

# Tikimybinis energetinio saugumo vertinimas. Kauno šilumos tiekimo rinkos analizė

**Juozas Augutis,**

**Vaida Matuzienė**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Breslaujos g. 3, LT-44403, Kaunas  
El. paštas: juozas@mail.lei.lt;  
vaida@mail.lei.lt.*

Straipsnio tikslas yra pristatyti sukurtą tikimybinę energetinio saugumo metodiką, kuri leidžia analizuoti įvairių rizikų (techninių, ekonominių, socio-politinių) pasekmių įtaką energetiniam saugumui.

Pateikta metodika yra dviejų dalių: trikdžio formavimosi iš grėsmės modelis ir sutrikdytos energetikos sistemos vystymosi modelis.

Skaičiavimai atliekami remiantis tikimybinės saugos analizės metodais.

Straipsnyje pateiktas bendras energetikos sistemos modelis, paaiškinti jo koncepcijos elementai (grėsmės realizacija, trikdys, barjeras, pasekmė), įvesti energetikos sistemos pasekmių po grėsmės realizacijos vertinimo rodikliai.

Sukurtos metodikos demonstracijai pasirinkta AB „Kauno energija“. Išnagrinėti keli hipotetiniai sistemos plėtros scenarijai esant vienam trikdžiui – visiškai nutraukus dujų tiekimą. Scenarijai apima įvairius šilumos gamybos būdus – tiek Kauno termofikacinės elektrinės rekonstrukciją, tiek ir biokuro katilinių statybą. Naudojantis sukurta technologija, įvairūs Kauno šilumos tiekimo plėtros scenarijai palyginti tarpusavyje, parodytas laisvos šilumos gamybos rinkos privalumas.

**Raktažodžiai:** energetika, energetinis saugumas, tikimybinė analizė

## ĮVADAS

Tikimybinio energetinio saugumo tyrimo tikslas yra pateikti metodiką, kuri įvertintų įvairių rizikų (techninių, ekonominių, socio-politinių) įtaką stabiliam energijos tiekimui priimtinomis kainomis ir atlikti šių rizikų potencialiai keliamų pasekmių analizę. Vertinant energijos tiekimo saugumą ilgu laikotarpiu, analizuojama naujų energetikos infrastruktūrų įtaka energetikos sistemos funkcionavimui, alternatyvių energijos gamybos ir tiekimo šaltinių panaudojimo galimybės. Be to, pastaruoju metu viena aktualiausių energetikos temų – jos plėtra. Šia tematika diskutuoja tiek mokslininkai, tiek energetikai, politikai ir politologai. Priimant sprendimus, reikalinga įvertinti skirtingas aplinkas: technologines, ekonomines, socio-politines, geopolitines; atsižvelgti į kylančias grėsmes, jų galimus sukelti trikdžius, pasekmes.

## ENERGETINIO SAUGUMO METODŲ APŽVALGA

Literatūros šaltiniuose pateikiamos energetinio saugumo studijos dažniausiai vertina tam tikrus energetinio saugumo aspektus: kuro šaltinių diversifikaciją [1], ekonominių kaštų analizę [2], politinių-politologinių grėsmių tyrimus [3, 4], įvairių indikatorių sistemų sudarymą [5–7]. Tikimybiniai metodai vertinant energetinį saugumą iki šiol nėra plačiai taikomi. Tikimybinų metodų taikymo pradžia yra siejama su darbu, kuriame buvo atliktas įvairių energijos rūšių palyginimas [8].

Nors skelbiamų energetinio saugumo analizės studijų daugėja, kol kas nėra visus galimus trikdžius bei jų įtaką energetikos sistemai vertinančios metodikos.

Šiame metodologiniame darbe energetiniam saugumui tirti siūloma taikyti tikimybinę rizikos analizę (TRA, angl.

*Probabilistic Risk Assessment*). Tai vienas iš metodų, dažniausiai naudojamų atliekant sudėtingų techninių sistemų rizikos vertinimą. Pirmą kartą išsami tikimybinė rizikos analizė buvo atlikta 1975 m. JAV ir žinoma kaip reaktorių saugos studija [9]. Nuo šios pradinės studijos, TRA metodai buvo gerokai patobulinti ir TRA tapo standartine branduolinių reaktorių ir kitų sudėtingų techninių sistemų saugos vertinimo priemone.

Naudojama kartu su kitais deterministiniais modeliais, ši analizė gali įvertinti didelį kiekį įvairių energetikos sistemos avarių scenarijų ir jų pasekmių. Labai svarbu įvertinti ilgalaikių trikdžių sukeltų sunkių pasekmių šalies energetiniam saugumui tikėtinumą. Taip pat svarbu palyginti sunkių pasekmių tikėtinumą, įgyvendinus įvairias planuojamas energetinio saugumo priemones.

Darbe pateikti Kauno aprūpinimo šiluma sistemos plėtros scenarijai parodo metodikos galimybes, palyginti įvairūs energetinio saugumo scenarijai, įvertinta laisvosios rinkos įtaka energetiniam saugumui.

### TIKIMYBINIO ENERGETINIO SAUGUMO VERTINIMO ANALIZĖ

Energetinio saugumo sąvoka turi labai daug apibrėžimų:

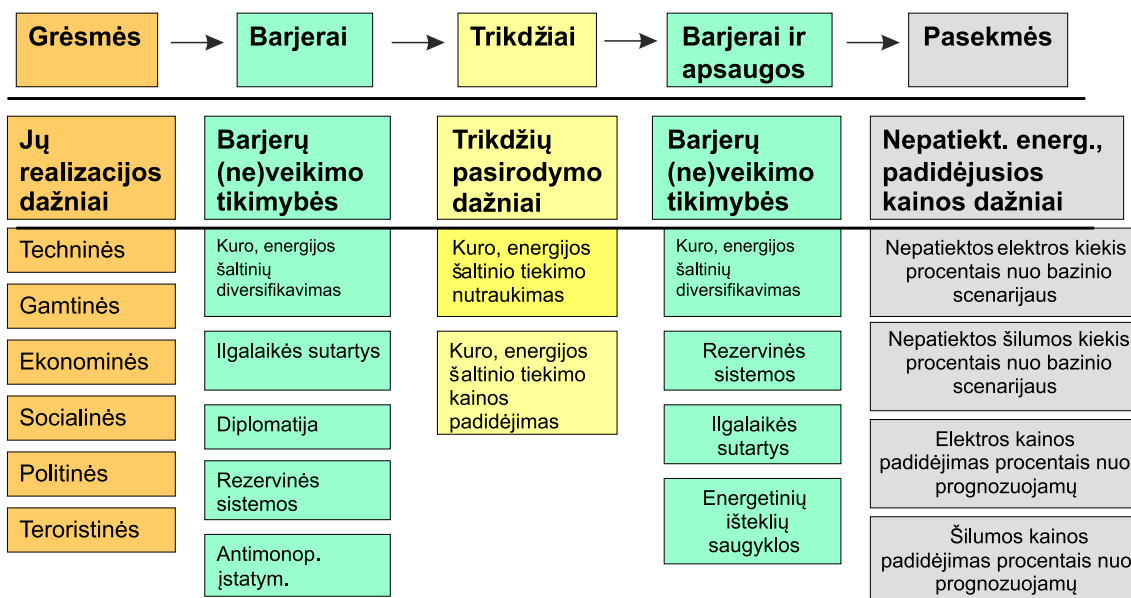
- tai galimybė naudotis energija įvairiomis jos formomis bet kuriuo metu ir pakankamais kiekiais bei priimtinais kainomis (*Tarptautinė energetikos agentūra*);
- energetikos sistemų patikimumas, užtikrinantis ekonomikos augimą ir energijos šaltinių tiekimo stabilumą (*Pasaulio energetikos taryba*);
- šalies energetinė nepriklausomybė ir galimybė dalyvauti energijos rinkose, bendra išorinės energetikos politika (*Europos Komisijos „Žalioji knyga“*).

Energetinio saugumo sąvokos apibrėžimuose išskiriamas energijos tiekimo užtikrinimas nepadidėjusiomis (atitinkančiomis natūralų ekonomikos augimą) kainomis. Galutinės energijos netiekimas ir / ar jos kainos padidėjimas yra energetinio nesaugumo rodikliai.

Pristatomos energetinio saugumo tikimybinės vertinimo metodikos pagrindą sudaro galimų grėsmių energetiniam saugumui vertinimo ir galimų sutrikimų tikimybinio vertinimo modeliai, kai iš grėsmių realizacijos susiformuoja trikdžiai, o iš jų – galutinės būsenos / pasekmės (apsirūpinimo energijos išteklių patikimumas už normalią arba padidėjusią kainą). Normalia kaina laikoma vidutinė esama arba prognozuojama modeliuojamo laikotarpio kaina. Tikimybinė energetinio saugumo analizės schema pateikiama 1 pav.

Pagrindinius energetinio saugumo analizės etapus sudaro:

- grėsmių identifikavimas, kai nustatomos grėsmės ir pavojingi įvykiai, galintys sukelti kuro tiekimo sutrikimus ar tam tikros pirminės energijos rūšies kainos padidėjimą;
- prevenciniai barjerai, t. y. techninių ir organizacinių priemonių, mažinančių grėsmių realizacijos poveikį, nustatymas ir jų patikimumo vertinimas;
- trikdžiai (nutrukęs kuro ar energijos tiekimas, padidėjusi kaina), kylantys dėl grėsmių realizacijos, jų modeliavimas ir analizė;
- saugos barjerai, t. y. nustatomos šalies ar regiono aprūpinimo energija alternatyvos, įvertinami turimi rezervai ir jų patikimumo analizė;
- sutrikdytos energetikos sistemos modeliavimas ir jų pasekmių analizė. Analizuojami avariniai scenarijai, kai kuro tiekimo nutraukimas reikalauja alternatyvaus aprūpinimo pirmine energija ar / ir rezervinių jėgainių įsijungi-



1 pav. Tikimybinė energetinio saugumo analizės schema

mo į galutinės energijos gamybą arba papildomą galutinės energijos importą. Analizė atliekama naudojant vieną iš TRA technologijų (atskiras Markovo metodų atvejis), kai modeliuojami galimų įvykių bei gedimų medžiai. Šiame etape įvertinami energijos netiekimo bei kylančios kainos dažniai.

Modelio įvykių medžiai yra dviejų tipų. Pirmojo tipo medžiai skirti formuluoti scenarijams, kai numatomos grėsmių pasekmės: energetikos sistemos trikdžiai – kuro / energijos šaltinio tiekimo nutraukimas ar kainos padidėjimas. Antroji įvykių medžių grupė skirta modeliuoti sutrikdytos energetikos sistemos scenarijų, kur nagrinėjama jau trikdžiais paveiktos energetikos sistemos energijos gamyba naudojant alternatyvius kuro variantus.

Prieš sudarant modelį reikia išnagrinėti bendrus energetikos sistemoje vykstančius procesus bei egzistuojančias priklausomybes ir numatytus saugos barjerus. Įvykus pradiniam sistemos trikdžiui, susidaro visa įvykių grandinė, kurioje ypač svarbų vaidmenį vaidina įvairūs prevenciniai ir saugos barjerai: alternatyvusis kuras, saugyklos ir pan.

Pirmiausia aptarsime elementus, darančius įtaką energetiniam saugumui.

Grėsmės realizacija – tai pradinis bet kokios prigimties (techninės, teroristinės, gamtinės, socio-politinės, ekonominės) įvykis, potencialiai galintis sutrikdyti energetikos sistemos ar jos dalies funkcionavimą ir sukelti nepageidaujamų pasekmių. Tai gali būti avarijos dėl techninių, teroristinių ar gamtinių priežasčių, neigiama monopolijų veikla, politiniai įvykiai, veikiantys į šalį tiekiamą kuro ar energijos importą ir t. t.

Prevencinis barjeras – tai organizacinis (priklausomai nuo grėsmės realizacijos pobūdžio: techninis, socio-politinis, ekonominis) veiksmas, galintis sumažinti ar visiškai

panaikinti grėsmės realizacijos keliamą riziką. Pvz., prevenciniai barjerai (esant ilgalaikiai techninei avarijai) gali būti laikinos tiekimo linijos ar rezervinės tiekimo alternatyvos, politinius ar ekonominius sprendimus gali paveikti įvairūs įstatymai, sutartys, diplomatiniai veiksmai.

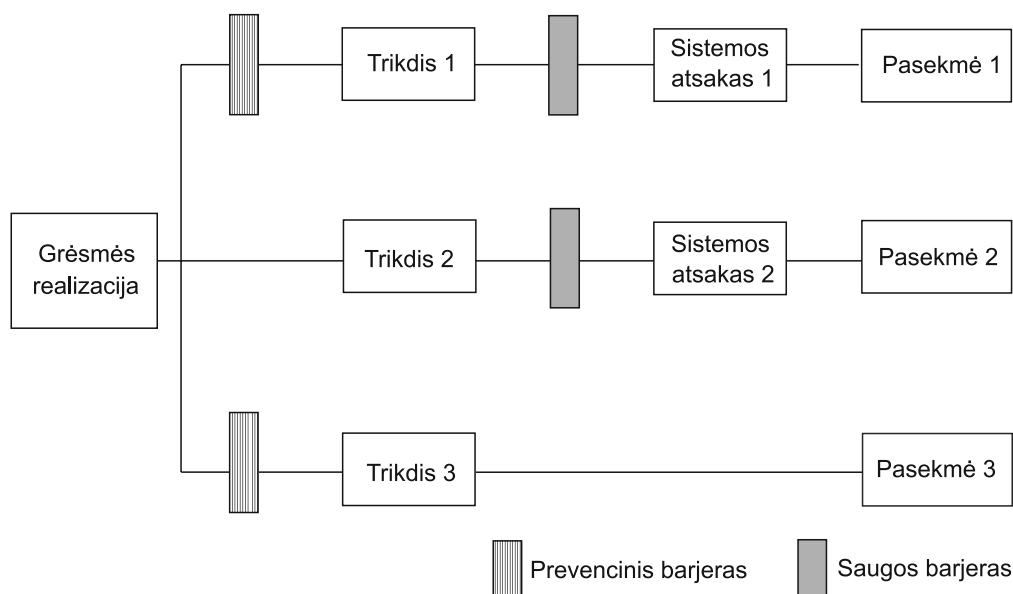
Energetikos sistemos trikdžiai – tai po grėsmės realizacijos susiformavę energetikos sistemos pokyčiai, turintys įtakos šalies ar regiono energetiniam saugumui. Dažniausiai tai yra visiškas arba iš dalies kuro ar pirminės energijos tiekimo nutraukimas, akivaizdžiai padidėjusi kaina. Šiame darbe nagrinėjami ilgalaikiai energetikos sistemos plėtrai įtakos turintys trikdžiai.

Saugos barjeras – tai techninių ar/ir organizacinių priemonių visuma, padedanti sumažinti ar visiškai panaikinti trikdžio keliamą žalingą poveikį sistemai. Saugos barjerai padeda užtikrinti alternatyvų aprūpinimą energija. Tai energijos gamyba rezerviniu kuru ar/ir rezervinėse jėgainėse, energijos importas ir pan.

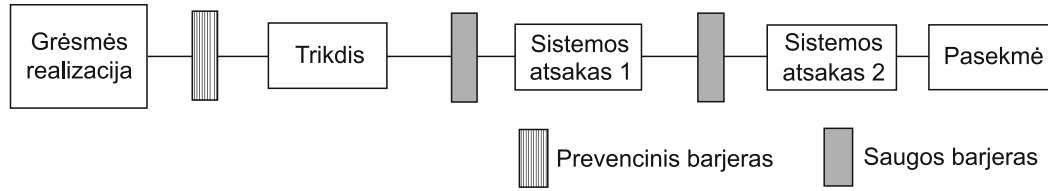
Nepriimtinos pasekmės – tai galutinės energijos tiekimo sutrikimas ir / ar gerokai padidėjusi tiekiamos energijos kaina, palyginti su prognozuojama kaina (%). Šiame darbe nenagrinėjama žala dėl šių pasekmių.

Tarkime, kad turime  $n$  grėsmių realizacijų, kurios sudaro aibę  $\{G\} = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ . Panagrinėkime atskirą  $i$ -os grėsmės realizaciją  $g_i$  (2 pav.). Ši grėsmės realizacija gali sukelti įvairių sistemos trikdžių, tačiau trikdžių nulemtos pasekmės ir jų dydis didžia dalimi priklauso nuo egzistuojančių prevencinių ir saugos barjerų.

Esant grėsmės realizacijai, prevencinio barjero tikslas yra užtikrinti, kad sistemos trikdžiai nebūtų sukeltas ir nebūs nepageidaujamų pasekmių. Jei prevencinis barjeras negali neutralizuoti grėsmės – kyla trikdžiai, kurie energetikos sistemoje gali sukelti kritinių įvykių eigą, galinčią baigtis



2 pav. Įvykių eiga dėl grėsmės realizacijos



3 pav. Grėsmės realizacijos iniciuota įvykių eiga

nepageidaujamomis pasekmėmis. Tolimesnė įvykių eiga priklauso nuo energetikos sistemoje numatytų saugos barjerų.

Kiekvieną galimą įvykių eigą pavadinkime trikdžio vystymosi ar pasekmės formavimosi (priklausomai nuo įvykių medžio tipo) scenarijumi. Jei daroma prielaida, kad dėl sėkmingos prevencijos ar suveikus saugos barjerui energetikos sistemoje kilę trikdžiai ar kritiniai įvykiai visiškai neutralizuojami, tuomet avarinis scenarijus baigiasi be pasekmių.

Siekiant kiekybiškai įvertinti bendrą grėsmių realizacijų keliamą riziką, būtina nagrinėti atskirus avarijų scenarijus (3 pav.).

Tarkime, kad turime galimų avarinių scenarijų aibę  $\{S\} = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ . Kiekvieną scenarijų sudaro tam tikri įvykiai, kurie gali būti dviejų būsenų: įvykis įvyko arba neįvyko. Tuomet  $i$ -ąjį scenarijų galime aprašyti lygtimi:

$$s_i = F \wedge \bar{G}; \tag{1}$$

čia  $F$  yra funkcija, aprašanti sėkmingai veikiančias saugos sistemas (barjerus), t. y. sėkmingai įvykusių įvykių loginė sandauga:

$$F = f_1 \wedge f_2 \wedge \dots \wedge f_k = \bigcap_{i=1}^k f_i; \tag{2}$$

$\bar{G}$  charakterizuoja nesėkmingai veikiančias saugos sistemas, t. y. neįvykusių įvykių loginė suma:

$$\bar{G} = \bar{g}_1 \wedge \bar{g}_2 \wedge \dots \wedge \bar{g}_n = \overline{g_1 \vee g_2 \vee \dots \vee g_n}. \tag{3}$$

Eigos scenarijaus tikimybė su sąlyga, kad grėsmė įvyko, išreiškiama lygtimi:

$$P(S|I) = P(F \wedge \bar{G}) = P(F)P(\bar{G}) = P(F)(1 - P(G)). \tag{4}$$

Tuo atveju, jei energetikos sistemoje nėra numatyta saugos barjerų:

$$\{F\} = \{G\} = \{\} \text{ ir } P(S|I) = 1. \tag{5}$$

2 pav. parodyta, kad po grėsmės realizacijos galimi įvairūs įvykių scenarijai. Tačiau reikia pastebėti, kad visi scenarijai yra tarpusavyje nesuderinami:

$$P(s_i \cap s_j) = 0, \forall i, j; i \neq j. \tag{6}$$

Turėdami atskirų eigų scenarijų tikimybes, galime įvertinti tikimybę, kad, realizavus grėsmę, vyks avarinis scenarijus su nepriimtinais pasekmėmis, t. y. šios tikimybės įvertinimui reikia nustatyti bet kurio eigos scenarijaus pasirodymo tikimybę. Pritaikius elementarius tikimybių teorijos dėsnius, gaunama ši išraiška:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n s_i\right) = \sum_{i=1}^n P(s_i) - \sum_{i < j} P(s_i \cap s_j) + \sum_{i < k < l} P(s_i \cap s_j \cap s_k) + \dots + (-1)^{n+1} P(s_1 \cap s_2 \cap \dots \cap s_n); \tag{7}$$

čia atskiro scenarijaus  $s_j$  sudaryto iš  $t$  įvykių  $E_1, E_2, \dots, E_t$  ir  $k$  neįvykusių įvykių, tikimybė  $P(s_j)$  apskaičiuojama remiantis (7) išraiška, t. y.:

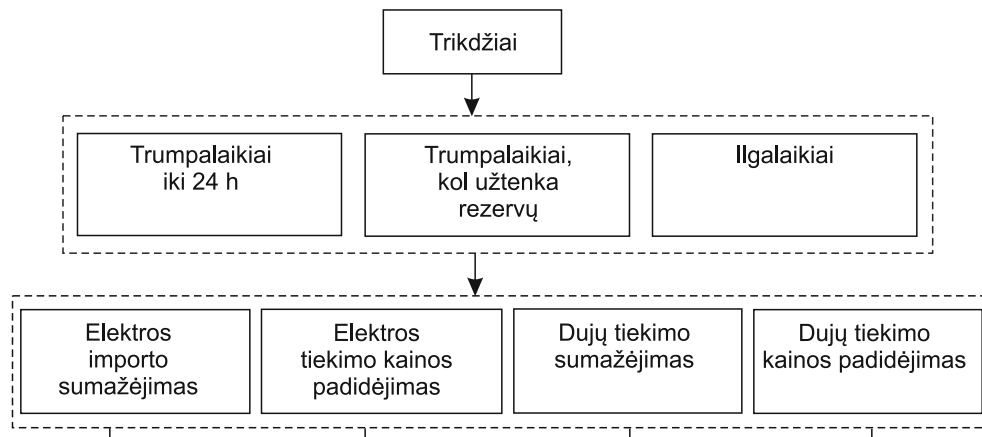
$$\begin{aligned} P(s_j) &= P(E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_t \cap \bar{U}_1 \cap \bar{U}_2 \cap \dots \cap \bar{U}_k) = \\ &= P(E_1)P(E_2) \dots P(E_t)P(\bar{U}_1)P(\bar{U}_2) \dots P(\bar{U}_k) = \\ &= P(E_1)P(E_2) \dots P(E_t)(1 - P(U_1))(1 - P(U_2)) \dots (1 - P(U_k)). \end{aligned} \tag{8}$$

Tokia tikimybių skaičiavimo metodika taikoma vertinant tiek trikdžių, tiek pasekmių tikėtinumą.

### ENERGETIKOS SISTEMOS TIKIMYBINIS SAUGUMO MODELIS

Pateiktą eigų pasekmių skaičiavimo technologiją perkelsime į energetikos sąvokas.

Energetikos sistemos grėsmės gali realizuotis kiekviename energetikos sektoriuje (naftos, dujų, elektros, atsinaujinančių išteklių ir kt.), tačiau šalies energetikos sistemoje labiausiai pavojingomis galima laikyti grėsmes, apimančias kurą ar energiją, kurie yra šalyje naudojami kaip pagrindiniai, o ne rezerviniai, ir sudaro didelę vartojimo balanso dalį. Taip pat labai pavojingais galima būtų laikyti mažai tikėtiną atvejį, kai sutrinkdomas dviejų alternatyvių pirminės energijos rūšių tiekimas. Grėsmių tikėtinumas ar dažniai – vienas iš rizikos matų. Siekiant įvertinti grėsmių realizavimosi tikimybę, būtina atsižvelgti į grėsmių šaltinių savybes (pvz., galimas gamtos stichijas ir jų padarinių riziką) bei motyvus (pvz., vienintelio gamtinių dujų tiekėjo interesus didinti dujų kainas importuojančioms valstybėms; nutraukti dujų tiekimą dėl politinių, o ne ekonominių motyvų).



4 pav. Energetikos sistemos trikdžių klasifikacija

Nuo tam tikro pirminės energijos ar kuro tiekimo ir didėjančių kainų saugo įvairaus pobūdžio barjerai. Tikimybiniėje analizėje jie vadinami funkciniais įvykiais. Barjerai, priklausomai nuo to, kuri grėsmė realizuojasi, gali būti: rezervinės tiekimo / gamybos sistemos; alternatyvaus tiekimo; laikinos linijos / vamzdynų; teisinės antimonopolinės; politinės šalies ar didesnio regiono priemonės.

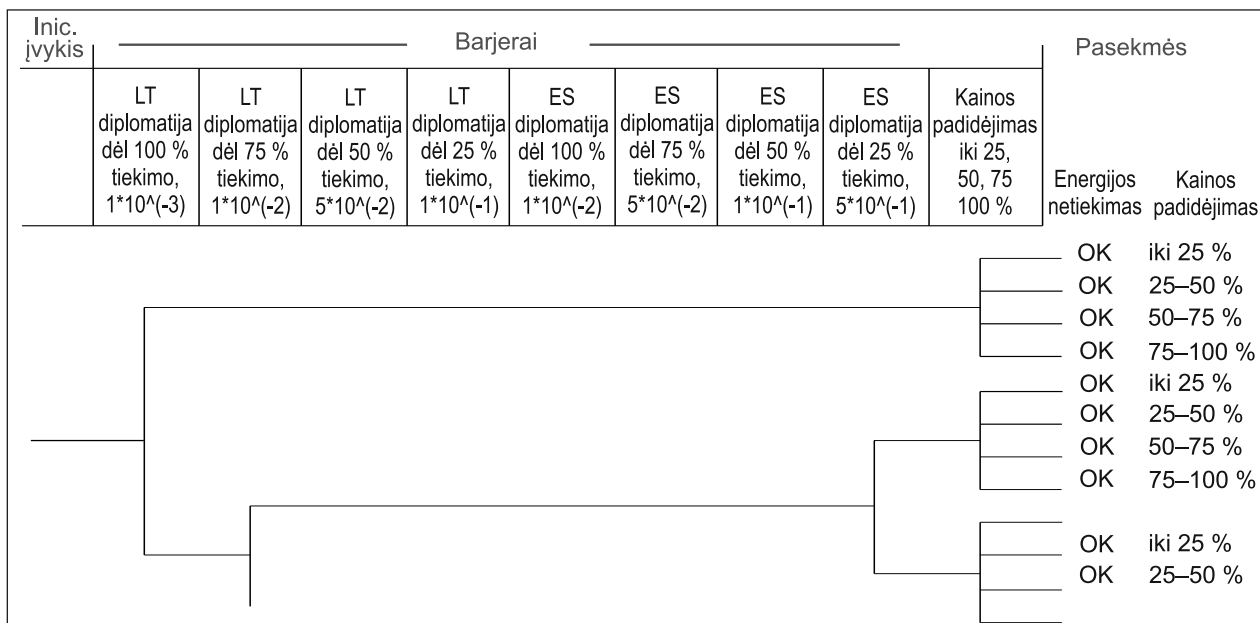
Iš grėsmių realizacijos susiformavę trikdžiai gali būti trumpalaikiai arba ilgalaikiai (4 pav.). Energetinio saugumo tyrimų objektas – ilgalaikiai trikdžiai. Todėl nagrinėjami trumpalaikiai trikdžiai, kurie tęsiasi ne trumpiau 24 val. ir trunka tol, kol užtenka nutraukto energijos šaltinio resursų (pagal įstatymus – 60–90 dienų), ir ilgalaikiai trikdžiai – tokie, kai resursai jau išnaudoti, tenka pasitelkti alternatyvaus kuro gamybą, papildomus gamybos pajėgumus. Trikdžiai gali būti skirtingo lygio: energijos netiekimo dydį tikslinga

numatyti tiksliau (modelyje jis numatomas kas 10 %), kainų padidėjimas gali būti apibrėžiamas grubiau (kas 25 %). 4 pav. parodyti galimi pagrindiniai Lietuvos energetikos sistemos trikdžiai.

5 pav. pateiktas Lietuvos įvykių medžio pavyzdys, kuriame modeliuojamas ilgalaikis 100 % dujų nutraukimas dėl geopolitinių priežasčių su šalimi tiekėja. Po inicijuojamo įvykio vienas po kito logine tvarka išdėliojami galimi prevenciniai barjerai (pvz., Lietuvos diplomatinės derybos dėl 100 % dujų tiekimo atstatymo), saugantys, kad nesiformuotų trikdžiai.

Taigi iš aptartų grėsmių realizacijos medžių gaunama įvykių ir gedimų trikdžių aibė ir tų trikdžių tikimybių skirstiniai.

Trikdžio paveiktos sistemos modelyje kaip saugos barjerai veikia galutinės energijos generatoriai, kurie įsijungia nevei-



5 pav. Įvykių medžio fragmentas, kuriame iš grėsmių formuojamas trikdis – ilgalaikis 100 % dujų nutraukimas dėl geopolitinių priežasčių su šalimi tiekėja

kiant pagrindinei sistemai, kai kuriems rezervinės sistemos generatoriams ar / ir kai nėra pagrindinio kuro, kai dėl įvairių priežasčių nepavyksta suorganizuoti rezervinės gamybos.

Rezervinės sistemos – energijos generatoriai, energijos išteklių saugyklos, perdavimo ir paskirstymo tinklai turi dirbti papildomomis apkrovomis. Todėl vertinant energijos generatorius reikalingos šios jų patikimumą apibrėžiančios tikimybės:

1) generatoriaus, gaminančio energiją, naudojant alternatyvų kurą (pvz., jeigu vietoj nuolatos naudojamų gamtinių dujų, gamybai reikia mazuto), nepasileidimo tikimybė dėl organizacinių priežasčių (netiekiamas / neparuoštas kuras, žmogaus klaidos ir t. t.);

2) generatoriaus gedimo tikimybė;

3) generatoriaus gamybos alternatyviu kuru nesėkmės tikimybė.

Atskirų TE blokų ar katilinių gedimo tikimybė labai padidėja jiems senstant – senesnių generatorių patikimumas gali sumažėti iki kelių kartų.

Didelė dalis jėgainių turi vienodą generatorių skaičių, todėl kai sėkmingam energijos tiekimui užtikrinti reika-

lingas tik tam tikras generatorių kiekis, skaičiuojamas jų patikimumo sėkmės kriterijus. Dar vienas barjerų įverčius patikslinantis metodas – tarpusavio priklausomybių analizė, naudojama alternatyvaus kuro tiekimui įvertinti.

Čia objekto veikimui charakterizuoti naudojamas fizinis objekto parengtumas ir objekto išteklių prieinamumas bei objektų tarpusavio ryšiai.

Dėl priklausomybių tarp energetikos sistemos pavojingų objektų ir jų resursų, tiekėjai koreguoja mazuto tiekimo lygį ir tikimybę.

Pagrindinės tiesioginės energetinio saugumo pasekmės (galutinės būsenos) yra įvairaus dydžio galutinės energijos netiekimas ar jos kainos padidėjimas (1 lentelė).

Atskiros pasekmių grupės gaunamos ilgalaikiams ir trumpalaikiams scenarijams. Itin retais atvejais trumpalaikis trikdys gali išprovokuoti ilgalaikes pasekmes.

Gaunami atitinkami galutinių būsenų skirstiniai. Tuomet gautų būsenų dažniai dauginami iš tiesinės pasekmių matricos (2 lentelė). Ši matrica pagal savo prigimtį galėtų būti logaritminė – didėjant energetiniam nesaugumui, pasekmės svoris didėja.

1 lentelė. Galutinių būsenų aibė

	Kainų padidėjimas nuo prognozuojamų kainų %					Vidutinis kainų padidėjimo dažnis
	0–25	26–50	51–75	76–100	101 ir daugiau	
OK						
1–10						
11–20						
21–30						
Nepateiktos šilumos energijos kiekis nuo bazinio scenarijaus %						
31–40						
41–50						
51–60						
61–70						
71–80						
81–90						
91–100						
Vidutinis šilumos tiekimo nutraukimų dažnis						

2 lentelė. Pasekmių svorių matrica

	0–25	26–50	51–75	76–100	101 ir daugiau	Energetinio saugumo koeficientas
OK	1	0,75	0,5	0,25	0	
1–10	0,9	0,675	0,45	0,225	0	
11–20	0,8	0,6	0,4	0,2	0	
21–30	0,7	0,525	0,35	0,175	0	
31–40	0,6	0,45	0,3	0,15	0	
41–50	0,5	0,375	0,25	0,125	0	
51–60	0,4	0,3	0,2	0,1	0	
61–70	0,3	0,225	0,15	0,075	0	
71–80	0,2	0,15	0,1	0,05	0	
81–90	0,1	0,075	0,05	0,025	0	
91–100	0	0	0	0	0	
						Σ

Susumavus gaunamas energetinio saugumo koeficientas, skirtas palyginti skirtingus scenarijus.

## METODIKOS PRITAIKYMO PAVYZDYS

Šiame skyriuje pateiktas anksčiau pristatytos metodikos pritaikymo pavyzdys – Kauno centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) sistemos plėtros scenarijų energetinio saugumo palyginimas. Tai hipotetiniai Kauno CŠT plėtros scenarijai.

Pagal energetiniam saugumui tirti sukurtą metodiką, pagrįstą energetinio saugumo analize, sudarytas Kauno CŠT sistemos modelis.

Skaičiavimai skirti nustatyti, kokią įtaką Kauno šilumos tiekimo sistemos energetiniam saugumui turi atsiradusi šilumos gamintojų rinka (gamyba sutelkta ne vienoje rankose), o ne įvertinti atskirus siūlomus techninius projektus.

Trikdžių susiformavimo modeliu vertintos bendros Lietuvos energetikos sistemos pavojingos grėsmės. Kainų padidėjimą arba/ir dujų tiekimo nutraukimą gali lemti šios grėsmės:

- dujų netiekimas ir/ar dėl Rusijos (tiekimo) arba Baltarusijos (tranzito) geopolitikos;

- dujų tiekimo nutraukimas ir/ar kainos padidėjimas dėl techninio gedimo dujų infrastruktūroje (importo ir/ar tiekimo linijų), dėl ekstremalių klimato sąlygų, dėl galimo terorizmo dujų tiekimo vamzdyne.

Grėsmės gali būti nukreiptos į dujų netiekimo trikdį ar kainų padidėjimo trikdžius. Šiame darbe nagrinėjamas 100 % dujų netiekimo trikdys.

Ateityje būtų galima atsižvelgti ir į grėsmes, lemiančias kainų didėjimą: nusidėvėję pastatai; taip pat aiškios, skaidrios, nuoseklios šilumos tiekimo politikos nebuvimas; atidėiojamas investavimo projektų įgyvendinimas.

Kaip parodyta bendroje modelio schemoje (1 pav.), Kauno tikimybinį modelį pirmiausia sudaro trikdžių susiformavimo modelis. Po grėsmių realizacijos susiformuoja trikdžiai. Vertinimas atliekamas tik dėl 1 trikdžio – ilgalaikio 100 % dujų tiekimo nutraukimo. Jis tampa inicijuojančiu įvykiu modeliuojant sutrikdytą Kauno CŠT sistemą.

Ilgalaikis scenarijus energetinio saugumo projektuose paprastai laikomas tokiu, kada gali būti įgyvendinti energetikos sistemos infrastruktūrų renovacijos/įdiegimo darbai, t. y. pastatomi ar atnaujinami katilai, saugyklos, tiekimo vamzdžiai ar linijos.

Minėtas trikdys suformuojamas iš labiausiai tikėtinų anksčiau aptartų grėsmių. Gautas jo nutraukimų dažnis per metus yra apie 1,07E-03.

Toliau modeliuojama sutrikdyta Kauno šilumos sistema. Energetinio saugumo požiūriu Kauno (kaip ir visos Lietuvos) CŠT sistema yra uždara:

- pagrindinis šilumos gamintojas yra KTE. Vadinasi, miesto šilumos gamyba yra vienos įmonės rankose;

- Kauno termofikacinės elektrinės (KTE) įrenginių ir pagrindinio kuro – dujų – tiekimas priklausomas nuo to paties savininko (UAB „Kauno termofikacijos elektrinė“ savininkas yra Rusijos dujų tiekimo bendrovė „Gazprom“).

Elektrinėje šilumą generuoja trys garo katilai po 290 MW, 4 vandens šildymo katilai po 116 MW, 209 MW katilas. Rezervinė yra Petrašiūnų elektrinė, Šilko, Pergalės ir Inkaro katilinės. Izoliuota šilumos tinklų zona yra išsidėsčiusi Aleksoto, Šančių, Panemunės bei Vilijampolės mikrorajonuose. Izoliuotame šilumos tiekimo tinkle pagaminama apie 8,2 % visos Kauno šilumos energijos. Čia šiluma tiekama iš nedidelės galios šilumos gamybos įrenginių.

Kauno CŠT sistemoje šiluma gaminama naudojant vieną kurą – dujas. Daugelio katilinių rezervinis kuras yra mazutas, jis yra kaupiamas ir tam tikras jo kiekis net laikomas paruoštas naudoti (specialioje talpoje, atitinkamos temperatūros ir t. t.).

Kauno miesto maksimalus šilumos poreikis šildymo sezono metu 2010 m. buvo 600 MW, 2011 m. – 520 MW. Tokio dydžio poreikio Kauno miestui gali pririesti tik iki kelių savaitių per metus (šilumos poreikis yra apie 350–370 MW). Scenarijai modeliuoti 500 MW šilumos poreikiui, kuris galimas atšiauriausiu žiemos sezonu. Todėl šie scenarijai yra sunkiai galimi.

Modeliuojamas laiko tarpas po 2016 m., kai įsigalios naujieji reikalavimai pagal Europos Parlamento ir Tarybos direktyvą 2010/75/ES dėl pramoninių išmetamų teršalų – TIPK (Taršos integruotos prevencijos ir kontrolės) [10]. Ši direktyva reglamentuoja teršalų normas iš didelių (ne mažesnių kaip 50 MW) kurą deginančių įrenginių. Numatomos ir išimtys iki 2023 m. tam tikras sąlygas tenkinančioms įgėgainėms. Pagal 2003 m. pasirašytą investicijų susitarimą su AB „Kauno energija“, įsipareigojusia nupirkti ne mažiau 80 % šilumos poreikio Kauno integruotame šilumos tiekimo tinkle, KTE privalo per 15 metų investuoti į gamybos šaltinių statymą ir atnaujinimą ne mažiau kaip 400 mln. Lt.

Palyginimui modeliuoti šie ilgalaikiai plėtros scenarijai esant vienam trikdžiui, t. y. visiškai nutraukus dujų tiekimą:

I scenarijus – KTE šilumos gamyba vyksta pagal 2010 m. instaliuotą galią, KTE nerekonstruota ir nepritaikyta 2016 m. įsigaliosiantiems taršos reikalavimams;

II scenarijus – KTE papildomai instaliuotas 250 MW biokuro katilas;

III scenarijus – KTE papildomai instaliuotas 200 MW biokuro katilas, LEZ – 200 MW atliekų deginimo/biokuro katilas, Petrašiūnų TE rekonstruota, instaliuotas 150 MW biokuro katilas (iš viso naujai instaliuota 550 MW). KTE lieka kaip rezervinė įgėgainė;

IV scenarijus – LEZ instaliuotas 200 MW atliekų deginimo/biokuro katilas, Petrašiūnų TE – 150 MW biokuro katilas. Ne KTE savininko nuosavybėje (Šilko, Pergalės arba

Inkaro katilinių teritorijoje) instaliuotas 100 MW dujų katilas bei du biokuro katilai po 50 MW (iš viso naujai instaliuota 550 MW). KTE lieka kaip rezervinė jėgainė.

Daroma prielaida, kad katilų gamybos naudingumas yra 0,9.

Visose jėgainėse numatytas atsarginis kuras: biokuro jėgainėse atsarginis yra kietasis kuras, dujų jėgainėse – mazutas.

Modelyje (vertinant gedimo tikėtinumą) atsižvelgiama į jėgainių amžių, gamybos nesėkmes dėl skirtingo kuro, tikimybinę gamybą organizuoti rezerviniu kuru (pvz., realiai gali būti, kad mazutas nėra paruoštas energijos gamybai ir pan.).

Vertinant kainų didėjimo tikėtinumą atsižvelgiama į tai, kiek įmonių gamina šilumą (konkurencijos ar monopolijos sąlygomis). Be to, jei jėgainės nebus rekonstruotos pagal ES 2016 m. direktyvos reikalavimus, dėl numatomų sankcijų ir kt. priežasčių yra didelė tikimybė, kad šilumos kaina po 2016 m. padidės daugiau nei 100 %.

I scenarijaus supaprastintas įvykių medžio fragmentas yra parodytas 6 pav. Jame vienas po kito išvardinti atskiri katilai, kurie galėtų dirbti, kai, nutraukus dujų tiekimą, ši-

lumos gamyba organizuojama pasitelkus mazutą. Šių katilų darbas vertinamas kaip galima gamybos alternatyva ir darbai jų jungiama tiek, kad patenkintų poreikį.

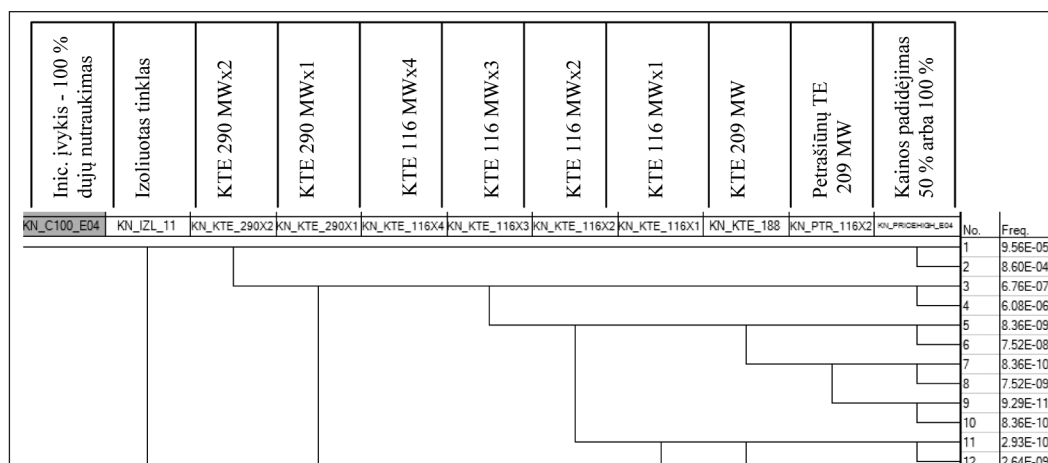
Galimos dvi kiekvienos įvykių eigos pasekmės su skirtingom tikimybėm, kurios nustatomos modeliu (pradiniai duomenys nustatomi statistiškai): Kauno šilumos netiekimo procentinė dalis ir kaina (6 pav. parodyti tik netiekimo pasekmių dažniai).

Pagal kiekvieną scenarijų gaunamos ilgalaikių galutinių būsenų dažnių per metus lentelės (skaičiuojama pagal 2010 m. duomenis; (8) formulė).

3 lentelėje pateikti rezultatai, gauti pagal I scenarijų. Dėl kylančių kainų modeliuojant išskirtos tik dvi kainų didėjimo būsenos: padidėja 26–50 % arba 51–100 %.

Palyginti su I scenarijumi, rinkos scenarijaus (IV) atveju gautos netiekimo ar kainos didėjimo tikimybės yra mažesnės (4 lentelė).

Tiek didesnės, tiek mažesnės apimties energijos tiekimo nutraukimai mažiau tikėtini naujose jėgainėse (7 pav.). Taip pat galima pastebėti, kad tiekimo nutraukimų kreivės kinta laipsniškai: iš pradžių staigiai krenta, o po to – pamažu.



6 pav. I scenarijaus supaprastintas įvykių medžio fragmentas

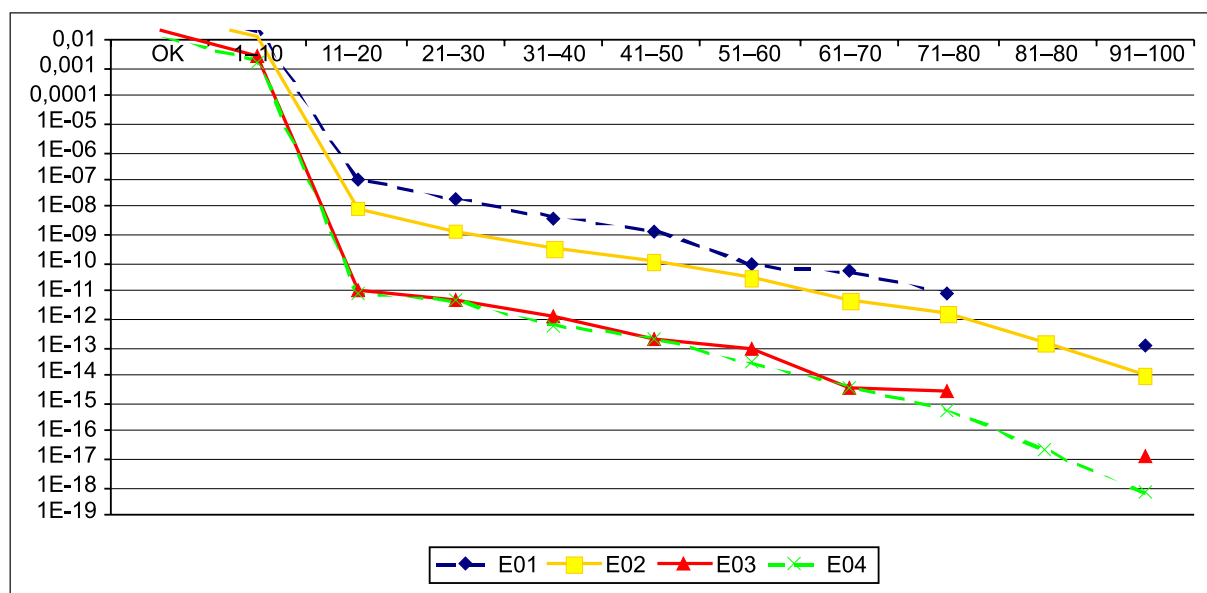
3 lentelė. Ilgalaikių galutinių būsenų aibės dažniai per metus pagal 2010 m. duomenis (I scenarijus)

	Kainų padidėjimas nuo prognozuojamų kainų %			Vidutinis kainų padidėjimo dažnis
	26–50	51–100		
OK	2,42E-04	1,05E-03		
1–10	2,90E-05	2,42E-04		
11–20	1,40E-10	1,25E-09		
21–30	5,26E-12	4,73E-11		
31–40	2,41E-1	2,16E-10		
41–50	1,05E-13	9,43E-13		
51–60	1,82E-12	1,64E-11		
61–70	7,52E-15	6,77E-14		
71–80	6,35E-14	5,72E-13		
81–90				
91–100		8,36E-15		
Vidutinis šilumos tiekimo nutraukimų dažnis		1,36E-03		1,25E-01



4 lentelė. Ilgalaikių galutinių būsenų aibės dažniai per metus pagal 2010 m. duomenis (IV scenarijus)

	Kainų padidėjimas nuo prognozuojamų kainų %				Vidutinis kainų padidėjimo dažnis
	0–25	26–50	51–75	76–100	
OK	8,26E-04	3,27E-05	3,27E-05	6,59E-07	1,55E-02
1–10	1,04E-04	4,77E-06	4,77E-06	7,32E-08	
11–20	2,68E-14	6,86E-14	6,86E-14	6,46E-15	
21–30	5,22E-15	4,32E-14	4,32E-14	4,30E-15	
31–40	3,38E-16	5,15E-15	5,15E-15	5,39E-16	
41–50	6,45E-17	1,84E-15	1,84E-15	1,89E-16	
51–60		2,28E-16	2,28E-16	2,49E-17	
61–70		3,28E-17	3,28E-17	3,44E-18	
71–80		5,18E-18	5,18E-18	5,76E-19	
81–90		1,79E-19	1,79E-19	1,99E-20	
91–100	5,22E-20				
Vidutinis šilumos tiekimo nutraukimų dažnis	5,68E-04				



7 pav. Kauno šilumos nutraukimo dažnių kreivės, 100 % nutraukus dujų tiekimą (skirtingi scenarijai)

Kainų padidėjimas po 2016 m. taip pat mažiausiai tikėtinas tais atvejais, kai yra pasiruošta vykdyti direktyvas dėl teršalų. Lyginant III ir IV scenarijus, visiškai nutraukus dujų tiekimą, pastarajame mažiau tikėtinas labai didelis kainos šuolis, nes čia gamyba nėra sutelkta vienoje rankose, nors iš esmės abiejuose scenarijuose visiškai patenkinama gamybos paklausa naudojant naujas jėgaines.

5 lentelėje pateiktas energetinio saugumo koeficientas, apskaičiuotas pagal sukurtą metodologiją. Pagal šį rodiklį bei energijos netiekimą ir kainų padidėjimą (daugiau nei 25 % tikimybė) galima palyginti modeliuotus Kauno šilumos tiekimo scenarijus (pagal energetinio saugumo rodiklius) (5 lentelė).

Scenarijai, kai pasirenkama strategija eksploatuoti tuos pačius įrengimus, neatitinkančius taršos reikalavimų, arba

5 lentelė. Scenarijų palyginimas pagal energetinio saugumo rodiklius

	Scen I	Scen II	Scen III	Scen IV
Energetinio saugumo koeficientas	33	59	91	96
Energijos netiekimo tikimybė	0,173	0,137	0,105	0,113
Kainų padidėjimo daugiau nei 25 % tikimybė	1	1	0,299	7,52E-02

termofikacinėje elektrinėje instaliuoti 1 jėgainę, kuri nepatenkina visos šaltojo sezono paklausos, nusileidžia kitiems tiek pagal didėjančias kainas, tiek pagal galimą energijos netiekimą.

Aukščiausi energetinio saugumo koeficientai, kurie tarpusavyje mažai skiriasi, gauti pagal III ir IV scenarijus, kur analizuojamas naujų, tenkinančių taršos reikalavimus po 2016 m., įrenginių instaliavimas. IV scenarijus yra pranašiausias dėl mažiausiai didėjančių kainų (tikimybė mažesnė daugiau kaip 13 kartų). Mažesnę kainų didėjimą daugiau nei 25 % lemia rinkos sąlygų padiktuota konkurencija, šilumos gamybai naudojamas biokuras (šaltuoju metų sezonu kuro kaina sudaro apie 1/3 šilumos kainos). Tačiau IV scenarijus patikimumu labai mažai nusileidžia III scenarijui, kur modelyje parinktos didesnės jėgainės (tokios jėgainės labiau tikėtinos, kai valdymas sutelktas vienose rankose: lengviau rasti investicijų jų statymui, sutelkti pajėgas administravimui). Kai statomos didesnės jėgainės vietoj mažesnių, o išlaikomas toks pat bendras galingumas, patikimumas yra šiek tiek didesnis (5 lentelė), nes techniškai gedimo tikimybė yra didesnė ten, kur įrenginių daugiau. Kai įrenginiai didesni, sugedus vienam iš jų, patiriama daugiau praradimų tiek tiekimo, tiek finansinių nuostolių prasme. Beje, taip parinktuose scenarijuose nėra atsakymo į klausimą, kuris kuras – biokuras ar dujos – yra geresnis energetinio saugumo požiūriu.

Reikia pastebėti, kad metodikoje naudojamos barjerų suveikimo tikimybės nėra labai tiksliai įvertintos dėl nedidelės statistinių duomenų apimties, iki galo nežinomų visų aplinkybių ir kt. Tai didina galutinių rezultatų neapibrėžtumą. Tačiau taikant šią metodiką skirtingų plėtros scenarijų palyginimui, t. y. vartojant santykinės charakteristikas, neapibrėžtumas yra gerokai sumažinamas.

## REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Straipsnyje pateikta tikimybinės saugumo analizės metodika, apimanti energetikos sistemos grėsmių analizę, energetikos sistemos trikdžių susiformavimo modelį ir trikdžių vystymosi scenarijų modelį. Metodika leidžia atlikti įvairių energetikos sistemos plėtros scenarijų analizę, palyginti jų energetinį saugumą.

2. Sukurta metodika energetinio saugumo koeficientui skaičiuoti. Šis koeficientas įvertina energijos kainų kilimą ir nepateiktos energijos kiekį.

3. Metodikos taikymas paremtas Kauno CŠT sistemos scenarijų analize. Esant visiškam dujų nutraukimui buvo lyginami keturi Kauno aprūpinimo šiluma plėtros scenarijai po 2016 m.: I – kai eksploatuojami tie patys įrenginiai, neatitinkantys taršos reikalavimų; II – kai KTE papildoma 250 MW biokuro jėgaine išlaikant vieną savininką; III – kai KTE, LEZ, Petrašiūnų TE instaliuojamos stambios biokuro jėgainės, patenkinančios šaltojo sezono poreikius, rezervi-

niais lieka senos KTE jėgainės; IV – instaliuojamos rinkos principu veikiančios smulkios biokuro ir dujų jėgainės, patenkinančios šaltojo sezono poreikius, o rezerve lieka senos KTE jėgainės. Nustatyta, kad energetinis saugumas geriausiai užtikrinamas pagal rinkos modelį (energetinio saugumo koeficientas yra 97), toliau atitinkamai eina III, II ir I scenarijai (91, 59, 33).

4. Suminio kainų padidėjimo tikimybė daugiau nei 25 % pagal I ir II scenarijus yra artima vienetui (nors II atveju kainų didėjimo daugiau nei 50 % tikimybė yra didesnė 1,21 karto), t. y. labai tikėtina, kad kaina pagal I ir II scenarijus kils; III – mažesnė 3,34 karto, palyginti su I scenarijumi; IV – net 13,30 kartų, palyginti su I scenarijumi.

5. Bet kokio dydžio energijos netiekimo tikimybė (lyginama su I scenarijumi, kai papildomai nieko neinstaliuojama) II scenarijaus sumažėja 1,26 karto, III – 1,65 karto, IV – 1,53 karto. Priežastis – papildomai instaliuojamos naujos patikimesnės jėgainės. Tarpusavyje lyginant scenarijus, kai instaliuojamos vienodo galingumo jėgainės (III ir IV), patikimiau, kai instaliuojamos didesnės galios jėgainės.

6. Kauno aprūpinimo šiluma tinkamiausias šilumos tiekimo modelis (pagal energetinį saugumą) yra rinkos modelis (IV scenarijus).

## PADEKA

Tyrimą finansavo Lietuvos mokslo taryba (sutarties Nr. ATE-06/2012).

Gauta 2012 04 12  
Priimta 2012 06 27

## Literatūra

1. Suzuki T., Hippen D. V. *A framework for energy security analysis and application to a case study of Japan*. Synthesis Report for the Pacific Asia Regional Energy Security (PARES) Project, Phase 1, 1998.
2. *Energijos tiekimo galimybės Lietuvai – detali daugiasektorinė integruota energijos paklausos, pasiūlos ir aplinkosaugos analizė*. TATENA, 2004.
3. Molis A. *Lietuvos geoenergetinio saugumo politikos gairės ir Lietuvos geoenergetinių alternatyvų paieškos trumpuoju ir vidutiniu laikotarpiu*. Vilnius: Strateginių studijų centras, 2006.
4. Molis A. *Lietuvos galimybės diversifikuoti dujų tiekimą: pagrindinės kliūtys*. Vilnius: Strateginių studijų centras, 2007.
5. Gnansounou E. Monitoring the vulnerability of energy supply system. *Proceedings of 15th Energy Day in Croatia – Energy Policy Scenarios for 2050, Zagreb, Croatia, 2006*.

6. Loschel A., Moslener U., Rubbelke D. T. G. Indicators of energy security in industrialised countries, *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. No. 4. P. 1665–1671.
7. Cohen G., Joutz F., Loungani P. Measuring energy security: Trends in the diversification of oil and natural gas supplies. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. No. 9. P. 4840–4869.
8. Colli A. *A Methodology to Allow Comparison among Different Energy Systems*: PhD thesis, TUDelft, 2009.
9. WASH-1400. Reactor Safety Study, U. S. Nuclear regulatory Commission, NUREG-75/014 1975.
10. Europos parlamento ir tarybos direktyva 2010/75/ES 2010 m. lapkričio 24 d. dėl pramoninių išmetamų teršalų (taršos integruotos prevencijos ir kontrolės) (nauja redakcija). <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:lt:pdf>

Juozas Augutis, Vaida Matuzienė

#### PROBABILISTIC ASSESSMENT OF ENERGY SECURITY. ANALYSIS OF KAUNAS HEAT SUPPLY MARKET

##### Summary

The aim of the paper is to present probabilistic energy security methodology that allows to analyse the impact of various risk (technical, economic, socio-political) consequences on energy security.

The methodology is presented in two parts: the formation of disturbance from the threat model and the disrupted energy system development model.

The calculations are made on the basis of the probabilistic safety analysis.

The paper presents a general energy system model, describes elements of its concept (threat realization, disturbance, barrier, consequence) and introduces assessment indicators of energy system consequences after threat realization.

The company Kaunas Energy is chosen for the demonstration of the method. A few hypothetical system development scenarios for one disturbance – full gas supply disruption – are researched. The scenarios cover a wide range of investments into the supply of heat – both in the reconstruction of Kaunas CHP plant and construction of biomass boilers. According to the created technology, different heating supply development scenarios are compared among each other and advantages of free heat production market are shown.

**Key words:** energy, energy security, probabilistic analysis

Юозас Аугутис, Вайда Матузене

#### ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. АНАЛИЗ РЫНКА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КАУНАСА

##### Резюме

Статья предназначена для представления созданной вероятно-но энергетической безопасности методологии, что позволяет анализировать последствия воздействия энергетической безопасности различных рисков (технические, экономические, социально-политические).

Методология представлена в двух частях: модели формирования нарушения от угрозы и модели развития нарушенной энергетической системы.

Расчеты сделаны на основе вероятностного анализа безопасности.

В данной статье представлена общая модель энергетической системы, объясняются элементы её концепции (реализация угрозы, нарушения, барьеры, последствия), введены индикаторы оценки последствия энергосистемы после реализации угрозы.

Для демонстрации разработанного метода выбрана компания „Кауно энергия“. Сделан анализ нескольких гипотетических сценариев развития системы на единичный случай – полное прекращение снабжения газа. Сценарии охватывают широкий спектр методов инвестиций в теплоснабжение – как реконструкцию Каунасской ТЭЦ, так и строительство котельных биомассы. В соответствии с разработанным методом, различные сценарии развития теплоснабжения Каунаса сравнены друг с другом, показано преимущество производства тепла свободного рынка.

**Ключевые слова:** энергетика, энергетическая безопасность, вероятностный анализ