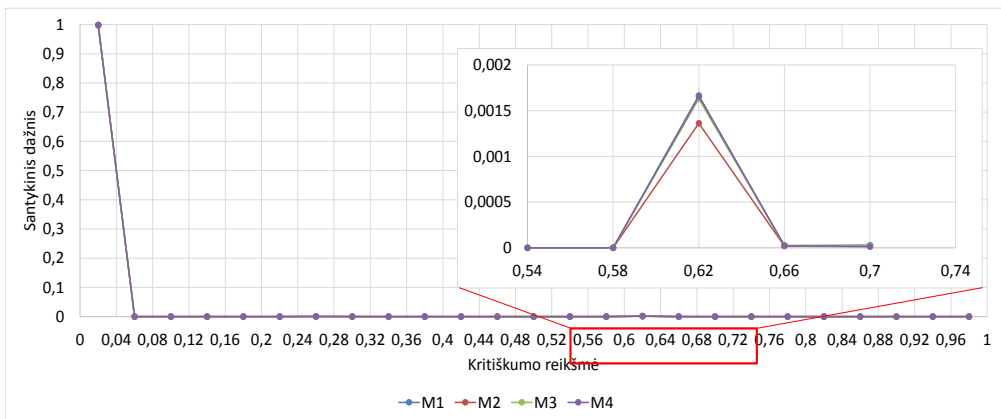
2 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų kritiškumo Miesto B CŠT sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas



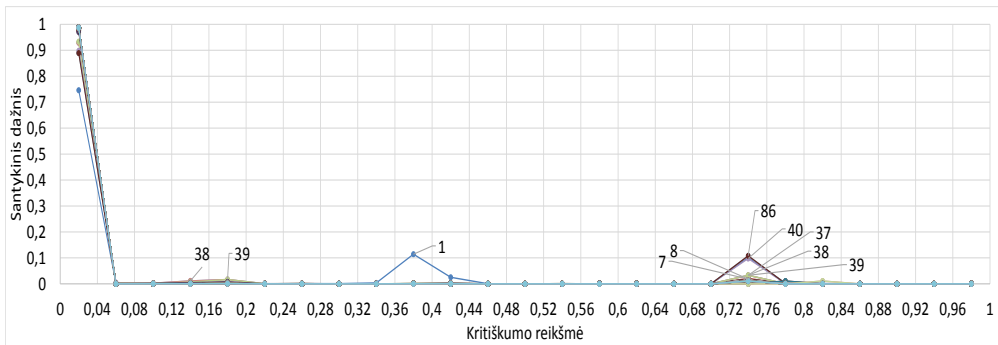
3 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų kritiškumo Miesto C CŠT sistemai santykinių dažnių pasiskirstymas



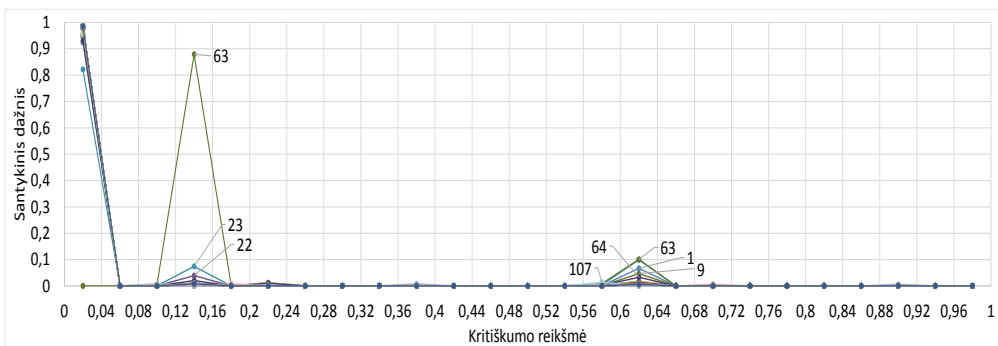
4 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų kritiškumo Miesto D CŠT sistemai santykinių dažnių pasiskirstymas



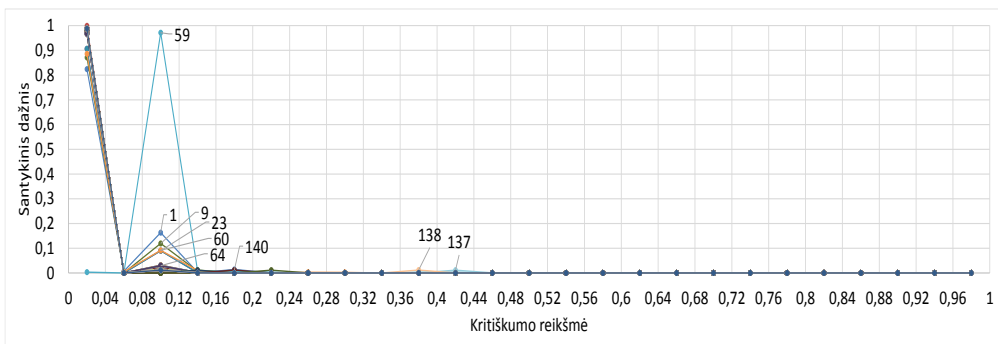
5 pav. Energetikos sistemų infrastruktūros modifikacijų kritiškumo Miesto F CŠT sistemai santykinių dažnių pasiskirstymas



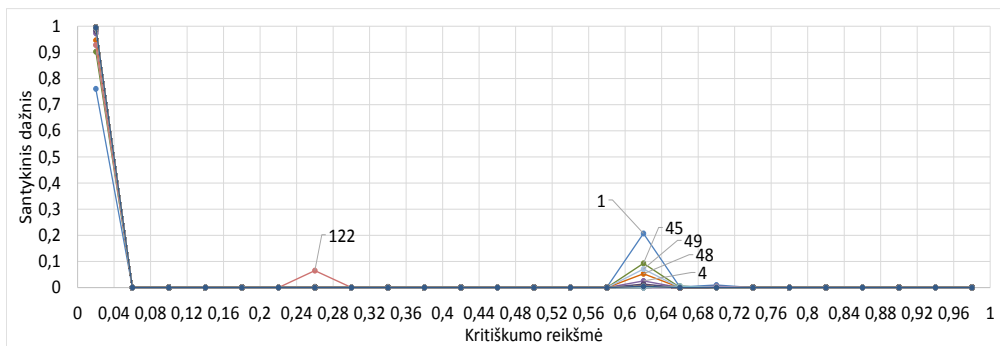
6 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo Miesto B CŠT sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas



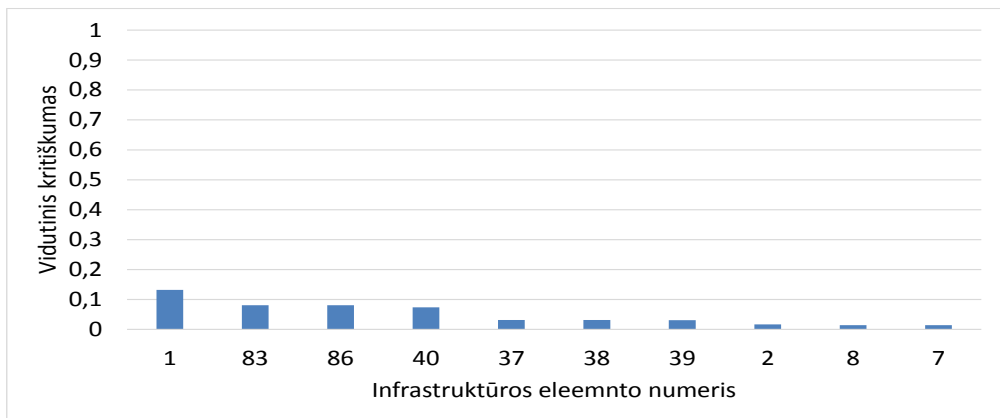
7 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo Miesto C CŠT sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas



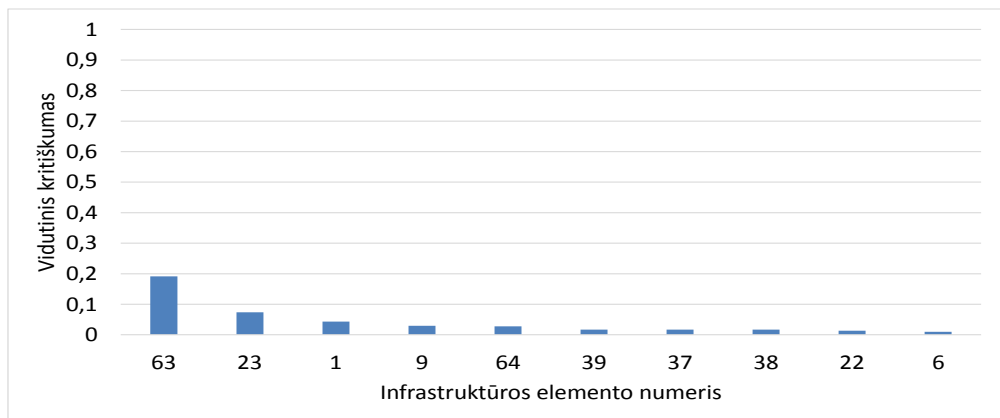
8 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo Miesto D CŠT sistemai santykinų dažnių pasiskirstymas



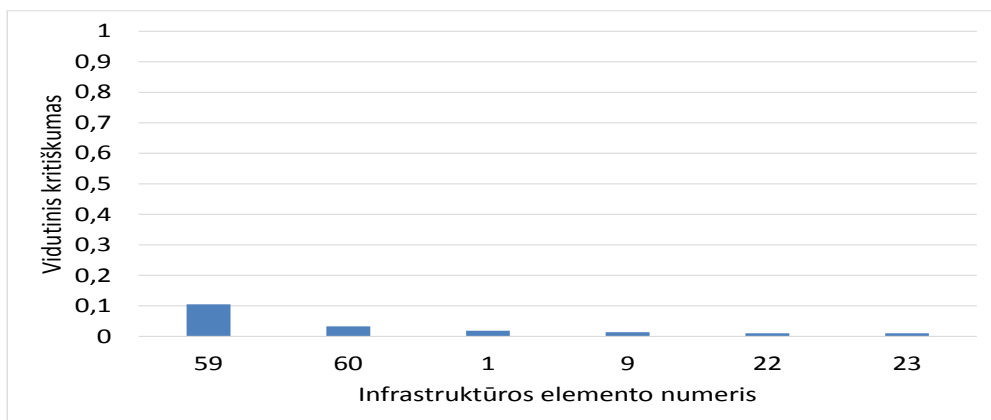
9 pav. Infrastruktūros elementų kritiškumo Miesto F CŠT sistemai santykinių dažnių pasiskirstymas



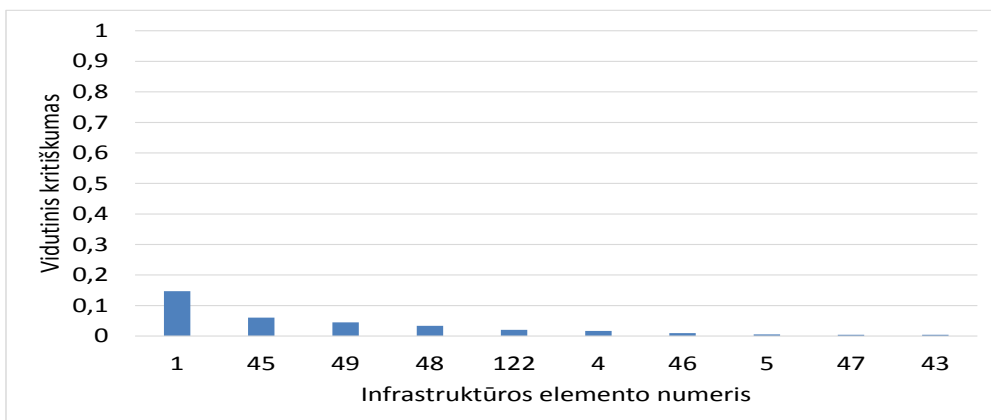
10 pav. Didžiausią vidutinį kritiškumą Miesto B CŠT sistemai turintys infrastruktūros elementai



11 pav. Didžiausią vidutinį kritiškumą Miesto C CŠT sistemai turintys infrastruktūros elementai



12 pav. Didžiausią vidutinį kritiškumą Miesto D CŠT sistemai turintys infrastruktūros elementai



13 pav. Didžiausią vidutinį kritiškumą Miesto F CŠT sistemai turintys infrastruktūros elementai

PRIEDO LITERATŪRA

- AMBER GRID, Lietuvos gamtinių dujų perdavimo sistemos operatorius. [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.ambergrid.lt/>
- KAUNO ENERGIJA, Centralizuotas šilumos tiekimas Kauno miesto ir rajono bei Jurbarko miesto vartotojams. [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.kaunoenergija.lt/>
- KLAIPĖDOS ENERGIJA, Centralizuotas šilumos teikimas Klaipėdos miestui. [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.klenergija.lt>
- LIETUVOS ENERGETIKA, Lietuvos energetikos instituto kasmetinis leidinys 2001-2012, ISSN 1822-5268. [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.lei.lt/main.php?m=141&k=1>
- LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA, Tiekimo saugumas Lietuvos elektros energijos rinkoje monitoringo ataskaita. [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.enmin.lt/lt/>

- LIETUVOS RESPUBLIKOS ELEKTROS ENERGETIKOS ĮSTATYMAS, 2000. m. liepos 20 d. Nr. VIII-1881, Vilnius (nauja įstatymo redakcija nuo 2012 m. sausio 17 d. Nr. XI-1919).
- LŠTA, Lietuvos šilumos teikėjų asociacija. 2014 [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.lsta.lt/>
- MAŽEIKIŲ ŠILUMOS TINKLAI, Centralizuotas šilumos teikimas Mažeikių miestui. [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://mst.lt/>
- PANEVĖŽIO ENERGIJA, Centralizuotas šilumos teikimas Panevėžio, Pasvalio, Kupiškio, Zarasų miestams. [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.pe.lt/lt>
- ŠIAULIŲ ENERGIJA, Centralizuotas šilumos teikimas Šiaulių miestui. [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.siaulenerg.lt/>
- VILNIAUS ENERGIJA, Centralizuotas šilumos teikimas Vilniaus mieste, Grigiškėse, Salininkuose ir Trakų Vokėje. [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014-08-29]. Prieiga internete: <http://www.vilniaus-energija.lt/>