

Neapibrėžtumo analizės taikymas energetikos ekonomikos vienmačių modelių uždaviniams

Vaclovas Miškinis*,

Inga Konstantinavičiūtė*,

Eugenijus Ušpuras,

Algirdas Kaliačka**,

Vytis Kopustinskas**

*Lietuvos energetikos institutas,
Energetikos kompleksinių tyrimų
laboratorija*,
Branduolinių įrenginių
saugos laboratorija**,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas*

Lietuvos energetikos institute neapibrėžtumo analizė taikoma jau keletą metų. Iki šiol tokia analizė buvo atliekama tik sudėtingoms techninėms sistemoms, įvertinant termohidraulinių skaičiavimo rezultatų neapibrėžtumus. Tačiau su skaičiavimo rezultatų neapibrėžtumais susiduriama daugelyje kitų sričių – pavyzdžiui, socialiniuose moksluose. Rengiant ekonominės raidos strategiją, tenka naudotis ekspertiniais įvertinimais (pvz., apie BVP augimą), kurie yra vieni didžiausių neapibrėžtumo šaltinių. Šiame darbe parodoma, kad neapibrėžtumo analizės taikymas energetikos ekonomikos vienmačių modelių uždaviniams leidžia gauti kur kas kokybiškesnius rezultatus. Energijos poreikių prognozei atlikti naudotas ekonometrinis modelis, leidžiantis įvertinti santykinę analizuojamos veiklos ir energijos kainų pokytį, vartotojų reakciją į pajamų arba nagrinėjamos veiklos ir kainų pokytį, galimybę padidinti energijos vartojimo efektyvumą ir kitus veiksnius. Atlikta jautrumo ir neapibrėžtumo analizė leido nustatyti anksčiau išvardytų parametru įtaką elektros energijos poreikių augimui, o tai įgalina ateityje tobulinti energijos poreikiams prognozuoti naudojamą metodiką.

Raktažodžiai: elektros energijos poreikių prognozė, ekonometrinis prognozavimo metodas, statistinė neapibrėžtumo ir jautrumo analizė

1. ĮVADAS

Lietuvos energetikos institute neapibrėžtumo analizė taikoma jau keletą metų. Tačiau iki 2005 metų tokia analizė buvo atliekama tik sudėtingoms techninėms sistemoms (įvertinant termohidraulinių parametrų kitimą Ignalinos atominės elektrinės reaktorių aušinimo kontūre, taip pat modeliuojant lėktuvo kritimą avarijos metu). Analizei atlikti pritaikyta Vokietijos kompanijos GRS (Gesellschaft fuer Anlagen und Reaktorsicherheit) sukurta metodologija [1] ir programų paketas SUSA [2]. Pasirinktoji metodologija įvertina įvesties duomenų, jų pritaikymo ir matematinio apdorojimo algoritmu neapibrėžtumo įtaką galutiniam skaičiavimo rezultatui. Metodologija paremta statistiniais metodais, remiasi subjektyviu neapibrėžtumus sąlygojančių veiksnių tikimybinio pasiskirstymo įvertinimu ir pateikia informaciją sprendimams priimti patogia forma. Termohidraulinės RBMK-1500 reaktorių avarių pasekmių neapibrėžtumo analizės rezultatai, atlikti naudojantis šia metodologija, skelbti moksliniuose straipsniuose ir tarptautinėse konferencijose [3–10].

Tačiau modeliavimo rezultatų neapibrėžtumo analizės metodologija gali būti taikoma ne tik termohidrauliniams procesams, bet ir socialiniams mokslams (pvz., energetikos ekonomikai). Rengiant bet kurią ekonomikos raidos strategiją, net naudojant pačius moderniau-

sius metodus ir skaičiavimo kodus, nepavyksta atsirišti nuo ekspertinių vertinimų (pvz., apie BVP augimą), kurie yra vieni didžiausių neapibrėžtumo šaltinių. Tokie ekspertiniai įvertinimai yra pasiskirstę apie vidutines reikšmes su tam tikru tikimybinio pasiskirstymu. Todėl norint gauti patikimus modeliavimo rezultatus turi būti įvertintas visas bet kurio modelio parametro kitimo diapazonas, o ne po vieną imamos šių parametrų diskrečios reikšmės. Taip pat turi būti įvertinta modelio parametrų įtaka galutiniams rezultatams, t. y. atlikta modeliavimo rezultatų neapibrėžtumo ir jautrumo analizė.

Šiame darbe pateikiamas neapibrėžtumo analizės taikymo pavyzdys energetikos ekonomikoje prognozuojant elektros energijos poreikius Lietuvoje. Jautrumo analizė atlikta ne tik naudojantis programų paketu SUSA, bet ir taikant Furje amplitudžių jautrumo testą (FAST).

2. ELEKTROS ENERGIJOS POREIKIŲ LIETUVOS ŪKIO ŠAKOSE PROGNOZAVIMAS

Daugelio pasaulio šalių patirtis rodo, kad elektros energijos poreikių augimui didelę įtaką turi ne tik makroekonominių rodiklių (BVP augimo ir ūkio struktūros) kitimas, bet ir kainų už kurą ir energiją augimas, atitinkama vartotojų reakcija ir kiti veiksniai. Taikant ekonometrinį metodą, bendruoju atveju energijos poreikiai bet

kuriuo metu gali būti aprašyti kaip funkcija [11], priklausanči nuo:

- prieš tai buvusių energijos sąnaudų dydžio,
- santykinio analizuojamos veiklos (kuri gali būti apibūdinama šalyje arba atskiroje ūkio šakoje sukuriama bendrąja pridėtine verte, namų ūkio pajamomis ir kitais rodikliais) ir energijos kainų pasikeitimo,
- vartotojų reakcijos į pajamų arba nagrinėjamos veiklos ir kainų pokytį,
- galimybių padidinti energijos vartojimo efektyvumą ar pakeisti vieną energijos rūšį kitomis.

Taigi elektros energijos poreikiai gali būti aprašyti funkcija:

$$E_{ij}(t) = E_{ij}(t-1)[V_i(t) / V_i(t-1)]^{\alpha(ij)} \times [P_j(t) / P_j(t-1)]^{\beta(ij)} \times C_{ij}; \quad (1)$$

čia E_{ij} – j -osios kuro ar energijos rūšies poreikiai i -ojoje ūkio šakoje;

i – ūkio ūkio indeksas, $i = 1, \dots, m$;

j – kuro (energijos) rūšies indeksas, $j = 1, \dots, n$;

l – energiją vartojančių įrenginių indeksas, $l = 1, \dots, L$;

t – laiko indeksas, $t = 2005, 2010, 2015, 2020, 2025$;

V_i – i -osios ūkio šakos ekonominė veikla;

P_j – j -osios energijos rūšies kaina i -ojoje ūkio šakoje;

$\alpha(ijl)$ – j -osios energijos rūšies, naudojamos i -osios ūkio šakos l -osios rūšies įrenginiuose, pajamų elastingumas;

$\beta(ijl)$ – j -osios energijos rūšies, naudojamos i -osios ūkio šakos l -osios rūšies įrenginiuose, kainų elastingumas;

C_{ij} – j -osios energijos rūšies, naudojamos i -osios ūkio šakos l -osios rūšies įrenginiuose, papildomas taupymo potencialas (efektas).

Atliekant detalius tyrimus ir rengiant kai kurių energijos rūšių prognozes, bendruoju atveju tikslinga įvertinti ir vienos energijos rūšies pakeitimo kitomis efektą.

Taikant anksčiau aprašytą ekonometrinį metodą [11], buvo sukurtas matematinis modelis ir atlikta elektros energijos poreikių Lietuvos ūkio šakose prognozė. Prognozė 2005–2025 metams atlikta, remiantis statistine informacija apie galutines elektros energijos sąnaudas 2004 m. Priimta, kad 2004 m. Lietuvos ūkio šakose suvartota 7650 GWh galutinės elektros energijos [12]. Šiems prognoziniams skaičiavimams atlikta jautrumo ir neapibrėžtumo analizė, remiantis anksčiau tik branduoliniėje energetikoje, atliekant termohidraulinius skaičiavimus, taikytais statistiniais metodais.

Bendruoju atveju skaičiavimo rezultatams turi įtakos pradiniai įvesties duomenys ir skaičiavimui naudojamo matematinio modelio tikslumas. Modelio tikslumas ir tinkamumas konkrečiu atveju gali būti keičiamas įtraukiant kitus papildomus veiksnius arba apibendrinant kai kuriuos rodiklius ir supaprastinant modelį, paliekant tik pačius reikšmingiausius veiksnius. Tikimybinei įvairių veiksnių įtakos elektros energijos poreikių dydžiui analizei atlikti buvo išskirti

penki veiksniai, kurie, kaip rodo anksčiau atlikti tyrimai, turi didžiausią įtaką galutiniams skaičiavimo rezultatams:

1. BVP augimo tempas;
2. Pajamų elastingumas;
3. Kainų augimo tempas;
4. Kainų elastingumas;
5. Taupymo efektas.

Siekiant nustatyti pasirinktų veiksnių įtaką, analizė atlikta trimis atvejais:

1. Įvertinant visus penkis anksčiau įvardytus veiksnius;
2. Nevertinant taupymo įtakos;
3. Nevertinant tikėtino kainų augimo įtakos.

Elektros energijos poreikių prognozių jautrumo ir neapibrėžtumo analizė šiame darbe atlikta taikant GRS kompanijos metodologiją [1] ir jos sukurtą programų paketą SUSA [2]. Pagal šią metodologiją [1], norint atlikti statistinę neapibrėžtumų ir jautrumų analizę, reikia atlikti aibę skaičiavimų su skirtingomis galutiniais skaičiavimo rezultatus sąlygojančių veiksnių kombinacijomis. Šios kombinacijos yra parengiamos pasitelkus programų paketą SUSA [2], įvertinant skaičiavimo rezultatus sąlygojančių veiksnių galimas kitimo ribas ir jų tikimybinių skirstinio dėsnį. Nagrinėjamų veiksnių bazinės reikšmės ir standartinis nuokrypis pateikti 1 lentelėje. Bazinė reikšmė – tai reikšmė, kuriai esant atlikti baziniai skaičiavimai. Baziniai skaičiavimai – tokie, kurie duoda labiausiai tikėtinius rezultatus. Dažniausiai tie rezultatai gaunami esant vidutinei parametro (veiksnių, sąlygojančio modeliavimo rezultatų) reikšmei (m). Bazinę reikšmę vertinant iš statistinių duomenų ji dažniausiai yra aritmetinis vidurkis, tačiau gali būti ir mediana. Kai žinoma bazinė parametro (veiksnių) reikšmė (m) ir standartinis nuokrypis (s), tai:

minimali parametro (veiksnių) reikšmė: $i = m - 2s$;

maksimali parametro (veiksnių) reikšmė: $a = m + 2s$.

Pasirinktas parametro (veiksnių) tikimybinių skirstinio dėsnis turi įtakos galutiniams modeliavimo rezultatams. Todėl šis skirstinio dėsnis pasirenkamas įvertinant anksčiau sukauptą patirtį. Kaip matyti 1 lentelėje, priimta, kad tokių veiksnių, kaip BVP ir kainų augimas, taupymo efektas, skirstinio dėsniai yra normalieji. Normaliojo skirstinio atveju intervalas tarp minimalios (i) ir maksimalios (a) reikšmės apima 95% visų galimų parametro (veiksnių) reikšmių. Bendruoju atveju (t. y. visų kitų skirstinių atveju), pagal Čebyševio taisyklę, šis intervalas apima 75% visų galimų parametro (veiksnių) reikšmių. Generuojant parametrų reikšmes pagal tolydžiuosius atsitiktinių dydžių skirstinius, būtina taikyti nupjautuosius skirstinius, t. y. nurodyti minimalias ir maksimalias parametrų vertes, nes ypač daug nutolusios nuo vidurkio reikšmės dažniausiai neturi fizikinės prasmės, o yra įmanomos tik teoriškai dėl skirstinio matematinės išraiškos.

Atliekant neapibrėžtumų ir jautrumo analizę pagal pasirinktą metodologiją, atliekamų skaičiavimų skaičius nepriklauso nuo skaičiavimo rezultatus sąlygojančių veiksnių skaičiaus, tačiau priklauso nuo norimų pasiekti

1 lentelė. Svarbiausių modelio parametų (veiksnių) skirstiniai

#	Parametras (veiksny)	Parametro (veiksni) ribos		Bazinė reikšmė (m)	Standartinis nuokrypis (s)	Parametro (veiksni) skirstinio dėsnis
		min reikšmė (i)	max reikšmė (a)			
Įvertinant visus penkis veiksnis						
1	BVP augimas %/metus	3	6	4,5	0,75	Normalusis
2	Pajamų elastingumas	0,8	0,95	0,875	0,043	Tolygusis
3	Kainų augimas %/metus	2	3,5	2,75	0,375	Normalusis
4	Kainų elastingumas	-0,25	-0,05	-0,15	0,065	Tolygusis
5	Taupymo efektas %/metus	-1,5	-0,5	-1,0	0,25	Normalusis
Nevertinant taupymo						
1	BVP augimas %	3	6	4,5	0,75	Normalusis
2	Pajamų elastingumas	0,8	0,95	0,875	0,043	Tolygusis
3	Kainų augimas %/metus	2	3,5	2,75	0,375	Normalusis
4	Kainų elastingumas	-0,25	-0,05	-0,15	0,065	Tolygusis
Nevertinant kainų augimo						
1	BVP augimas %/metus	3	6	4,5	0,75	Normalusis
2	Pajamų elastingumas	0,8	0,95	0,875	0,043	Tolygusis
3	Taupymo efektas %/metus	-1,5	-0,5	-1,0	0,25	Normalusis

skaičiavimo rezultatų statistinio patikimumo ribų. Minimalus skaičiavimų (modeliavimų) skaičius, reikalingas norint iš anksto nustatyti tikslumu apskaičiuoti rezultatų minimalias ir maksimalias vertes, nustatomas pagal Vilksio formulę [1]. Jei atliekant analizę yra svarbios tiek apatinė, tiek viršutinė skaičiavimo rezultatų riba, reikia naudoti dvipusį Vilksio kriterijų. Pagal šį kriterijų, atlikus 93 skaičiavimus, gautų rezultatų minimalių ir maksimalių verčių kreivės sudaro tolerancijos intervalą, į kurį su tikimybe 0,95 pateks 95% visų skaičiavimų minimalios ir maksimalios reikšmės. Su mažesniu skaičiavimų skaičiumi galima išsiversti, jei naudojamas viopusis Vilksio kriterijus, tačiau tuo metu apskaičiuojamas ne tolerancijos intervalas, o apatinė arba viršutinė tolerancijos ribos, t. y. vertinamos tik maksimalios arba minimalios (pagal uždavinį) galimos rezultato reikšmės. Ypač tikslūs tolerancijos intervalai nėra labai informatyvūs, nes yra pakankamai platūs ir reikalauja atlikti daug skaičiavimų. Pavyzdžiui, dvipusiam tolerancijos intervalui (0,99, 99%) apskaičiuoti reikėtų atlikti 662 skaičiavimus. Todėl tolerancijos intervalas (0,95, 95%) yra pakankamai geras kompromisas tarp tikslumo ir reikalingų skaičiavimų skaičiaus.

Energijos poreikių prognozės atveju reikia nustatyti, koks yra elektros energijos poreikių tolerancijos intervalas (t. y. svarbios yra tiek apatinė, tiek viršutinė ribos), todėl taikome dvipusį Vilksio kriterijų ir skaičiuojame tolerancijos intervalą. Vilksio kriterijaus pagalba apskaičiuoto tolerancijos intervalo interpretacija yra šiek tiek skirtinga, nei statistiniuose vertinimuose įprasto pasikliautinio intervalo interpretacija. Pasikliautinis intervalo lygmuo nusako, su kokia tikimybe tikroji parametro (pvz., vidurkio) vertė pateks į tą intervalą. Tuo tarpu

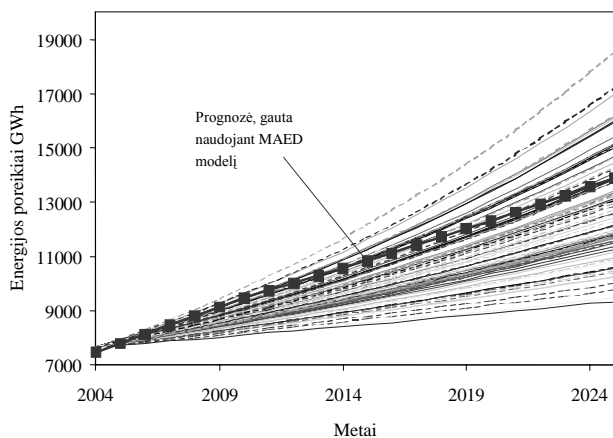
tolerancijos intervalas nusako atsitiktinio dydžio (mūsų skaičiavimų rezultato) skirstinio kvantilių ribas. Būtent todėl šis intervalas apibūdinamas dviem dydžiais, mūsų atveju tikimybe 0,95 ir patikimumu 95%. Patikimumas 95% reiškia, kad į tolerancijos intervalą pateks ne mažiau kaip 95% visų skaičiavimų rezultatų, o tikimybe 0,95 atitinka pasikliautinio lygmens pasikliautiniame intervale prasmę, t. y. su ne mažesne tikimybe nei 0,95, ne mažiau kaip 95% visų skaičiavimų rezultatų pateks į tolerancijos intervalą.

Siekiant gauti skaičiavimo rezultatus tolerancijos intervale (0,95, 95%), naudojant SUSA programinę įrangą buvo sudaryti 93 skirtingi modelio parametų (veiksnių, turinčių įtakos modeliavimo rezultatams) rinkiniai. Šie įvesties duomenų rinkiniai gauti atsitiktinai parenkant kiekvieną parametą pagal jo skirstinio dėsnį ir parametro galimo kitimo ribas. 1 paveiksle pavaizduota elektros energijos poreikių prognozė vertinant visų ekonometriniu modeliu aprašytų veiksnių įtaką. Šiame ir kituose paveiksluose energijos poreikiai ūkio šakose (galutinės šalies elektros sąnaudos) nustatyti įvertinant tirtų parametų (veiksnių), turinčių reikšmingą įtaką skaičiavimo rezultatams, galimas kitimo ribas. Visais atvejais buvo analizuoti 93 įvesties duomenų rinkiniai ir gautos atitinkamos elektros poreikių prognozės. Gautų rezultatų palyginimui pateikta studijoje [13] analizuoto pagrindinio scenarijaus prognozė, kuri gauta prognozavimui taikant imitacinį energijos poreikių analizės modelį MAED. Pastarasis modelis teikia daugiau galimybių išanalizuoti energijos suvartojimą ūkio šakose priklausomai nuo jų lemiančių veiksnių tarpusavio ryšių ir jų kitimo tendencijų. Tačiau modelyje MAED negalima tiesiogiai įvertinti vartotojų reakcijos į kainų augimą. Be

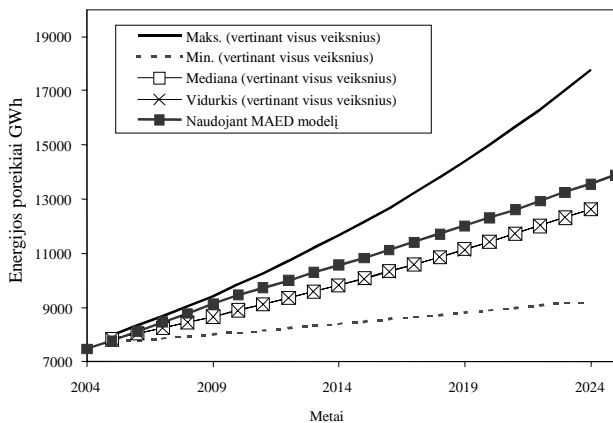
to, jame nagrinėjami rodikliai ir veiksniai kiekvienam nagrinėjamam laiko tarpui apibrėžiami vienareikšmiškai. Tačiau atliekant jautrumo analizę, įmanoma palyginti išsamiai įvertinti galimą įvairių veiksnių įtaką energijos poreikių prognozei.

Pagrindiniame šios studijos scenarijuje buvo numatyta, kad šalies BVP 2000–2010 kasmet padidės 4,7%, o vėliau ekonomikos augimas sulėtės iki vidutiniškai 3% (vidutinis šalies BVP augimas 2000–2025 m. sudaro 3,7% per metus). Nepaisant šiek tiek skirtingų prielaidų ir modeliavimo principų, taikytų imitaciniame MAED modelyje, perspektyvinių elektros energijos poreikių prognozės artimos medianai, kuri apibrėžia vidutinės tikėtinas analizuojamų parametrų (veiksnių) reikšmes (žr. 2 paveikslą).

Naudojantis gautais skaičiavimų rezultatais, 2 paveiksle parodytos apibendrintos poreikių ribos (maksimalus ir minimalus poreikių augimas) ir tikėtina vidutinė poreikių prognozė tuo atveju, kai vertinama visų veiksnių įtaka. Jeigu ateities elektros energijos poreikius apibūdintume tikimybinu skirstiniu, tai pagal skaičiavimo rezultatus 2,5% ir 97,5% kvantiliai būtų atitinkamai minimali ir maksimali skaičiavimų reikšmės su 95% pasiklovimo lygmeniu. Skaičiavimų rezultatai rodo, kad aritmetinis vidurkis ir mediana beveik sutampa.



1 pav. Elektros energijos poreikių prognozė vertinant visų ekonometriniu modeliu aprašytų, veiksnių įtaką

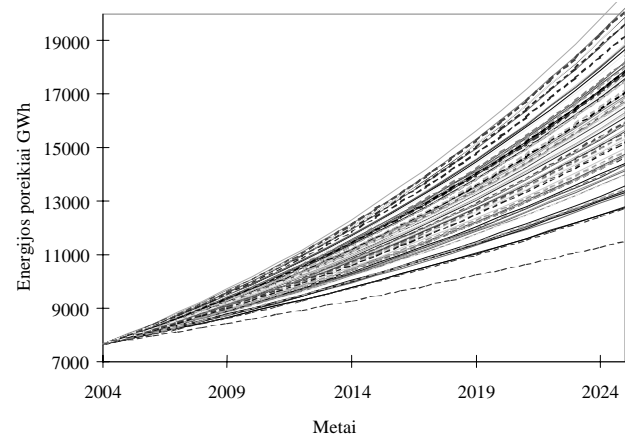


2 pav. Elektros energijos poreikių ribų, vidurkio ir medianos prognozė vertinant visų, ekonometriniu modeliu aprašytų, veiksnių įtaką

Tai praktiškai reiškia, kad skirstinys yra simetriškas vidurkio atžvilgiu, t. y. konkreti skaičiavimo reikšmė su panašia tikimybe gali būti tiek didesnė, tiek mažesnė už vidurkį. Šiuo atveju tiek mediana, tiek aritmetinis vidurkis vienodai gerai nusako skirstinio centrą.

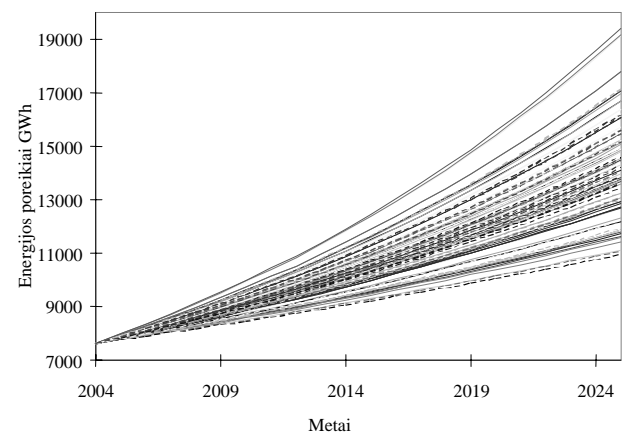
Didelę reikšmę energijos poreikių augimui turi taupymo efektas, kuris gali būti pasiektas diegiant visose ūkio šakose naujausius elektros prietaisus, o pramonėje, statyboje ir žemės ūkyje ir vykstant struktūriniams pokyčiams. Atliekant analizę buvo remtasi prielaida, kad taupymo efektas kasmet gali būti intervale (0,5% – 1,5%). Atliekant elektros energijos poreikių prognozę, bazinė taupymo efekto reikšmė buvo priimta lygi 1% per metus.

Lyginant gautus skaičiavimo rezultatus, matyti (3 pav.), kad elektros energijos poreikiai, kai taupymo efektas nevertinamas, 2025 m. būtų apie 20% didesni.



3 pav. Elektros energijos poreikių prognozė nevertinant taupymo

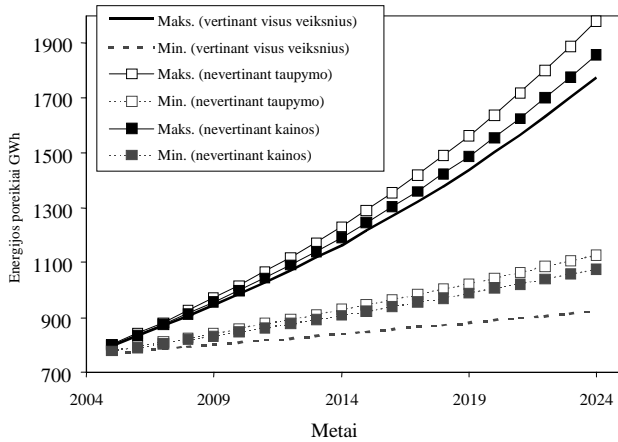
Atlikta analizė suteikė galimybes nustatyti ir elektros energijos tarifų augimo įtaką perspektyvinių elektros energijos poreikių dydžiui (4 pav.). Prielaidose buvo priimta, kad per artimiausius 20 metų elektros energijos tarifai gali padidėti 1,5–2 kartus, arba kasmet vidutiniškai 2–3,5%. Jei vartotojų reakcija būtų adekvati



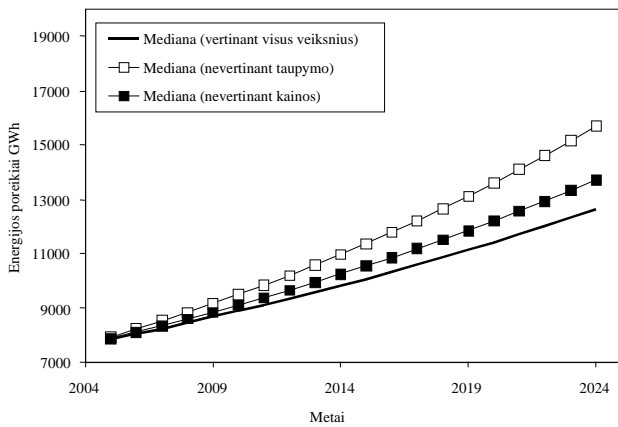
4 pav. Elektros energijos poreikių prognozė nevertinant kainų augimo

įvairių autorių atliktiems tyrimams, dėl didėjančių elektros tarifų 2025 m. elektros energijos Lietuvos ūkio šakose būtų suvartojama vidutiniškai 11,6% mažiau.

5 paveiksle pateiktų skaičiavimų rezultatai iliustruoja taupymo efekto ir vartotojų reakcijos į kainų augimą įtaką. Matyti, kad nevertinant taupymo stebimas sparčiausias poreikių augimas. Tai iliustruoja 6 paveiksle pateikti duomenys, kurie bet kuriuo laiko momentu apibūdina vartotojų reakciją į augančias elektros energijos kainas ir realiai egzistuojančias galimybes taupiau naudoti elektrą visose ūkio šakose.



5 pav. Elektros energijos poreikių viršutinės ir apatinės ribų prognozių palyginimas trimis skaičiavimo atvejais

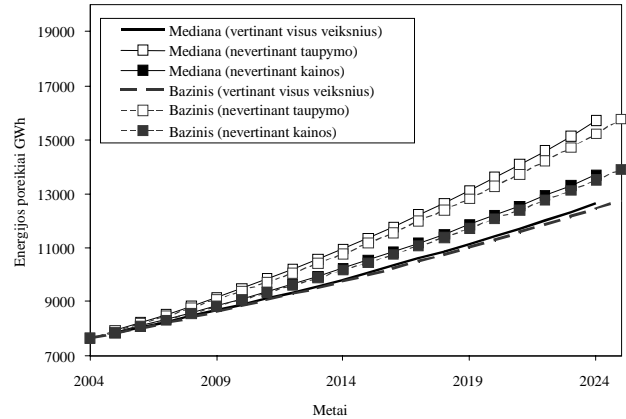


6 pav. Elektros energijos poreikių prognozės medianų palyginimas trimis skaičiavimo atvejais

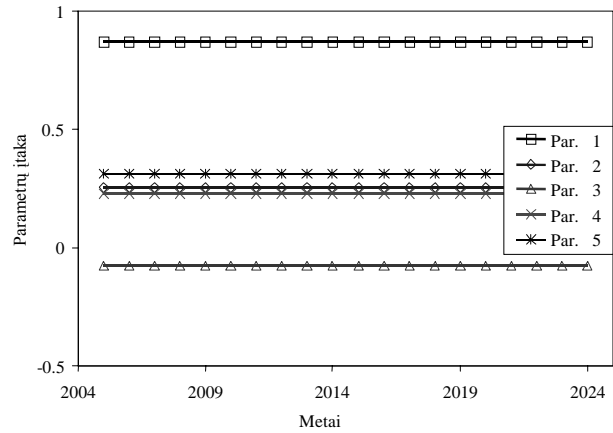
Kaip ir buvo galima tikėtis, bazinio skaičiavimo kreivė (apskaičiuota su 1 lentelėje pateiktomis bazinėmis (parametrų vidurkio) reikšmėmis) beveik sutampa su medianine kreive (žr. 7 paveikslą). Kaip minėta anksčiau, tai rodo simetrišką skaičiavimo rezultatų skirstinį.

3. PARAMETRŲ (VEIKSNIŲ, TURINČIŲ ĮTAKOS ELEKTROS ENERGIJOS POREIKIAMS) JAUTRUMO MODELIAVIMO REZULTATUI ANALIZĖ

Tam tikrų parametrų (veiksnių) įtakos galutiniam rezultatui (elektros energijos poreikiams Lietuvoje) jautrumo analizė (8 pav.) atlikta taikant SUSA programų paketą.



7 pav. Elektros energijos poreikių prognozės medianų trijų skaičiavimo atvejų palyginimas su baziniais skaičiavimais



8 pav. Kai kurių parametrų (veiksnių) įtaka galutiniam rezultatui (poreikių prognozei), vertinant visų, ekonometriniu modeliu aprašytų, veiksnių įtaką

Nustatyta, kad nagrinėtų veiksnių įtaka (jautrumas) skaičiavimo rezultatams buvo visą laiką tokia pati, t. y. nepriklausė nuo laiko (visuose grafikuose parametrų jautrumas vaizduojamas tiesėmis, lygiagrečiomis laiko ašiai). Tai nėra tipiškas determinuotų modelių parametrų jautrumo analizės rezultatas ir jį būtų galima paaiškinti šiomis dviem priežastimis:

1. Elektros energijos poreikių prognozės modelio prielaidose nebuvo įvertintas tikėtinas nagrinėtų rodiklių kitimas nagrinėjamu laikotarpiu;

2. Modelio parametrų (veiksnių) tarpusavio priklausomybė neturi jokios įtakos modeliavimo rezultatui, t. y. modelis aprašo žinomą modelio parametrų (veiksnių, turinčių įtakos elektros energijos poreikiams) funkciją.

Parametrų jautrumo rezultatų interpretacija yra tokia: kuo didesnė absoliutinių dydžių parametrų jautrumo koeficiento reikšmė, tuo tas parametras yra svarbesnis ir turi didesnę įtaką modelio rezultatui. Galima apskaičiuoti keletą dažniausiai naudojamų parametrų jautrumo koeficientų, tarp jų Spirmeno (Spearman) ranginį koreliacijos koeficientą, standartizuotą regresijos koeficientą ir kitus. Šiame darbe taikytas Spirmeno ranginis koreliacijos koeficientas, kuris parodo, kokią dalį nagrinėjamo rezultato neapibrėžtumo paaiškina kiekvienas iš įvesties parametrų. Čia reikėtų įvertinti, kad Spirme-

no ranginis koreliacijos koeficientas iš tikrųjų parodo bendrą suminę konkretaus parametro ir jo sąveikos su kitais parametrais įtaką nagrinėjamam rezultatui. Spirmeno ranginio koreliacijos koeficiento interpretacija darosi komplikuota, kai parametų tarpusavio priklausomybė yra didelė. Tuomet vertėtų šį koeficientą lyginti su standartizuotu regresijos koeficientu ar taikyti sudėtingesnius jautrumo analizės metodus – Sobolio indeksus, FAST ar kitus [14].

Apie galimybę jautrumo analizei naudoti Spirmeno ranginį koreliacijos koeficientą arba standartizuotą regresijos koeficientą galima spręsti pagal determinacijos koeficientą R^2 . Determinacijos koeficientas R^2 buvo nustatytas programų paketo SUSA pagalba ir jis yra pastovus ir lygus $R^2 = 0,962$ (vertinant visus veiksnius), $R^2 = 0,978$ (nevertinant taupymo), $R^2 = 0,962$ (vertinant kainos augimą). Kaip matyti, R^2 visais atvejais yra arti vieneto, o tai reiškia, kad tiesinės regresijos modelis yra gerai suderintas su duomenimis ir įvesties parametų neapibrėžtumas paaiškina didesnę dalį nagrinėjamo rezultato neapibrėžtumo.

Tam tikrų parametų (veiksnių) įtakos galutiniam rezultatui (elektros energijos poreikiams Lietuvoje) jautrumo analizė apibendrinta 2 lentelėje. Kaip minėta anksčiau, kuo didesnė absoliutinių dydžių parametų jautrumo reikšmė, tuo tas parametras yra svarbesnis ir turi didesnę įtaką modeliavimo rezultatui. 3 parametras (kainų augimas) turi neigiamą įtaką elektros energijos poreikių augimui. Tai reiškia, kad didėjant šiam parametru (augant kainai), elektros energijos bus suvartojama mažiau. Tam tikrų parametų įtakos laipsnis įvertinamas rangais. Parametro sąlygojimo rangas tuo aukštesnis, kuo rango skaičius žemesnis. Kaip matyti 2 lentelėje, bet kurio skaičiavimo atveju didžiausią įtaką modeliavimo rezultatams (elektros energijos poreikių prognozei) turi pirmasis parametras (BVP augimas). Šio parametro rangas bet kurio skaičiavimo atveju yra 1. Toliau pagal svarbą galutiniam rezultatui būtų penktasis parametras (taupymo efektas). Jei taupymo nevertinama, tai antroje vietoje pagal svarbą atsiduria ketvirtasis parametras (kainų elastingumas) ir t. t.

Tokiu būdu nustatyti tam tikrų parametų įtakos modeliavimo rezultatams laipsniai (rangai) gali praversti tobulinant naudojamą matematinį modelį. Akivaizdu, jog jei BVP augimas turi didelę įtaką elektros energijos po-

reikių kitimui, tai norint gauti tikslesnes elektros energijos suvartojimo ateityje prognozes, reikia tiksliau apibrėžti šį parametą. Tai reiškia, reikia stengtis kuo tiksliau, galbūt taikant sudėtingesnius modelius, prognozuoti BVP augimą, kartu siaurinant šio parametro kitimo ribas. Kita vertus, yra tokių parametų, kurių įtaka galutiniam rezultatui nėra didelė. Nagrinėjamo modelio atveju tokiais parametrais galima laikyti pajamų elastingumo ir kainų augimo veiksnius. Tai iš dalies lėmė ir palyginti siauras nagrinėtų veiksnių kitimo diapazonas. Taigi, prognozuojant elektros energijos poreikius, reikėtų atkreipti dėmesį į galimas šių parametų kitimo ribas ir patikrinti jų įtakos reikšmingumą.

Šiame straipsnyje nagrinėjamo modelio parametų tarpusavio priklausomybės įtakai nustatyti buvo atlikti skaičiavimai FAST metodu ir palyginti su Spirmeno ranginio koreliacijos koeficiento indeksu, pateiktu 2 lentelėje. FAST pradėtas taikyti 1973 m., o nuo 1990 m. buvo paskelbtos įvairios šio metodo modifikacijos [14]. Šiuo metu populiariausia yra išplėstinio FAST (EFAST, angl. *Extended FAST*) versija, kuri leidžia apskaičiuoti kiekvieno parametro jautrumo indeksą ir sumarinį parametru jautrumo indeksą jo priklausomybės modelyje su kitais parametrais. FAST metodo prigimtis remiasi funkcijos išdėstymo Furje integralais teorija, kuri kompiuterinio modelio parametru jautrumo analizės atveju reiškia, kad modelio rezultato dispersiją D galima užrašyti kaip sumą:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_i \sum_j D_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_k D_{ijk} + \dots + D_{1,2,\dots,n}. \quad (2)$$

Šios sumos dėmenų interpretacija yra paprasta: D_i reiškia modelio rezultato dispersijos dalį dėl parametro i , o $D_{ijk,\dots,q}$ reiškia modelio rezultato dispersijos dalį dėl parametru i, j, k, \dots, q tarpusavio priklausomybės modelyje. Parametru jautrumo indeksas S_i apskaičiuojamas kaip

$$S_i = \frac{D_i}{D} \text{ ir parodo santykinę rezultato dispersijos dalį}$$

dėl parametro i . Kuo didesnis S_i , tuo parametras i yra svarbesnis modelio rezultato neapibrėžtumui. Aukštesnės eilės jautrumo indeksai rodo įvairių parametru tarpusavio priklausomybės modelyje įtaką rezultato dispersijai. Ideali FAST analizė turi pateikti 2^n jautrumo indeksus (n – parametru skaičius), tačiau skaičiavimai daugelio praktinių modelių atveju yra pernelyg sudėtin-

2 lentelė. Svarbiausių modelio parametru (veiksnių, turinčių įtakos elektros energijos poreikiams) jautrumas modeliavimo rezultatams (Spirmeno ranginių koreliacijos koeficientu indeksai)

Parametras (veiksny)	Įtaka		
	įvertinant visus penkis veiksnis	nevertinant taupymo augimo	nevertinant kainų
1 BVP augimas	0,868	0,906	0,832
2 Pajamų elastingumas	0,254	0,106	0,251
3 Kainų augimas	-0,077	-0,025	-
4 Kainų elastingumas	0,228	0,395	-
5 Taupymo efektas	0,311	-	0,484

3 lentelė. Svarbiausių modelio parametru jautrumo indeksų palyginimas taikant Spirmeno ranginį koreliacijos koeficientą ir išplėstinį FAST metoda

Parametras (veiksny)	Jautrumo indeksas (vertinant visus veiksnius)		
	Spirmeno rang. kor. koef.	S_i (FAST)	$TS(i)$, (FAST)
1 BVP augimas	0,868	0,696	0,721
2 Pajamų elastingumas	0,254	0,086	0,095
3 Kainų augimas	-0,077	0,004	0,022
4 Kainų elastingumas	0,228	0,073	0,084
5 Taupymo efektas	0,311	0,112	0,126

gi. Todėl skaičiuojamas suminis parametro jautrumo indeksas dėl priklausomybės modelyje su kitais parametrais. Šis suminis indeksas $TS(i)$ apskaičiuojamas kaip suma visų indeksų S_i, j, \dots, q , kuriuose dalyvauja parametras i . Jei $TS(i)$ yra gerokai didesnis, nei S_p , tai tuomet rezultato neapibrėžtumas yra labai veikiamas parametro i tarpusavio priklausomybės su kitais parametrais. FAST yra vienas geriausių ir labiausiai vertinamų jautrumo analizės metodų, leidžiančių analizuoti tiek tiesinius, tiek netiesinius modelius, tačiau pagrindinis jo trūkumas yra tai, kad reikalingas didelis įvesties duomenų rinkinių skaičius tokiems skaičiavimams atlikti ir rinkinių skaičius priklauso nuo parametru skaičiaus. Sudėtingų modelių atveju ir esant dideliame parametru skaičiui šis FAST trūkumas gali būti pagrindine taikymo kliūtimi.

Pritaikius išplėstinį FAST metodą elektros energijos poreikių analizei, gauti rezultatai pateikti 3 lentelėje. Skaičiavimai atlikti "SimLab 2.2" kompiuteriniu paketu [15]. Jautrumo indeksai apskaičiuoti naudojant 10000 dydžio statistinę imtį. Tokiu būdu apskaičiuoti jautrumo indeksai palyginti su Spirmeno ranginių koreliacijos koeficientų indeksais, apskaičiuotais naudojantis SUSA programų paketu ir pateiktais 2 lentelėje.

Kaip ir galima buvo tikėtis, elektros poreikių prognozės modelio (1) atveju parametru tarpusavio priklausomybės modelyje įtaka rezultato neapibrėžtumui nėra didelė (indeksai S_i ir $TS(i)$ yra panašūs), ir parametru jautrumo reitingai pagal Spirmeno ranginės koreliacijos koeficientą ir FAST metodą sutampa. Šis sutapimas paaiškinamas ir tuo, kad determinacijos koeficientas $R^2 = 0,962$ yra tikrai aukštas ir rodo stiprią tiesinę modelio elgseną. FAST rezultatai suteiktų papildomos informacijos apie modelio parametru jautrumą, jei modelio tiesiškumas nebūtų toks stiprus.

4. IŠVADOS

Neapibrėžtumų analizės metodologija, anksčiau naudota tik sudėtingoms techninėms sistemoms, pritaikyta energetikos ekonomikoje. Šiame straipsnyje pristatyta jautrumo ir neapibrėžtumo analizė Lietuvos elektros energijos poreikių ūkio šakose prognozei. Prognozuojant buvo naudojama ekonometrinio metodo, leidžiančiu įvertinti ūkio augimo ir energijos kainų santykinis pokyčius, vartotojų reakciją į pajamų arba nagrinėjamos veik-

los ir kainų pokyčius ir galimybę padidinti energijos vartojimo efektyvumą, o jautrumo ir neapibrėžtumo analizė atlikta naudojantis GRS kompanijos sukurtu programų paketu SUSA.

Jautrumo ir neapibrėžtumo analizei, naudojantis tikimybiniais metodais, atlikti buvo išskirti atskiri veiksniai (BVP augimo tempas, pajamų elastingumas, kainų augimo tempas ir kainų elastingumas, taupymo efektas), kurie turi didžiausią įtaką galutiniams skaičiavimo rezultatams. Atlikta analizė leido nustatyti elektros energijos poreikių ribas 2005–2025 metais ir palyginti bazinio skaičiavimo (atlikto su vidutinėmis veiksniais reikšmėmis) rezultatus su MAED modeliu gauta prognoze. Nepaisant šiek tiek skirtingų prielaidų ir modeliavimo principų, taikytų imitaciniame MAED modelyje, abi prognozės gerai sutampa. Ekonometrinio metodu atlikta prognozė rodo, jog didžiausias elektros energijos poreikių augimas būtų nevertinant taupymo. Kai kurių veiksnų, turinčių įtakos elektros energijos poreikiams, jautrumo modeliavimo rezultatams analizė, atlikta tiek naudojantis programų paketu SUSA, tiek išplėstinio FAST metodu, parodė, jog didžiausią įtaką elektros energijos poreikiams turi BVP augimo tempas. Tuo tarpu pajamų elastingumo ir kainų augimo įtaka galutinam rezultatui yra ženkliai mažesnė.

Atliktos analizės rezultatai įgalina parengti rekomendacijas energijos poreikių prognozei naudojamam modeliui, sukurtam ekonometrinio metodo pagrindu, patobulinti. Kadangi BVP augimas labai veikia elektros energijos poreikius, tai norint gauti tikslesnes elektros energijos suvartojimo ateityje prognozes, reikia tiksliau prognozuoti šį parametru, t. y. „susiaurinti“ BVP augimo parametro galimo kitimo ribas. Tuo tarpu pajamų elastingumo ir kainų augimo įtakos reikšmingumą reikėtų analizuoti papildomai.

Gauta 2006 05 23

Literatūra

1. Glaeser H. G., Uncertainty Evaluation of Thermal-Hydraulic Code Results // Proceedings of Int. Meeting on "Best-Estimate" Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000). Washington DC, USA, 2000.
2. Kloos M., Hofer E., SUSA Version 3.2. User's Guide and Tutorial. GRS, Garching, 1999.

3. Vileiniškis V., Kaliatka A. Uncertainty and sensitivity analysis of MCPs' trip events at Ignalina NPP // Nuclear Engineering and Design. 2003. Vol. 224. P. 213–225.
4. Urbonas R., Kaliatka A., Ušpurus E. Comparison of two modern approaches for accident analysis // Kerntechnik. 2004. Vol. 69. No. 3. P. 92–98.
5. Ušpurus E., Kaliatka A. Safety analysis of RBMK-1500 using best estimate approach // Proceedings of 6th Int. Conference on Simulation Methods in Nuclear Engineering, Montreal, Quebec, Canada, 12–15 October 2004. P. 1–12.
6. Urbonas R., Kaliatka A., Ušpurus E., Vileiniskis V. RBMK-1500 Accident Analysis Using BE Approach // Proceedings of Int. Meeting on Updates in Best Estimate Methods in Nuclear Installation Safety Analysis. Washington D. C., USA, 14–18 November 2004. P. 177–184.
7. Калятка А., Вайшнорас М. Анализ неопределенности и чувствительности термодинамических переходных процессов на атомных электростанциях // Сборник научных трудов СНИЯЭиП. Севастополь: СНИЯЭиП. 2004. Вып. 12. С. 62–72.
8. Ušpurus E., Rimkevicius S., Kaliatka A. Best-estimate approach for Ignalina NPP licensing process // ICON13-50402, Proceedings of 13th International Conference on Nuclear Engineering, Beijing, China, May 16–20, 2005, P. 1–8.
9. Alzbutas R., Augutis J., Krikštolaitis R., Ušpurus E., Uncertainty and Sensitivity Analysis in Aircraft Crash Modelling // Proc. of the 3rd Safety and Reliability International Conference KONBiN'03. Gdynia, Poland, 2003. V2. P. 267–274.
10. Alzbutas R., Augutis J., Urbonas R. Risk and sensitivity analysis in relation to external events // Proc. of Int. Conference on Nuclear Energy in Central Europe. Portorož, CD308: 2001. P. 1–14.
11. Miškinis V. Energy demand forecasting in economies in transition // Energy Studies Review. 2002. Vol. 10. No. 2. P. 100–120.
12. Statistikos departamentas. Kuro ir energijos balansas-2004. Vilnius, 2005. P. 39.
13. Energy supply options for Lithuania. A detailed multi-sector integrated energy demand, supply and environmental analysis. International Atomic Energy Agency-TECDOC-1408, September 2004.
14. Santelli A., Chan K., Scott E., Sensitivity analysis. John Wiley & Sons, 2000.
15. SimLab 2.2 Reference manual, European Commission, DG-JRC, IPSC, 2005.

SUTRUMPINIMAI

BVP – bendrasis vidaus produktas

GRS – Vokietijos kompanija (Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit)

MAED – energijos poreikių analizės modelis

RBMK – rusiška abreviatūra (Didelės galios kanalinis reaktorius)

SUSA – programinė įranga (Software System for Uncertainty and Sensitivity Analysis)

ŽYMĖJIMAI

a – maksimali parametro reikšmė

C_{ijl} – j -osios energijos rūšies, naudojamos i -osios ūkio šakos l -osios rūšies įrenginiuose, papildomas taupymo potencialas (efektas)

D – modelio rezultato dispersija

D_i – modelio rezultato dispersija dėl parametro i dispersijos

$D_{ijk\dots q}$ – modelio rezultato dispersija dėl parametrų i, j, k, \dots, q tarpusavio priklausomybės modelyje

E_{ij} – j -osios kuro ar energijos rūšies poreikiai i -ojoje ūkio šakoje

i – ūkio šakos indeksas, $i = 1, \dots, m$; minimali parametro reikšmė

j – kuro (energijos) rūšies indeksas, $j = 1, \dots, n$

P_{ij} – j -osios energijos rūšies kaina i -ojoje ūkio šakoje

l – energiją vartojančių įrenginių indeksas, $l = 1, \dots, L$

m – bazinė parametro reikšmė

s – standartinis nuokrypis

t – laiko indeksas

V_i – i -osios ūkio šakos ekonominė veikla

$\alpha_{(ijl)}$ – j -osios energijos rūšies, naudojamos i -osios ūkio šakos l -osios rūšies įrenginiuose, pajamų elastingumas

$\beta_{(ijl)}$ – j -osios energijos rūšies, naudojamos i -osios ūkio šakos l -osios rūšies įrenginiuose, kainų elastingumas

**Vaclovas Miškinis, Inga Konstantinavičiūtė,
Eugenijus Ušpurus, Algirdas Kaliatka,
Vytis Kopustinskas**

APPLICATION OF THE ANALYSIS OF UNCERTAINTY TO ONE-DIMENSIONAL MODELS OF ENERGY ECONOMY

Summary

Uncertainty analysis has been done for some years at the Lithuanian Energy Institute, but only for complex technical systems, estimating the uncertainty of results of thermal hydraulic calculations. However, uncertainties of calculations occur also in many other areas, for example, in social sciences. For elaboration of the strategy of economic development it is necessary to use expert estimations (for example, the growth of gross domestic product) which are the most probable sources of uncertainties. In this work, it is shown that application of uncertainty analysis to one-dimensional models of energy economy allows to receive better results. For the energy consumption prediction we use an econometric model allowing to estimate relative changes in the activity under analysis and the prices of energy, reaction of consumers to a change of income or economic activity and prices, to improve the efficiency of energy consumption, etc. The analysis of sensitivity and uncertainty has allowed to determine the influence of the above parameters on the growth of electricity demand and thus to improve the methodology used for forecasting energy demand in the future.

Key words: energy demand forecasting, econometric method of forecast, statistical analysis of sensitivity and uncertainty

**Вацловас Мишкинис, Инга Константиновичюте,
Еугениюс Ушпурас, Альгирдас Калятка,
Витис Копустинскас**

**ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ДЛЯ ЗАДАЧ ОДНОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
ЭКОНОМИКИ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

Резюме

В Литовском энергетическом институте анализ неопределенностей применяется уже несколько лет. Ранее такой анализ осуществлялся только для сложных технических систем, при оценке неопределенностей результатов термодинамических расчетов. Однако неопределенность расчетов встречается и во многих других областях, например, в социальных науках. При подготовке стратегии экономического развития приходится использовать экспертные оценки (например, роста валового национального продукта), которые являются наиболее

вероятными источниками неопределенностей. В настоящей работе показано, что анализ неопределенностей, применяемый в задачах одномерных моделей экономики в энергетике, позволяет получить более качественные результаты. При прогнозе энергопотребления использовалась эконометрическая модель, позволяющая оценить относительные изменения исследуемой деятельности и цен на энергию, реакцию потребителей, возможности повысить эффективность использования энергии и прочие факторы. Выполненный анализ чувствительности и неопределенности позволил определить влияние вышеназванных параметров на рост потребностей в электроэнергии, что позволит в будущем совершенствовать методику, применяемую для прогнозирования потребности в энергии.

Ключевые слова: прогноз потребности в электроэнергии, эконометрический метод прогноза, статистический анализ чувствительности и неопределенностей