

# Lietuvos energetikos sistemos energetinio saugumo lygio kitimo vertinimas

Juozas Augutis,

Linus Martišauskas

*Lietuvos energetikos institutas,  
Branduolinių įrenginių  
saugos laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas  
El. paštas: juozas@mail.lei.lt;  
linasm@mail.lei.lt*

Straipsnyje pateikiama nauja metodika, skirta įvairių energetikos plėtros scenarijų energetinio saugumo įvertinimui ir palyginimui. Energetinis saugumas yra suprantamas ne tik kaip energetikos sistemos sugebėjimas aprūpinti vartotojus energija esant normalioms sąlygoms ir kainoms, bet ir kaip sistemos sugebėjimas pasipriešinti įvairiems trikdžiams, kuriuos gali sukelti tiek techninės bei ekonominės, tiek ir sociopolitinės ar geopolitinės grėsmės. Straipsnyje aptariami tikimybinis trikdžių susiformavimo ir trikdžių poveikio ekonominis-optimizacinis modeliai. Energetinis saugumas įvertinamas kiekybiškai atsižvelgiant į trikdžių sukeltus energijos kainos pokyčius ir vartotojams nepateiktą energiją.

Sukurta metodika pritaikyta Lietuvos energetikos sistemos plėtros scenarijų energetinio saugumo įvertinimui.

- Pirmasis scenarijus – Lietuvoje įgyvendinami tik suskystintų gamtinių dujų terminalo, elektros jungčių su Švedija ir Lenkija bei suplanuoti atsinaujinančių energijos išteklių plėtros projektai, tačiau didžioji dalis elektros energijos yra importuojama, ypač uždarius senuosius Lietuvos elektrinės blokus.
- Antrasis scenarijus – uždaromi senieji Lietuvos elektrinės bloki yra keičiami naujais kombinuotojo ciklo blokais.
- Trečiasis scenarijus – pradama eksploatuoti nauja atominė elektrinė.
- Ketvirtasis scenarijus – antrojo ir trečiojo scenarijų kombinacija: įvedamas vienas dujų kombinuotojo ciklo blokas, o vėliau pastatoma atominė elektrinė. Nepaisant didelių investicijų atominė elektrinė ir kombinuotojo ciklo blokui, ketvirtąjį scenarijų energetinis saugumas yra pats aukščiausias.

**Raktažodžiai:** energetinis saugumas, energetikos sistema, trikdžiai, nacionalinė energetikos strategija

## ĮVADAS

Planuojant energetikos sistemos perspektyvinės raidos galimybes ilgalaikėje perspektyvoje ir pagrindžiant energetikos sistemos plėtros projektus neužtenka įvertinti tik ekonominę projektų pusę, būtina atsižvelgti ir į energetikos sistemos atsparumą galimiems trikdžiams, galintiems kilti dėl įvairių priežasčių ir sukelti ne tik energijos kainų padidėjimą, bet ir energijos tiekimo apribojimus ar net nutraukimus. Energetinio saugumo sąvoka daugumoje dokumentų traktuojama gana siaurai – kaip energijos

šaltinių ir kuro tiekimo diversifikavimas [1], energetinių tinklų prijungimas prie Vakarų Europos tinklų ir nuosavų generavimų pajėgumų didinimas [2]. Deja, svarstant energetikos plėtros planus ir vertinant energetinį saugumą būtina atsižvelgti ne tik į technologinius ir ekonominius, bet ir geopolitinius bei sociopolitinius veiksnius. Pagrindinė energetinio saugumo analizės užduotis yra įvertinti esamos arba planuojamos energetikos sistemos atsparumą įvairioms grėsmėms. Dėl šių grėsmių realizacijos susiformavę trikdžiai gali nutraukti arba apriboti energijos ir kuro tiekimą vartotojams, itin padidinti kainas. Energetinio

saugumo sąvoka aptarta ir apibendrinta [2–4], tačiau reikia pabrėžti, kad energetinis saugumas yra ne tik energetikos sistemos galimybė tiekti energiją vartotojams normaliomis sąlygomis bei priimtinomis kainomis, bet taip pat ir sistemos gebėjimas pasipriešinti galimiems trikdžiams, atsirandantiems dėl technogeninių, gamtinių, ekonominių, sociopolitinių ir geopolitinių priežasčių. Todėl energetinio saugumo analizės pagrindiniu uždaviniu tampa dilema, kaip įvertinti esamos ar perspektyvinės energetikos sistemos atsparumą įvairiems galimiems trikdžiams.

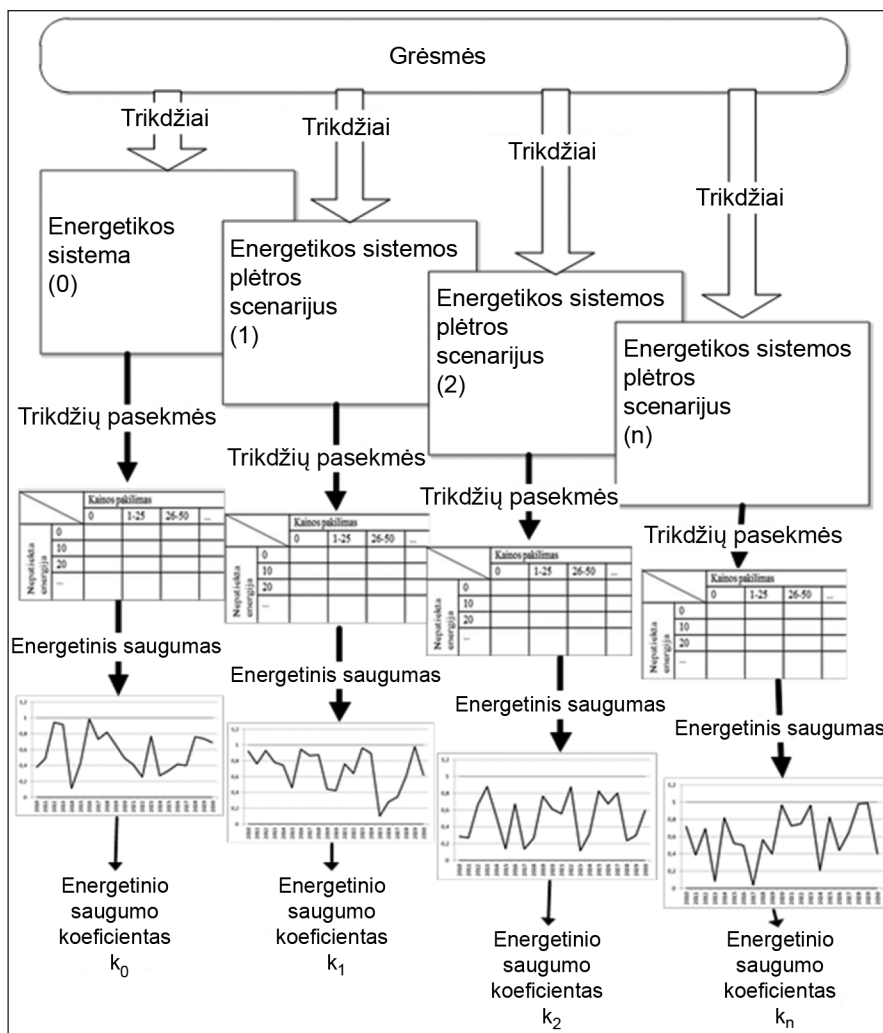
Nors energetinio saugumo vertinimui pastaruoju metu skiriamas itin didelis dėmesys, tačiau iki šiol nėra vieningos tam skirtos metodikos. Naudojami skirtingi metodai, tačiau turbūt plačiausiai paplitusi metodų grupė, kurios vertinimai pagrįsti indikatorių ar indeksų analize [4–7]. Kiti, rečiau naudojami metodai, apima deterministinius ekonominius ir optimizacinius modelius, kuriuose energetikos sistemos perspektyvinė raida nagrinėjama minimalių kaštų analize [8, 9]. Viena iš tokių studijų buvo parengta ir Baltijos šalims [10]. Dar rečiau (dėl sudėtingumo) energetinio saugumo vertinimui naudojami tikimybiniai metodai [11, 12], kurie

pagrįsti tikimybine rizikos ar saugos analize. Kiekvienas iš šių metodų vertina atskiras energetinio saugumo dalis, tačiau nesujungia jų į vieną visumą. Šiame darbe siūloma metodika integruoja deterministinius ir tikimybinus energetinio saugumo vertinimo metodus ir pateikia metriką, kuri skaitine verte leidžia įvertinti energetinio saugumo lygį.

Lietuvos energetikos sistemos plėtros scenarijų energetinio saugumo analizė parodo metodikos pritaikomumą ir galimybes, kurios leidžia tiek įvertinti energetinio saugumo kitimą bėgant laikui, tiek palyginti įvairių plėtros scenarijų energetinį saugumą tarpusavyje.

### VERTINIMO METODIKA

Straipsnyje pristatoma metodika, kuri apima kelis skirtingus metodus: tikimybinį modelį, skirtą energetikos sistemos grėsmių ir trikdžių susiformavimo analizei; ekonominį-optimizacinį modelį, skirtą energetikos sistemos plėtros optimizavimui su skirtingais trikdžių scenarijais; energetinio saugumo metriką, skirtą išmatuoti ir įvertinti energetinį saugumą. Bendra metodikos schema pateikta 1 pav.



1 pav. Energetinio saugumo tyrimo metodikos schema

Pirmasis etapas yra skirtas grėsmių, kylančių energetikos sistemai tiek iš išorės, tiek jos viduje, įvertinimui. Kiekviena grėsmė gali realizuotis į vienokį ar kitokį energetikos sistemos trikdį, galintį padaryti potencialią žalą energetikos sistemai. Grėsmių realizavimosi į trikdžius analizei naudojamas tikimybinis modelis. Antrajame etape modeliuojama energetikos sistema bei jos plėtros scenarijai naudojant ekonominių-optimizacinių modelių. Sistema modeliuojama su daugybe trikdžių, kurių parametrai ir pasirodymo tikimybės nustatytos naudojant prieš tai minėtą tikimybinį modelį. Trečiajame etape įvertinamas visų scenarijų energetinis saugumas bei jo kitimas per tam tikrą laiką. Nustatomas energetinio saugumo koeficientas, kuris įvertina trikdžių pasekmes: nepateiktą energiją ir energijos kainos pakilimą. Suskaičiavus koeficiento vertes, gaunamas kiekvieno plėtros scenarijaus energetinis saugumas skirtingais laikotarpiais.

Pagrindinis skirtumas, palyginti su kitais naudojamais metodais, kad įprastai optimizaciniai energetikos sistemos plėtros modeliai atsižvelgia tik į vieną kriterijų – kainą. Sukurta metodika įvertina ne tik kainos įtaką, bet ir galimai nepateiktą energiją vartotojams.

#### Grėsmių ir trikdžių energetikos sistemai modelis

Kiekviena energetikos sistema gali būti veikiamą įvairių grėsmių. Grėsmė galima laikyti bet kokią potencialų pavojų, kuris egzistuoja sistemos išorėje ar viduje ir kuris gali pasireikšti vienokiu ar kitokiu energetikos sistemos sutrikdymu. Grėsmių prigimtis yra labai įvairi, priklauso nuo to, kokioje šalyje, kokiame geopolitiniame regione bei kontekste yra energetikos sistema [13]. Grėsmės gali realizuotis bet kuriame energetikos sistemos sektoriuje (elektros, šilumos, gamtinių dujų, naftos ir t. t.). Paprastai išskiriamos esminės grėsmės energetiniam saugumui, kurios gali sukelti dviejų rūšių trikdžius: energijos išteklių\* tiekimo apribojimus ar nutraukimus ir staigius energijos išteklių kainų pakilimus. Sąlygiškai grėsmės galima suskirstyti į keletą rūšių, kurios plačiau išvardintos LEI ir VDU Energetinio saugumo tyrimų centro leidinyje [13]. Grėsmės Lietuvos energetikos sistemai, įvardijamos minėtame leidinyje bei ankstesniuose atliktuose tyrimuose [14], ir yra naudojamos šioje analizėje, todėl plačiau nebus nagrinėjamos.

Grėsmės energetikos sistemai gali realizuotis, išprovokuodamos trumpalaikius ar ilgalaikius energetikos sistemos sutrikimus, vadinamus sistemos trikdžiais. Trikdžiai savo ruožtu taip pat skirstomi į keletą rūšių, aprašomi parametrais, kurių prigimtis yra stochastinė. Plačiau apie galimus sistemos trikdžius ir jų rūšis galima rasti [14]. Toliau pateiksime patį trikdžių susiformavimo tikimybinį mode-

\* Energijos ištekliai apima elektros energiją, šilumos energiją, naftos, gamtinių dujų, anglių, branduolinio ir vietinio kuro bei atsinaujinančius energijos išteklius.

lį, nusakomą trikdžių parametrų vertėmis ir jų tikimybiniais skirstiniais. Išoriniai trikdžiai, atsiradę dėl visų galimų grėsmių, paprastai iššaukia dviejų rūšių sutrikimus: energijos išteklių tiekimo apribojimus arba nutraukimus bei staigius energijos išteklių kainų padidėjimus. Trikdžių parametrų aprašymui siūlomas nukrypimų nuo bazinio scenarijaus metodas. Bazinis scenarijus – tai scenarijus, parodantis dabartinę energetikos sistemos situaciją ir jos normalią raidą, kai pirminės energijos nutraukimų ar tiekimo trikdžių nėra iki 2030 m. Pagal šį scenarijų energijos ištekliai tiekiami atitinkamai pagal prognozuojamus elektros energijos poreikius ir centralizuotai tiekiamos šilumos gamybai.

Vienu svarbiausiu išorinio trikdžio parametru yra energijos išteklių tiekimo apimtį sumažėjimas procentais nuo bazinio tiekimo scenarijaus. Jei susiklosto situacija, kad tiekimo apimtį sumažėjimas yra 100 %, vadinasi, visiškai nutraukiamas energijos išteklių tiekimas. Tiekimo nukrypimo nuo bazinio tiekimo scenarijaus parametras  $\delta = \{\delta_i | i = 1, 2, \dots, N_\delta\}$  įgyja reikšmes nuo 0 % iki 100 %. Energijos išteklių kainos nukrypimas nuo baziniame scenarijuje prognozuojamos kainos yra kitas išorinio trikdžio parametras  $\omega = \{\omega_i | i = 1, 2, \dots, N_\omega\}$ , kurio viršutinė reikšmė nėra ribojama, t. y. kaina gali pakilti neribotai (procentais). Kiekvienas iš šių dviejų pagrindinių išorinio trikdžio parametrų apibūdinamas kitais parametrais: kada prasidėjo trikdys (išorinio trikdžio pradžios momentas  $\tau = \{\tau_i | i = 1, 2, \dots, N_\tau\}$ ), kiek laiko jis truko (energijos išteklių tiekimo nukrypimo ar kainos padidėjimo trukmė  $t = \{t_i | i = 1, 2, \dots, N_t\}$ ) bei koks energijos išteklius buvo sutrikdytas (energijos išteklius  $\phi = \{\phi_i | i = 1, 2, \dots, N_\phi\}$ , kurio tiekimas buvo apribotas ar nutrauktas, arba padidėjo jo kaina).

Vidiniam trikdžiui aprašyti yra naudojamas technologijos prieinamumo parametras  $\alpha^{int} = \{\alpha_i^{int} | i = 1, 2, \dots, N_\alpha^{int}\}$ , nes šio tipo trikdžiai susiję su energetikos sistemos techninėmis ir patikimumo charakteristikomis. Kaip ir išorinio trikdžio atveju šis parametras apibūdinamas vidinio trikdžio pradžia, trukmė bei kokios technologijos prieinamumas buvo sumažintas. Kadangi trikdžių parametrai pasižymi tikimybinėmis charakteristikomis, tai jiems būtina nustatyti tikimybinis skirstinius, kad būtų galima sudaryti pilną trikdžių aibę. Būtina pažymėti, kad kai kurie trikdžiai yra priklausomi, todėl jų skirstinių parametrai priklausys nuo kitų trikdžių parametrų.

Šiame straipsnyje laikome, kad bet kurio trikdžio pradžia gali būti aprašyta tolygiuoju tikimybinis skirstiniu  $\tau, \tau^{int} \sim U(a, b)$ , kur  $a$  ir  $b$  yra skirstinio parametrai. Šio skirstinio pasirinkimas grindžiamas tuo, kad trikdys energetikos sistemoje gali pasirodyti atsitiktinai bet kuriuo momentu, t. y. jo pradžia yra visiškai atsitiktinė, todėl skirstinio parametrai  $a$  ir  $b$  nurodo atitinkamai energetikos sistemos modeliavimo pradžią ir pabaigą metais. Trikdžių

stochastinė analizė rodo, kad energijos tiekimo apribojimo bei kainos padidėjimo parametrai paklūsta lognormaliajam dėsniai  $\delta$ ,  $\omega \sim L(\mu, \sigma)$ , kur  $\mu$  ir  $\sigma$  yra skirstinio parametrai, nustatomi iš trikdžio parametro reikšmių vidurkio  $m$  ir dispersijos  $v$  pagal formules:

$$\mu = \log\left(\frac{m^2}{\sqrt{v+m^2}}\right), \sigma = \sqrt{\log\left(\frac{v}{m^2+1}\right)}. \quad (1)$$

Trikdžio trukmės parametras priklauso nuo kitų trikdžio parametru, todėl nustatinėjant jo tikimybinį skirstinį reikia tai įvertinti. Kadangi analizuojamos trikdžių ir technologijų sutrikimų (gedimų) trukmės, tai praktikoje paprastai laikoma, kad tokie parametrai pasiskirstę pagal eksponentinį dėsnį  $t$ ,  $t^{int} \sim EXP(\lambda)$ , kur  $\lambda$  yra skirstinio parametras, priklausantis nuo vidurkio. Eksponentinis dėsnis aprašo trikdžių trukmės pasiskirstymą, kai jie yra atsitiktiniai. Šis skirstinys tokio pobūdžio parametrus dažniausiai naudojamas patikimumo teorijoje [15] ir sutinkamas kituose literatūros šaltiniuose [16]. Energetikos sistemos darbo laiko iki trikdžio pasiskirstymo funkcija yra  $F_x(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ ,  $x \geq 0$ . Trikdžio trukmės parametro reikšmės dažnai priklauso nuo kitų trikdžių parametru, todėl skirstinių parametrai yra susiję priklausomybe. Išorinio trikdžio atveju trukmės skirstinio parametras  $\lambda$  priklauso nuo kitų dviejų išorinio trikdžio parametru reikšmių, t. y.  $\lambda = \lambda(\delta, \omega)$ . Vidinio trikdžio atveju trukmės skirstinio parametras  $\lambda$  priklauso nuo kitos vienos vidinio trikdžio parametro reikšmės, t. y.  $\lambda = \lambda(\alpha^{int})$ . Natūralu, kad didelių tiekimo apribojimų ar akivaizdaus kainų padidėjimo trikdžių trukmė yra mažesnė nei mažų tiekimo apribojimų ir nedidelių kainų šuolių, ir atvirkščiai. Panaši situacija ir su technologijų prieinamumo parametru: kuo technologijos prieinamumas mažesnis, tuo jis trunka trumpiau, ir atvirkščiai. Taip yra ir dėl to, kad technologijų sutrikimai gali būti šalinami ir jų gedimų intensyvumas priklauso nuo remonto trukmės. Šias savybes atspindi trikdžių skirstinių parametru priklausomybė nuo

kitų trikdžių parametru. Technologijos prieinamumo parametras pasižymi binominiu skirstiniu  $\alpha^{int} \sim B(n, p)$ , kur parametras  $n$  nurodo technologijos prieinamumo lygį, o  $p$  žymi jo tikimybę (1 lentelė).

Sudarytas trikdžių susiformavimo tikimybinis modelis atsižvelgiant į jų parametru tikimybinės charakteristikas leidžia sugeneruoti norimo dydžio trikdžių scenarijų aibę, kuri naudojama energetikos sistemos vystymui modeliuoti.

### Energetikos sistemos trikdžių scenarijų modeliavimas

Energetikos sistemu ekonominiam ir technologiniam vystymui modeliuoti ir analizuoti naudojami energetikos sektoriaus modeliavimo įrankiai ar matematiniai modeliai. Šios priemonės leidžia matematinų lygčių pagalba aprašyti realias energetikos sistemas, t. y. jų struktūrą, techninius ir ekonominius rodiklius, įvairius procesus, kuro, energijos ir finansų srautus. Pagrindinis tikslas, kurio siekiama naudojant modelį, yra siekis įvertinti konkrečių sprendimų ar strategijų įtaką energetikos sistemai, ekonomikai ir aplinkai. Analizuojamuoju atveju nagrinėjama trikdžių įtaka energetikos sistemai. Šių įrankių pagalba sukurti modeliai sudaryti iš struktūros aprašymo, pradinių duomenų, charakterizuojančių nagrinėjamą sistemą, ir lygčių bei naudojami skirtingus procesus ir srautus aprašantys matematiniai metodai, pvz., tiesinis optimizavimas ir pan.

Sutrikdytos energetikos sistemos modelyje modeliuojamos svarbiausios energijos rūšys, energijos konvertavimo ir gamybos technologijos bei galutinio vartojimo sektoriai. Kiekviena technologija apibūdinama tokiais parametrais: investicijos ir eksploataciniai kaštai, tarnavimo laikas, prieinamumas ar parengtumas, efektyvumas ir t. t. Technologijos paprastai apibūdinamos procesais, kuriuose vienos energijos rūšys verčiamos į kitą. Pvz., procesas, apibūdinantis kombinuotas šilumos ir elektros jėgaines, apima naudojamo kuro, pvz., dujų pavertimą į šilumą ir elektrą.

1 lentelė. Trikdžių parametru charakteristikos

Trikdžio parametras	Tikimybinis skirstinys	Tikimybinio skirstinio parametrai
Išorinio ar vidinio trikdžio pradžios momentas	Tolygusis $U(a, b)$	$a$ – modeliavimo metu pradžia; $b$ – modeliavimo metu pabaiga.
Tiekimo nukrypimas nuo bazinio tiekimo scenarijaus	Log normalusis $L(\mu, \sigma)$ , kur $\mu = \log\left(\frac{m^2}{\sqrt{v+m^2}}\right)$ , $\sigma = \sqrt{\log\left(\frac{v}{m^2+1}\right)}$	$m$ – vidutinis tiekimo nukrypimas; $v$ – tiekimo nukrypimo dispersija.
Energijos išteklių kainos nukrypimas nuo prognozuojamos kainos baziniame scenarijuje	Eksponentinis $EXP(\lambda)$ , kur $\lambda = \lambda(\delta, \omega)$ išorinio trikdžio atveju ir $\lambda = \lambda(\alpha^{int})$ vidinio trikdžio atveju	$\lambda$ – parametras, priklausantis nuo vidutinės trikdžio trukmės.
Išorinio ar vidinio trikdžio trukmė		$n$ – technologijos prieinamumo lygis; $p$ – technologijos prieinamumo lygio tikimybė.
Technologijos prieinamumas	Binominis $B(n, p)$	

Matematinis sutrikdytos energetikos sistemos modelis susideda iš aibių, parametrų, kintamųjų, lygčių ir pan., kuriais aprašomi energetikos sistemos komponentai bei jų funkcionavimas. Modelio optimizacinis kriterijus arba tikslo funkcija yra sutrikdytos energetikos sistemos darbo ir vystymo kaštų minimizavimas nagrinėjamoju laikotarpiu. Ribojimai energetikos sistemoje gali būti energijos generatoriams (dėl jų pajėgumų), importuojamos energijos kiekiams ir pan.

Energetikos sistemos modeliavimo įrankiu buvo pasirinkta atvirojo kodo energetikos sistemos modeliavimo sistema OSeMOSYS (angl. *The Open Source Energy Modeling System*) [17, 18] ir ji redaguota energetikos sistemos trikdžių scenarijų modeliavimui. Šio modelio tikslo funkcija yra energetikos sistemos diskontuotų kaštų, su kuriais būtų patenkinamas energijos poreikis, minimizavimas nagrinėjamoju laikotarpiu:

$$\begin{aligned} & \text{minimizuoti } \sum_y \sum_t \sum_r TDC_{y,t,r}, \text{ kur } TDC_{y,t,r} = \\ & = DOC_{y,t,r} + DCI_{y,t,r} + DTEP_{y,t,r} + DSV_{y,t,r}; \end{aligned} \quad (2)$$

čia visos sistemos diskontuoti kaštai įtraukia eksploatacinius kaštus, investicijas, taršos mokesčius ir likutines vertes, o indeksai  $y$ ,  $t$  ir  $r$  atitinkamai žymi metus, technologijas ir regionus.

Šiuo įrankiu modeliuojami energetikos sistemos trikdžių scenarijai, kurių rinkinys sudaromas iš prieš tai aprašyto tikimybinio trikdžių susiformavimo modelio. Tam naudojamas minėtų dviejų modelių sujungimas į vieną. Atlikus modeliavimą, gaunamos trikdžių pasekmės energetikos sistemai: energijos kainų padidėjimas ir nepateiktos energijos kiekiai, jei tokie buvo, dėl įvykusių trikdžių sistemoje.

#### Energetinio saugumo matavimas ir vertinimas

Norint išmatuoti energetinį saugumą ar įvertinti jo lygį sukuriami energetinio saugumo vertinimo metrika (matavimo ir vertinimo metodika), pagal kurią būtų galima nustatyti energetikos sistemos energetinio saugumo lygį tiek esamu laiko momentu, tiek ilgainiui jo kitimą. Tam sukuriami viena integralinė charakteristika, vadinama energetinio saugumo koeficientu (ESK), kuri leidžia įvertinti trikdžių scenarijų energetikos sistemoje pasekmes energetinio saugumo aspektu. Energetinio saugumo koeficientas priklauso nuo nepateiktos energijos kiekių, energijos kainų padidėjimo bei kiek laiko tai tęsėsi kiekviename trikdžių scenarijuje. Taip įvertinamas ESK kiekviename trikdžių scenarijuje  $s$  bei kiekviename laiko segmente  $i$  pagal formulę:

$$\begin{aligned} ESK_{s,i} = & \exp(-a_1 \cdot c_{s,i} \cdot \exp(a_2 \cdot t_{s,i}) - \\ & - a_3 \cdot u_{s,i} \cdot \exp(a_4 \cdot t_{s,i})); \end{aligned} \quad (3)$$

čia  $ESK_{s,i}$  – energetinio saugumo koeficientas  $s$  trikdžio scenarijuje ir  $i$  laiko segmente;

$s$  – trikdžio scenarijus;

$i$  – laiko segmentas;

$c$  – energijos kainos padidėjimas procentais;

$u$  – nepateiktos energijos kiekis procentais;

$t$  – energijos kainos padidėjimo ar energijos netiekimo trukmė;

$a_j$  – svoriniai koeficientai, kurie įvertina nepateiktos energijos svarbą prieš energijos kainos pakilimą ( $j = 1, 2, 3, 4$ ).

Norint įvertinti visų trikdžių scenarijų įtaką energetikos sistemos energetiniam saugumui visuose laiko segmentuose ar metuose, skaičiuojamas tų scenarijų ESK vidurkis kiekviename laiko segmente bei kiekviename trikdžio scenarijuje ir taip gaunamas bendras viso laikotarpio energetinio saugumo koeficientas:

$$ESK = \frac{1}{s} \sum_s \frac{1}{i} \sum_i ESK_{s,i}. \quad (4)$$

Koeficiento reikšmė kinta nuo 0 (energetikos sistema neatspari trikdžiams ir jos energetinio saugumo lygis yra minimalus) iki 1 (energetikos sistema atspari trikdžiams ir jos energetinio saugumo lygis yra maksimalus).

## LIETUVOS ENERGETIKOS SISTEMOS ENERGETINIO SAUGUMO TYRIMAS

Lietuvoje elektros energetikos sistemos veiklą apibrėžia Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas [19]. Šis įstatymas nustato elektros energijos gamybos, perdavimo, skirstymo ir tiekimo Lietuvos Respublikoje reguliavimo pagrindus, taip pat elektros energijos paslaugų teikėjų ir vartotojų santykius bei sąlygas, skatinančias konkurenciją elektros energetikos sektoriuje. Lietuvos elektros energetikos sistemos savybes didžiąja dalimi lemia elektrinės. Lietuvos svarbiausios elektrinės pastatytos sovietmečiu ir buvo skirtos tenkinti ne tik Lietuvos, bet ir regiono (Latvijos, Baltarusijos, Kaliningrado srities) reikmes [20]. Vystantis energetikos sistemai, atsiranda poreikis naujų elektrinių statybai bei sistemos plėtros vizijos formavimui. Tam kuriamos nacionalinės energetikos strategijos, kurios laikui bėgant turi būti atnaujintos. Paskutinioji iš jų patvirtinta 2012 m., kurioje nustatomi pagrindiniai Lietuvos energetikos sektoriaus tikslai bei jų įgyvendinimo kryptys iki 2020 m. ir įtvirtinamos energetikos sektoriaus plėtros gairės iki 2030 ir 2050 m. [21]. Svarbiausias strategijoje numatomų energetikos politikos kryptų ir veiksmų tikslas – Lietuvos energetinio saugumo ir konkurencingumo užtikrinimas.

Pagal minėtą strategiją [21] elektros energetikos sektoriuje didžiausias dėmesys bus skiriamas įgyvendinti tuos strateginius projektus ir sprendimus, kurie turės

esminį poveikį Lietuvos energetiniam saugumui pasiekti, t. y. Lietuvos ir Lenkijos elektros jungties LitPol Link 1 eksploatacijos pradžia 2015 m. ir jungties išplėtimas 2020 m., papildomos Lietuvos–Lenkijos elektros jungties nutiesimas (LitPol Link 2), kuri ateityje taip pat užtikrins ir darbą sinchroniniu režimu su ENTSO-E kontinentinės Europos tinklais; Lietuvos ir Švedijos elektros jungties NordBalt užbaigimas 2015 m.; regioninės Baltijos valstybių elektros rinkos sukūrimas ir integravimas į Šiaurės šalių bei kontinentinės Europos elektros rinkas; Lietuvos, Latvijos ir Estijos elektros energetikos sistemų susijungimas su ENTSO-E kontinentinės Europos tinklais darbui sinchroniniu režimu. Tarp labai svarbių projektų ir sprendimų įvardyta ir regioninės atominės elektrinės Visagine statyba, elektros energijos gamybos iš atsinaujinančių energijos išteklių apimties didinimas, Trečiojo ES energetikos paketo įgyvendinimas. Šilumos sektoriaus pagrindinis uždavinys yra padidinti šilumos gamybos, perdavimo ir vartojimo efektyvumą, tuo pačiu metu keičiant šilumos gamybai naudojamas gamtines dujas biomase. Kaip tvirtinama strategijoje, valstybė remsi iniciatyvas, didinančias energijos vartojimo efektyvumą, skatinančias atliekų naudojimą energijai gaminti ir didinančias biomasės naudojimą šilumos gamybai. Gamtinių dujų sektoriuje nuo 2014 m. pabaigos numatomas suskystintų gamtinių dujų terminalas, kurio planuojamas našumas 2–3 mlrd. m<sup>3</sup> per metus labai padidins dujų tiekimo patikimumą [21].

Atsižvelgiant į visus šiuos numatomus bei jau įvykdytus projektus Lietuvos energetikos sistemoje, straipsnyje pateikiami sudaryti modeliavimo scenarijai. Pagrindinis rezultatų akcentas, kad atsižvelgiama ne tik į plėtros scenarijų kaštus, tačiau ir į energetinio saugumo kriterijų, t. y. kaip energetikos sistema kiekviename scenarijuje sugeba pasipriešinti trikdžiams, kurie atsiranda tiek pačioje sistemoje, tiek už jos ribų, tačiau gali jai turėti įtakos. Taip įvertinamas Lietuvos energetikos sistemos energetinio saugumo lygio kitimas bėgant laikui. Rezultatai taip pat priklauso ir nuo modeliavimo prielaidų, kurios daugelyje scenarijų yra tos pačios iki tam tikrų metų, o vėliau jos skiriasi priklausomai nuo modeliuojamų scenarijų.

### Modeliavimo prielaidos ir scenarijai

Lietuvos energetikos sistema modeliuojama kaip vienas regionas. Modeliavimo laikotarpis apima 2013–2030 m. 2013 m. sausio 1 d. Lietuvos elektros sistemoje veikusių elektrinių bendra įrengtoji galia sudarė 4 254 MW. Dalis elektrinių galių yra sunaudojama savoms reikmėms, užkonservuota, apribota vandens kiekiu hidroelektrinėse ir pan. Dėl to galia, kurią elektrinė gali tiekti į tinklą, arba galia sistemoje yra šiek tiek mažesnė ir siekia 3 904 MW [22]. Modelyje laiko dimensija per metus dalinama į du lygius: sezonus ir laiko segmentus sezonuose. Modeliavimo

žingsnis yra vieneri metai. Kiekvieni metai skirstomi į tris sezonus: žiemos pabaiga, vasara ir žiemos pradžia, nes tai susiję su šildymo sezonų pradžia ir pabaiga, kas turi įtakos tiek elektros, tiek šilumos gamybai, nes elektra generuojama taip pat ir termofikacinėse jėgainėse. Elektros ir šilumos energijos poreikiai per metus kinta priklausomai nuo šiltojo ir šaltojo metų laiko. Elektros energijos poreikių prognozės daromos pagal labiausiai tikėtiną scenarijų [23]. Šilumos energijos poreikiams prognozuoti naudojamos prielaidos iš Kauno miesto centralizuoto aprūpinimo šiluma strategijos [24]. Kuro kainų prognozės daromos pasinaudojant metinio leidinio Annual Energy Outlook 2013 [25] bei minėtos strategijos [24] prielaidomis. Per metus kuro kainos variacija nenaudojama. Naujų įrengtųjų galių plėtra ir reikalingos investicijos priimtos pagal Nacionalinę energetinės nepriklausomybės strategiją [21]. Kenksmingų medžiagų išmetimai į aplinką nėra modeliuojami.

Pagrindiniu scenarijumi yra laikomas bazinis scenarijus, pagal kurį Lietuvos energetikos sistema vystosi taip, kaip yra numatyta jos raida iki 2030 m. Pagrindiniai įvykiai ir plėtros projektai šiame scenarijuje:

- LE 9 KC dujų blokas (455 MW) nuo 2013 m.
- SGDT (maksimalus metinis pajėgumas 3 000 Mm<sup>3</sup>) nuo 2015 m.
- LitPol Link elektros jungtis: 500 MW nuo 2015 m. ir 1 000 MW nuo 2020 m.
- NordBalt elektros jungtis (700 MW) nuo 2016 m.
- AEI plėtra pagal [21] prognozes (kasmet apie 60 MW<sub>e</sub> ir 100 MW<sub>g</sub>).
- LE senieji blokai palaipsniui uždaromi iki 2025 m:
  - 3–4 blokai (300 MW) nuo 2013 m.
  - 1–2 blokai (300 MW) nuo 2016 m.
  - 5–6 blokai (600 MW) nuo 2018 m.
  - 7–8 blokai (600 MW) nuo 2025 m.
- Senosios miestų termofikacinės elektrinės (Kauno, Vilniaus ir kt.) uždaromos nuo 2025 m.
- Elektros importas neribojamas ir patenkina likusią elektros paklausos dalį.

Visos šios prielaidos yra tos pačios nagrinėtuose scenarijuose ir nekinta. Iš viso analizuojami keturi Lietuvos energetikos sistemos plėtros scenarijai, pateikti 2 lentelėje.

Pirmajame scenarijuje Lietuvos energetikos sistemoje įgyvendinami pagrindiniai suplanuoti plėtros projektai (išvardinti anksčiau), tačiau didžioji dalis elektros energijos yra importuojama, ypač uždarius senuosius Lietuvos elektrinės blokus. Antrajame scenarijuje iki 2018 m. visos prielaidos yra tos pačios kaip ir pirmajame. Tačiau antrasis scenarijus pasižymi tuo, kad nuo 2018 m. uždaromi senieji Lietuvos elektrinės blokai yra keičiami nauju 450 MW galios kombinuotojo ciklo bloku. Nuo 2025 m. paskutiniai senieji LE blokai pakeičiami antru nauju tos pačios galios KCB kaip ir pirmuoju atveju. Trečiajame scenarijuje prielaidos tos pačios kaip ir pirmajame iki pat 2023 m.,

2 lentelė. Lietuvos energetikos sistemos modeliuoti plėtros scenarijai

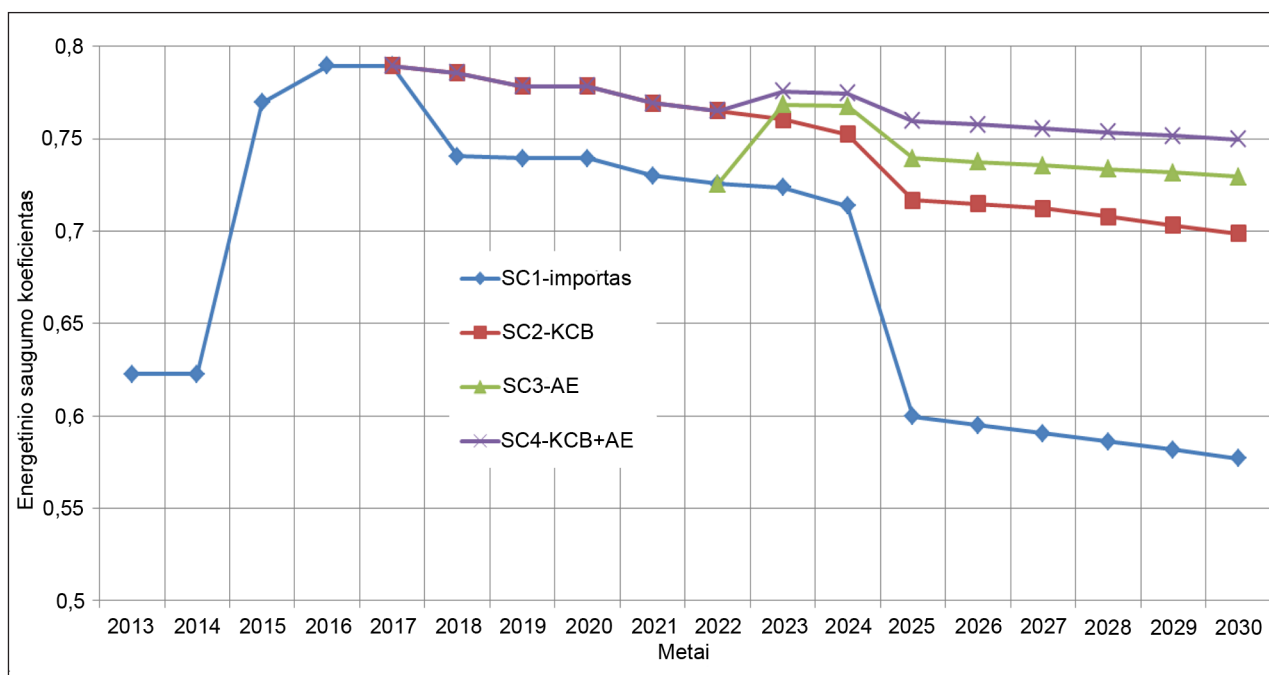
Scenarijaus žymėjimas	Scenarijaus pavadinimas	Scenarijaus apibūdinimas
SC1	Elektros importas	Nieko naujo nedaroma energetikos sistemoje, elektros importas dominuoja tenkinant elektros energijos poreikį.
SC2	KCB	Dujų kombinuotojo ciklo blokas (450 MW) nuo 2018 m. Dujų kombinuotojo ciklo blokas (450 MW) nuo 2025 m.
SC3	AE	Nuo 2023 m. nauja atominė elektrinė. Nagrinėjama investicijų ir bloko galios dalis, tenkanti tik Lietuvai (pagal rinką 47,5 %, galia 657 MW).
SC4	KCB ir AE	Dujų kombinuotojo ciklo blokas (450 MW) nuo 2018 m. ir atominė elektrinė (657 MW) nuo 2023 m.

kol pradėdama eksploatuoti naują atominę elektrinę. Čia nagrinėjama AE investicijų ir bloko galios dalis, tenkanti tik Lietuvai, kuri pagal rinką sudaro 47,5 %, o galia 657 MW. Ketvirtasis scenarijus pasižymi antrojo ir trečiojo scenarijų kombinacija: nuo 2018 m. LE senieji 5–6 blokai keičiami nauju 450 MW galios KCB, o nuo 2023 m. pastatoma nauja AE, nagrinėjama tik Lietuvai proporcingai atitenkanti bloko dalis. Šis scenarijus pasirinktas, nes, nusprendus statyti atominę elektrinę Lietuvoje, tai pavyktų įgyvendinti ne anksčiau kaip 2022 ar 2023 m. Norint išlaikyti energetinio saugumo lygį ir neleisti jam kristi, reiktų papildomai investuoti į naują plėtros projektą iki AE atsiradimo. Turint SGD terminalą nuo 2015 m. logiška būtų statyti dujų KCB, kuris ir buvo pasirinktas šiame scenarijuje.

### Rezultatų analizė

Lietuvos energetikos sistemos energetinis saugumas nagrinėjamas minėtų scenarijų atveju: pirmasis pasižymi dominuojančiu elektros importu, antrasis – senųjų Lie-

tuvos elektrinės blokų laipsnišku pakeitimu naujais KCB, trečiasis – naujos atominės elektrinės darbu, o ketvirtasis scenarijus apima tiek naują KCB vietoj senų LE blokų, tiek naują AE. Minėti scenarijai modeliuojami su įvairių trikdžių scenarijų aibe. Gauti rezultatai parodo trikdžių pasekmes: nepateiktos energijos dalį bei energijos kainos pakilimą, palyginti su baziniu scenarijumi, t. y. be trikdžių. Šioms pasekmėms įvertinti skaičiuojamas energetinio saugumo koeficientas (3 formulė) kiekvienam trikdžių scenarijui skirtingais laiko momentais. Šiuo koeficientu įvertinamas energetinio saugumo lygio kitimas per nagrinėjamąjį laikotarpį. Norint gauti visų trikdžių scenarijų integralinę charakteristiką skaičiuojamas ESK vidurkis (4 formulė), kuriuo įvertinamas bendras viso modeliuojamo laikotarpio energetinio saugumo koeficientas skalėje nuo 0 iki 1. Suskaičiavus visų trikdžių scenarijų ESK vidurkį kiekvienais metais modeliuojamu laikotarpiu, gaunamas energetinio saugumo vidutinio lygio kitimas bėgant laikui (2 pav.).



2 pav. Energetinio saugumo koeficiento nagrinėtuose scenarijuose kitimas bėgant laikui

Gauti rezultatai rodo, kad 2013 m. Lietuvos energetikos sistemos energetinio saugumo koeficientas yra 0,62. Įgyvendinus jau dabar suplanuotus ir vystomus projektus (nuo 2015 m. pradėjus eksploatuoti suskystintų gamtinių dujų terminalą Klaipėdoje bei LitPol Link pirmosios grandies elektros jungtį, o nuo 2016 m. pradėjus eksploatuoti ir NordBalt elektros jungtį su Švedija), energetinio saugumo koeficientas 2016–2017 m. pasiektų 0,79 vertę. Įvykdžius minėtus projektus ir nustojus toliau investuoti į energetikos ūkį, energetinis saugumas laipsniškai mažėtų. Iki 2018 m. energetikos sistema vystytųsi taip pat visuose nagrinėtuose scenarijuose, o nuo 2018 m. plėtra pradėtų skirtis, tai lemtų rezultatus. Elektros importo scenarijaus atveju pirmas akivaizdus koeficiento kritimas 2018 m. būtų dėl LE 5–6 blokų eksploatacijos pabaigos. Kasmet įvedant tik apie 60 MW AEI elektrinių ir apie 100 MW AEI šilumos generatorių, o 2025 m. visiškai sustabdžius Lietuvos elektrinės senosius blokus, Lietuvos energetinio saugumo koeficientas sumažėtų iki 0,6 ir mažėtų toliau. Labai staigus energetinio saugumo kritimas 2025 m. pasijustų dėl visiško LE senųjų blokų uždarymo bei senųjų miestų termofikacinių elektrinių stabdymo elektros gamybai. Be to, šis scenarijus ypač neatsparus galimiems elektros importo kainų padidėjimams. Importuojamos elektros energijos kaina gali būti priklausoma nuo elektros energijos rinkos dalyvių bandymų trumpuoju laikotarpiu užtikrinti daug mažesnes elektros energijos kainas, o ilguoju laikotarpiu (sumažėjus konkurencijai rinkoje) elektros energijos kainos gali padidėti. Po 2025 m. labai pavojingas taptų nutraukiamas elektros importas, kurį galėtų lemti tiek technologinės, tiek ir geopolitinės priežastys. Šio scenarijaus atveju Lietuva neturėtų pakankamo kiekio savų konkurencingų generatorių.

Antruoju, t. y. dujų kombinuotojo ciklo blokų scenarijaus atveju 2018 m. uždarius senosius Lietuvos elektrinės 5–6 blokus ir keičiant juos nauju dujų 450 MW galios kombinuotojo ciklo bloku, būtų sustabdytas drastiškas energetinio saugumo koeficiento kritimas ir jis išliktų intervale [0,75; 0,79] iki 2024 m. Nuo 2025 m. visiškai išjungus paskutinius LE senosius blokus (7–8) ir pakeitus juos nauju dujų 450 MW galios KCB, energetinio saugumo koeficientas nukristų iki 0,72, tačiau šis kritimas būtų daug mažesnis nei pirmojo scenarijaus atveju. Tai galima paaiškinti papildomo generatoriaus atsiradimu sistemoje, o nedidelis kritimas atsirastų dėl to, kad elektros gamyba taptų labai nediversifikuota, t. y. pagrįsta iš esmės tik viena kuro rūšimi – gamtinėmis dujomis, o gamina-

mos elektros kaina taptų labiau priklausoma nuo taršos leidimų ir pirminio kuro kainų. Šios aplinkybės sumažintų energetinio saugumo koeficientą, dėl prognozuojamų dujų kainų svyravimų jis išlaikytų tendenciją mažėti (blogėti).

Naujos AE scenarijuje plėtojant branduolinę energetiką, t. y. 2023 m. pradėjus veikti naujosios branduolinės elektrinės blokui ir atsižvelgiant į Lietuvai proporcingai atiteksiančią dalį, energetinio saugumo koeficientas 2023 m. pakiltų iki 0,77. Nuo 2025 m. visiškai išjungus LE senosius blokus, koeficientas nukristų iki 0,74, bet skirtingai nei pirmuose dviejuose scenarijuose išsilaikytų praktiškai tame pačiame lygyje iki pat 2030 m. Energetinio saugumo koeficientas ilgą laiką būtų palaikomas panašaus lygmens dėl to, kad nauja AE padidintų diversifikaciją elektros gamybos technologijose bei branduolinio kuro kainų prognozių neapibrėžtis nėra tokia didelė, kaip gamtinių dujų kainų.

Ketvirtojo scenarijaus atveju 2018 m. įvedus naują KCB vietoj senųjų LE blokų, energetinio saugumo koeficientas drastiškai nekristų ir laikytųsi tarp 0,79 ir 0,77 iki 2023 m. Nuo šių metų, pradėjus eksploatuoti naują AE, energetinio saugumo koeficientas pakiltų iki 0,78, t. y. sugrįžtų praktiškai į tą patį lygį, koks buvo 2016–2017 m., kai ESK vertė buvo aukščiausia. Aukštesnė koeficiento vertė nepasiekama dėl labai didelių papildomų investicijų (šio scenarijaus atveju). 2025 m. vėl dėl LE paskutiniųjų senųjų blokų uždarymo lygis nukristų iki 0,76, tačiau išsilaikytų panašaus lygio (0,75) iki pat 2030 m. Tai yra aukščiausia energetinio saugumo koeficiento vertė tais metais iš visų nagrinėtų scenarijų.

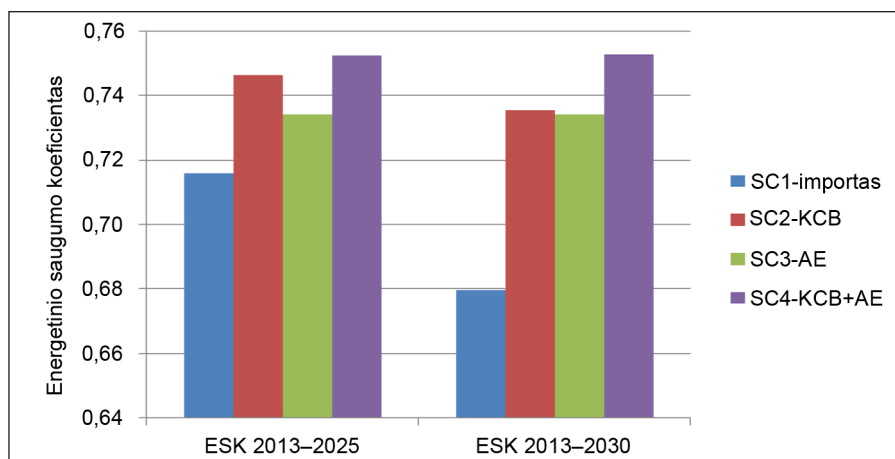
Norint palyginti scenarijus tarpusavyje ne tik energetinio saugumo koeficiento kitimo (laiko prasme), tačiau ir viena integraline charakteristika, skaičiuojamas viso modeliuojamo laikotarpio energetinio saugumo integralinis vidurkis pagal 4 formulę. Tai leidžia norimu laikotarpiu įvertinti įvairių energetikos sistemos plėtros scenarijų ESK reikšmes. Nustačius ESK reikšmes nagrinėtiems scenarijams, pastebimas SC4 pranašumas, palyginti su kitais, kadangi šio scenarijaus energetinio saugumo koeficiento vertė yra didžiausia iš visų modeliuotų scenarijų tiek 2013–2025 m., tiek ir 2013–2030 m. laikotarpiu (3 lentelė).

Šie rezultatai taip pat parodo plėtros projektų įgyvendinimo energetikos sistemoje laiko momento svarbą. Lyginant nagrinėtus scenarijus tarpusavyje (3 pav.) akivaizdu, kad KCB ir AE scenarijus pranašesnis už kitus scenarijus, ypač ilgesniu laikotarpiu.

3 lentelė. Scenarijų vidutinis energetinio saugumo koeficientas skirtingais laikotarpiais

Energetinio saugumo koeficientas	Scenarijus 1	Scenarijus 2	Scenarijus 3	Scenarijus 4
2013–2025 m.	0,716	0,746	0,734	0,752
2013–2030 m.	0,680	0,735	0,734	0,753





3 pav. Lietuvos energetikos sistemos nagrinėtų scenarijų energetinio saugumo palyginimas

## IŠVADOS

1. Sukurta energetinio saugumo tyrimo metodika leidžia įvertinti energetikos sistemos energetinį saugumą, jo kitimą bėgant laikui bei palyginti įvairius energetikos sistemos plėtros scenarijus energetinio saugumo prasme, įvertinti energetikos sistemos pasipriešinimą galimiems trikdžiams.

2. Atsižvelgiant į suplanuotus ir įgyvendinamus Lietuvos energetikos sistemos plėtros projektus (SGD terminalas, NordBalt ir LitPol Link elektros jungtys), palapsniui plėtojant atsinaujinančius energijos išteklius ir importuojant elektros energiją iš Šiaurės šalių bei Rusijos rinkų, Lietuvos energetikos sistemos energetinio saugumo koeficientas 2013 m. yra 0,62 (skalė nuo 0 iki 1), 2016–2017 m. jis pasiektų didžiausią reikšmę (0,79), o 2030 m., kai visi senieji Lietuvos elektrinės blokai nebūtų eksploatuojami (2013–2030 m. laikotarpiu), nukristų iki žemiausios vertės (0,58).

3. Dujų kombinuotojo ciklo blokų scenarijaus atveju Lietuvos elektrinės 5–6 blokus pakeitus nauju dujų KCB, 2018 m. būtų sustabdytas drastiškas energetinio saugumo koeficiento kritimas, jis kistų intervale [0,75; 0,79]. Visiškai uždarius LE senuosius blokus (7–8) 2025 m. ir pakeitus juos papildomu KCB, energetinio saugumo koeficientas 2030 m. būtų 0,7.

4. Nuo 2023 m. pradėjus eksploatuoti naują AE, energetinio saugumo koeficientas pakiltų iki 0,77, tačiau nors ir visiškai uždarius senuosius LE blokus 2025 m., jis nekristų taip sparčiai, kaip pirmaisiais dviem scenarijais, o išsilaikytų panašaus lygio (0,73) iki 2030 m.

5. Energetinio saugumo prasme geriausias scenarijus yra ketvirtasis, kai 2018 m. vietoje LE 5–6 blokų pradėtų darbą naujas dujų KCB (450 MW), o 2023 m. pradėtų veikti nauja AE (Lietuvos dalis 657 MW). Nors ir visiškai uždarius LE senuosius blokus 2025 m., šio scenarijaus energetinio saugumo koeficientas būtų aukščiausias (0,75) ir toks išliktų iki 2030 m.

## PADEKA

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

### Žymėjimai

$\delta$  – tiekimo nukrypimas nuo bazinio tiekimo scenarijaus;  
 $\omega$  – energijos išteklių kainos nukrypimas nuo prognozuojamos kainos baziniame scenarijuje;  
 $\tau$  ( $\tau^{int}$ ) – išorinio (vidinio) trikdžio pradžios momentas;  
 $t$  ( $t^{int}$ ) – išorinio (vidinio) trikdžio trukmė;  
 $\varphi$  – energijos išteklius, kurio tiekimas buvo apribotas ar nutrauktas, arba padidėjo jo kaina;  
 $\alpha^{int}$  – technologijos prieinamumas;  
 $F_x(x)$  – tikimybinio pasiskirstymo funkcija;  
 $u$  – nepateikta energija;  
 $c$  – energijos kainos padidėjimas.

### Santrumpos

AE – atominė elektrinė;  
 AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;  
 ES – Europos Sąjunga;  
 ESK – energetinio saugumo koeficientas;  
 KC – kombinuotasis ciklas;  
 KCB – kombinuotojo ciklo blokas;  
 LE – Lietuvos elektrinė;  
 LEI – Lietuvos energetikos institutas;  
 SGD – suskystintos gamtinės dujos;  
 SGDT – suskystintų gamtinių dujų terminalas;  
 VDU – Vytauto Didžiojo universitetas.

## Literatūra

1. 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. 4860–4869.
2. Winzer Ch. Conceptualizing energy security. *Energy Policy*. 2012. Vol. 46. P. 36–48.
3. Chester L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. No. 2. P. 887–895.
4. Sovacool B. K., Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*. 2011. Vol. 36. No. 8. P. 5343–5355.
5. Sovacool B. K. The methodological challenges of creating a comprehensive energy security index. *Energy Policy*. 2012. Vol. 48. P. 835–840.
6. Krut B., van Vuuren D. P., de Vries H. J. M., Groeneweg H. Indicators for energy security. *Energy Policy*. 2009. Vol. 37. No. 6. P. 2166–2181.
7. *Index of US Energy Security Risk*. Institute for 21st Century Energy, US Chamber of Commerce. [http://www.energyxxi.org/themes/energyxxi/pdfs/Energy\\_Index\\_2011\\_FINAL.pdf](http://www.energyxxi.org/themes/energyxxi/pdfs/Energy_Index_2011_FINAL.pdf)
8. Jun E., Kim W., Chang S. H. The analysis of security cost for different energy sources. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. No. 10. P. 1894–1901.
9. Connolly D., Lund H., Mathiesen B. V., Leahy M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*. 2010. Vol. 87. No. 4. P. 1059–1082.
10. Tarptautinė atominės energetikos agentūra (TATENA). *Analyses of Energy Supply Options and Security of Energy Supply in the Baltic States*. Vienna: IAEA-TECDOC-1541, 2007. 323 p.
11. Colli A. *A Methodology to Allow Comparison among Different Energy Systems*. Daktaro disertacija. TUDelft, 2009.
12. Augutis J., Matuzienė V. Tikimybinis energetinio saugumo vertinimas. Kauno šilumos tiekimo rinkos analizė. *Energetika*. 2012. T. 58. Nr. 2. P. 66–76.
13. Vytauto Didžiojo universiteto ir Lietuvos energetikos instituto Energetinio saugumo tyrimų centras. *Lietuvos energetinis saugumas. Metinė apžvalga 2011–2012*. Kaunas: Vytauto Didžiojo universitetas, 2013. 32 p.
14. *Energetinio saugumo analizės ir integruoto saugumo lygio vertinimo metodikos sukūrimas ir tyrimas*. Nacionalinės mokslo programos „Ateities energetika“ projekto galutinė ataskaita, 2012.
15. McCormick N. J. *Reliability and Risk Analysis*. Academic Press, 1981. 446 p.
16. Augutis J., Ušpuras E. *Technologijų rizika*. Monografija. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, Vytauto Didžiojo universitetas, 2006. 248 p.
17. *OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System*. 2013. <http://osemosysmain.yolasite.com/>
18. Howells M., Rogner H., Strachan N., Heaps C., Huntington H., Socrates K., Hughes A., Silveira S., Decarolis J., Bazillian M., Roehrl A. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. No. 10. P. 5850–5870.
19. *Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas*. 2000 m. liepos 20 d. Nr. VIII-1881, Vilnius (nauja įstatymo redakcija nuo 2004 m. liepos 10 d. Nr. IX-2307).
20. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. *Tiekimo saugumas Lietuvos elektros energijos rinkoje*. Monitoringo ataskaita. Vilnius, 2012. 24 p.
21. *Nacionalinė energetinės nepriklausomybės strategija*. Patvirtinta Lietuvos Respublikos Seimo 2012 m. birželio 26 d. nutarimu Nr. XI-2133. Vilnius: Lietuvos Respublikos energetikos ministerija, 2012.
22. *Elektros perdavimo sistemos operatorius LITGRID*. <http://www.litgrid.eu/>
23. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija. *Lietuvos Respublikos elektros energijos ir gamtinių dujų rinkų metinė ataskaita Europos Komisijai*. Vilnius, 2012. 140 p.
24. *Kauno miesto centralizuoto aprūpinimo šiluma strategija*. Viešoji įstaiga „PVC“, 2012. 408 p.
25. Energy Information Administration. Official Energy Statistics from the U. S. Government. *Annual Energy Outlook 2013*. <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>

Juozas Augutis, Linas Martišauskas

#### ASSESSMENT OF ENERGY SECURITY LEVEL VARIATION IN LITHUANIAN ENERGY SYSTEM

##### Summary

The paper presents a new methodology for the energy security assessment and comparison of various energy development scenarios. Energy security is understood not only as the ability of the energy system to supply energy to consumers under normal conditions and at reasonable prices but also as the system's ability to resist to various potential disturbances arising from both technical and economic as well as from socio-political and geopolitical threats. The paper presents a probabilistic model of disturbance formation and an economic-optimization model of disturbance effects. Energy security is evaluated quantitatively taking into account changes in energy prices and unsupplied energy to consumers caused by the disturbances.

The developed methodology was applied for energy security assessment of Lithuanian energy system development scenarios.

The first scenario is characterized by the implementation of the liquefied natural gas terminal, electricity connections with Sweden and Poland as well as planned renewable energy development projects in the Lithuanian energy system. However, the majority of electricity is imported, especially after the shutdown of the old units at the Lithuanian power plant. Closed units at the Lithuanian power plant are replaced with new combined cycle units in the second scenario. A new nuclear power plant is placed in the third scenario. The combination of the second and third scenarios is done in the fourth scenario: a single gas combined cycle unit is installed and the nuclear power plant is placed afterward. Despite considerable investments in the nuclear power plant and the combined cycle unit, energy security is highest in the fourth scenario.

**Key words:** energy security, energy system, disturbances, national energy strategy

Юозас Аугутис, Линас Мартишаускас

#### ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛИТОВСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

##### *Резюме*

В данной статье представлена новая методика для оценки и сравнения энергетической безопасности при разных сценариях развития энергетики. Энергетическая безопасность понимается не только как способность энергетической системы обеспечить потребителя энергией в нормальных условиях и по нормальным ценам, но и как способность системы

противостоять против различных помех, которые могут быть вызваны как техническими и экономическими, так и социально-политическими и геополитическими угрозами. В статье представлены стохастические модели формирования помех и экономико-оптимизационная модель, оценивающая влияние помех. Энергетическая безопасность оценивается количественно с учетом помех, вызванных изменением цен на энергоносители и не поставленной энергии потребителям.

Разработанная методика адаптирована для оценки энергетической безопасности сценариев развития Литовской энергетической системы. По первому сценарию в Литве реализованы только проекты терминала сжиженного природного газа, электрические соединения со Швецией и Польшей и запланированное развитие возобновляемых источников энергии, но большая часть электричество импортируется, особенно после закрытия старых энергоблоков на Литовской электростанции. По второму сценарию закрытые энергоблоки на Литовской электростанции заменяются новыми парогазовыми установками. Новая атомная электростанция введена в эксплуатацию в третьем сценарии. Сочетание второй и третий сценарии является в четвертом сценарии: одного парогазовая установка установлена и атомная электростанция ставится после. Несмотря на значительные инвестиции в атомную электростанцию и парогазовой установки, энергетическая безопасность является самой высокой в четвертый сценарий.

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, энергетическая система, помехи, национальная энергетическая стратегия