

# Vėjo energetikos plėtros techninio ir ekonominio pagrindimo patikslinimas

Aleksandras Paulauskas,

Matas Tamonis

*Lietuvos energetikos institutas,  
Regionų energetikos plėtros  
laboratorija, Breslaujos g. 3,  
LT-44403 Kaunas  
El. paštas: mts@mail.lei.lt*

Lietuvos vėjo energetikos galimybes ribojantys veiksniai dažniausiai siejami su nepakankamu vėjo techniniu potencialu ir elektros gamybos iš vėjo ekonomiškumu. Tai tam tikra dalimi lėmė vėjo matavimų hidrometeorologinėse stotyse apribojimas 10 m aukščiu. Atlikti vėjo parametrų matavimai 15 ir 30 metrų aukščiuose pajūryje davė pagrindo plėtoti vėjo energetiką Vakarų Lietuvoje. Tačiau sukurti nauji vėjo techninio potencialo įvertinimo metodai įgalina pagrįsti išvadą, kad didėjant vėjo elektrinių aukščiu didesnioji šalies teritorijos dalis gali būti pritaikyta elektros energijai iš vėjo gaminti. Vėjo ir atominų elektrinių ilgalaikių ribinių kaštų analizė parodė, kad jos yra konkurencingos atviroje elektros rinkoje. Tai įgalina pagrįsti plataus masto vėjo elektrinių įtraukimą į elektros gamybos rinką, ypač atsižvelgiant į elektros energijos tiekimo rizikos padidėjimą uždarius Ignalinos atominę elektrinę po 2009 metų.

Pagrindinis šio straipsnio tikslas – patikslinti Lietuvos vėjo energetikos plėtros techninį ir ekonominį pagrindimą, ekstrapolijuojant sukaupus vėjo greičio matavimų duomenis į dabartinių vėjo elektrinių aukštį ir panaudojant ilgalaikių ribinių kaštų įvertinimo metodologiją jų konkurencingumui įvertinti atviroje elektros rinkoje.

**Raktažodžiai:** vėjo ištekliai, vėjo parametrai, vėjo elektrinė, įdiegta galia, vėjo energijos techninis potencialas, vėjo energetika, darnus vystymasis, regioninis planavimas, ilgalaikiai ribiniai kaštai

## 1. BENDRAS VĖJO ENERGETIKOS RAIDOS APIBŪDINIMAS

Lietuvos nacionalinėje energetikos strategijoje teigiama, kad Lietuva įgyvendins savo įsipareigojimus Europos Sąjungai (ES) dėl atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo elektros energijai gaminti. Per artimiausią penkmetį statant vėjo elektrines (VE), mažas hidroelektrines ir biokurą naudojančias termofikacines elektrines, atsinaujinančių išteklių dalis bendrame elektros energijos gamybos balanse 2010 m. sudarys daugiau kaip 7%, o analizuojamojo laikotarpio pabaigoje (2025 m.) jų indėlis turi padidėti iki 10%. Numatoma, kad iki 2010 m. bus įgyvendinta bendros 200 MW galios vėjo elektrinių statybos programa ir parengta nauja vėjo energijos panaudojimo Lietuvoje ilgalaikė programa [1, 2].

Vėjo energetikos raidą ir perspektyvas Lietuvoje sąlygoja objektų ir subjektyvūs veiksniai:

1. Tradicinės energetikos naudojamų kietojo, skystojo, dujinio kuro išteklių pasiekiamumo / prieinamumo mažėjimas dėl kylančių jų kainų ir politinės konjunkūros.

2. Vėjo energetikos prieinamumo didėjimas, kuriant vis efektyvesnius vėjo elektrinių sprendimus, įgalinančius mažinti jų pagalbą gaminamos energijos savikainą.

3. Elektros gamybos decentralizavimas, leidžiantis padidinti elektros tiekimo patikimumą bei įgalinantis užtikrinti vartotojų nepriklausomybę nuo stambių elektros gamintojų.

4. Klimato kaitos masto raiška ir jos pasekmių suvokimas bei pažangi Jungtinių Tautų ir ES politika atsinaujinančių energijos šaltinių plėtros srityje.

5. Darnaus vystymosi metodologijos ir investicijų valdymo kultūros didėjimas, įgalinantis pasirinkti mažiau rizikingas atsinaujinančios energetikos rūšis.

6. Mokslinių tyrimų organišką įtraukimą į visas energetikos sektoriaus plėtros sritis.

Lietuvos vėjo energetikos raida gana vangiai. Nuo pirminio galimybių įvertinimo, teisinės aplinkos formavimo iki pirmųjų projektų įgyvendinimo praėjo daugiau nei dešimtmetis. Vėjo energijos techninio potencialo tyrimai šalyje turi daugiau nei 10 metų patirtį [3–12]. Europos vėjo atlasas buvo sudarytas dar 1989 m. [13]. Vykdamas Jungtinių Tautų plėtros programos (UNDP) Baltijos šalių vėjo energetikos plėtros programos rengimo darbus 2000 m. buvo iškeltas uždavinys įvertinti Lietuvos vėjo energijos generavimo potencialą ir pasirinkti vietas, kuriose toliau būtų plėtojama vėjo energetika [14]. Šio energetikos sektoriaus skatinimo sistemos sukūrimas bei prioritetinių zonų jos plėtrai įteisinimas užtikrino vėjo energetikos plėtros esminį lūžį [15–17].

Lietuvos energetikos naujadaros požiūriu vėjo energetikai teko naujos kokybės nešėjo vaidmuo, kurio plėtra perėjo neigimo, kritiško egzaminavimo ir galų gale – pripažinimo pakopas [18]. Pastaruoju metu vėjo energetika susiduria su naujais iššūkiais, susietais su elektros energijos tiekimo rizikos padidėjimu uždarius Ignalinos atominę elektrinę po 2009 metų.

Tolesnis vėjo energetikos raidos formavimas turėtų būti siejamas su šio energetikos sektoriaus ilgalaikių ribinių kaštų įvertinimu bei techninio potencialo patikslinimu, ekstrapoluojuojant sukauptus vėjo greičio matavimų duomenis į dabartinių vėjo elektrinių aukštį.

## 2. VĖJO ENERGETIKOS TECHNINIO POTENCIALO PATIKSLINIMAS

Esminis vėjo energijos techninio potencialo įvertinimo parametras yra vidutinis metinis vėjo greitis, kurio dydis nustatomas atliekant daugiamečius vėjo parametrų matavimus konkrečioje vietovėje. Pagrindinis duomenų šaltinis – meteorologijos stočių vidutinio metinio vėjo greičio matavimo skirtingose Lietuvos vietovėse duomenys bei kitų Europos šalių skelbiami duomenys.

Pirminis vėjo energijos techninio potencialo įvertinimas Lietuvoje buvo atliekamas remiantis hidrometeorologijos stočių vėjo greičio ir krypties matavimais 10 m aukštyje. Buvo nustatyta, kad gana nedidelis (5,0–5,5 m/s) vidutinis metinis vėjo greitis būdingas tik siaurai pajūrio juostai. Judant gilyn į kontinentą prie rytinės šalies sienos šis pagrindinis vėjo energijos techninį potencialą atspindintis parametras yra trimis metrais per sekundę mažesnis [4]. Tad buvo daroma išvada, kad menki vėjo parametrai nesukuria palankių pramoninės vėjo energetikos plėtros galimybių.

1996 m. atlikti vėjo parametrų matavimai Būtingėje 15 ir 30 m aukščiuose, taip pat atraminiai matavimai Melnragės hidrometeorologijos stotyje 10 m aukštyje įgalino priartinti vėjo energijos techninio potencialo įvertinimą prie faktinio vėjo elektrinių rotorius ašies aukščio bei, atsižvelgus į 14 metų trukmės vėjo matavimus hidrometeorologijos stotyse, pagrįsti vėjo parametrų prognozes 20 metų perspektyvoje [19]. Perskaičiuotas į 50 m aukštį vidutinis metinis vėjo greitis sudarė 7,4 m/s ir prilygo analogiškiems parametrams aktyviai vėjo energetiką plėtojančiose kaimyninėse šalyse Danijoje, Vokietijoje, Švedijoje. Jis suteikė pagrindo pradėti pramoninių vėjo elektrinių projektavimo darbus. 1997 m. buvo parengtas pirmojo Lietuvoje  $6 \times 600$  kW vėjo elektrinių parko Būtingėje investicinis projektas, užtikrinantis 92% reikalingų užsienio investicijų pritraukimą [5]. Valstybės įmonei „Lietuvos energija“ reikėjo pasirūpinti tik parko prijungimu prie elektros tinklo. Nacionalinėje energetikos strategijoje buvo numatyta šį projektą įgyvendinti 2000 metais. Tačiau pirmasis vėjo elektrinių parko projektas nebuvo įgyvendintas.

Vykdamas Jungtinių Tautų plėtros programos (UNDP) Baltijos šalių vėjo energetikos plėtros programos rengimo darbus 2000 m. buvo išskeltas uždavinys įvertinti vėjo energijos generavimo potencialą visoje Lietuvos teritorijoje ir pasirinkti vietas, kuriose toliau būtų vystoma vėjo energetika. Atliktų vėjo matavimų Kretingoje, Vilkyčiuose ir Tauragėje bei daugiamečių matavimų 10 m aukštyje duomenų bazės pagrindu 2002 m. buvo sudarytas Lietuvos vėjo 50 m aukštyje atlasas [20]. Sudarant žemėlapi buvo laikoma, kad sąlygos yra standartinės ir paviršiaus lygumas atitinka 2 šiurkštumo klasę (10 cm ilgio šiurkštumas). Dėl nevienodų vėjo matavimo skirtingose meteorologijos stotyse sąlygų, neįvertinto žemės paviršiaus šiurkštumo bei kliūčių atlaso kūrėjai pataria juo naudotis tik skirtingų Lietuvos regionų vėjingumo vertinimui, atsižvelgiant į kitus tokius svarbius veiksnius, kaip vietovės aukštis, atstumas nuo jūros, atvirumas

ir pan. Pateiktuose žemėlapiuose neužtikrinamas itin didelis rezultatų tikslumas. Atlaso kūrėjai teigia, jog pateiktų duomenų paklaida yra apie 5–10%. Dėl prieštaringų duomenų iš kelių skirtingų šaltinių ir kai kur per didelių atstumų tarp matavimo stočių didesnio tikslumo būtų sunku pasiekti. Lyginant vėjo atlaso duomenis su kitais šaltiniais buvo pastebėta, kad kalvotose vietose vidutinis vėjo greitis paprastai didesnis 10–15%, o ypač tinkamose vietose net 30%. Taigi praktinė parengto vėjo atlaso nauda yra labiau rekomendacinio pobūdžio. Jo nepakanka nei regioniniams vėjo energetikos plėtros planams rengti, nei investicijoms į vėjo elektrinės statybą konkrečioje vietoje pagrįsti.

Pagal nusistovėjusią Europoje vėjo elektrinių statybos finansavimo tvarką, bankai reikalauja pateikti ne mažiau nei vienerių metų vėjo matavimų duomenis numatomo įrengti vėjo elektrinių parko vietoje ne didesniu nei 1 km atstumu. Tokiems matavimams reikia specialios sertifikuotos įrangos, tikslių matavimų, duomenų apdorojimo specialiomis programomis bei atsakingo įvertinimo, kurį dar turi patvirtinti du nepriklausomi ekspertai.

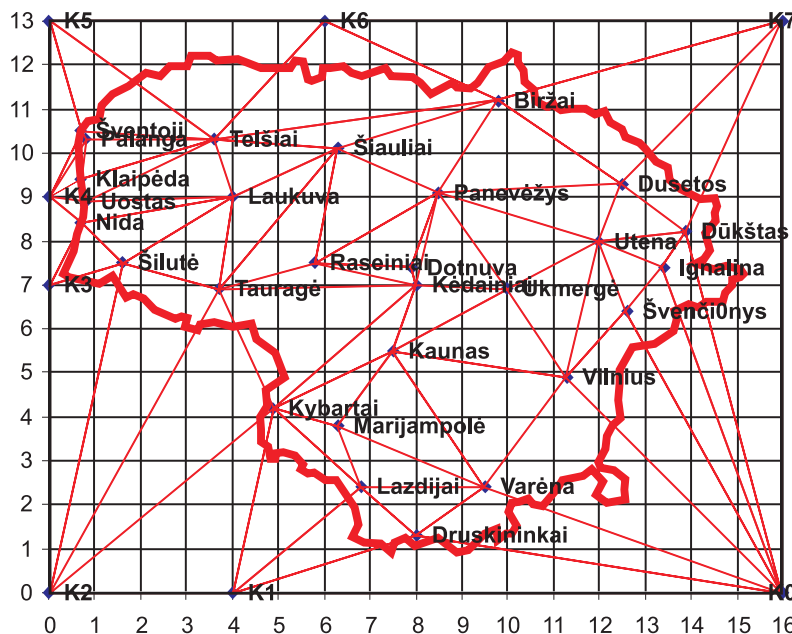
Taikant matematinio modeliavimo metodus galima pagreitinti VE projektų įgyvendinimą ir sumažinti pradines investicijas. Tuo tikslu greta fizinių vėjo parametrų matavimų konkrečioje vietovėje Lietuvos sąlygomis dar naudojami įvairūs matematiniai modeliai, siejantys meteorologijos stočių ir vėjo atlaso duomenis su VE atstumu nuo jūros ir aukščiu virš jūros lygio [7, 8, 12]. Siekiant sukurti monitoringo sistemą vėjo energijos teritoriniam pasiskirstymui priklausomai nuo VE aukščio, būtina pradėti kaupti geografinės vietovės tinkamumo vėjo energetikai plėtoti duomenų bazę (DB) naudojant vieningus jų ekstrapoliavimo principus konkrečiam atvejui.

Regioninio vėjo energetikos planavimo poreikiams bei siekiant paspartinti potencialių vėjo elektrinių galimybių studijų rengimo darbus, svarbu turėti lankstų matematinį modelį bei adekvačią programinę įrangą, kuri padėtų pagreitinti ir palengvinti modeliavimo procedūras bei patikimai įvertinti statomų vėjo elektrinių parkų techninius ir ekonominius parametrus, investicijų apimtį ir jų atsipirkimo laikotarpį. Galima tikėtis, kad dabar naudojamų matematinų modelių išplėtimas ir apibendrinimas viešos ir vieningos vėjo išteklių duomenų bazės pagrindu pravers kuriant ateities vėjo energetikos projektus Lietuvoje ir bus naudingas projektuotojams, investuotojams bei savivaldos institucijoms.

Geografinės vietovės tinkamumo vėjo energetikai plėtoti įvertinimui siūlomi šie principai:

- vėjo parametrų nustatymas pagal vėjo greičio matavimų rezultatus trijose artimiausiose meteorologijos stotyse, įvertinant konkrečios VE vietovės parametrus;
- meteorologijos stočių vietovės vėjo parametrų, įskaitant šiurkštumo klasę / šiurkštumo ilgį bei Weibull'o parametrų, įvertinimo patikslinimas;
- skaičiuotino vėjo greičio suderinamumas su nepriklausomai atliktų matavimų duomenimis;
- nuolatinis vėjo parametrų DB kaupimas įtraukiant duomenis iš veikiančių VE.

Šios naujos metodikos vėjo parametrų DB sudaryti panaudoti šalyje veikiančių 28 meteorologijos stočių ar vėjo matavimo vietovių skelbiami vidutinio vėjo greičio ilgamečių matavimų duomenys. Papildomai panaudojus laisvai pasirinktus 8 atraminis vėjo parametrų taškus už šalies ribų, visa Lietuvos teritorija buvo padengta 63 trikampiiais plotais (1 pav.). Lietuvos



1 pav. Lietuvos teritorijos suskirstymas į 63 trikampius plotus vėjo parametrų nustatyti

žemėlapis buvo padengtas tinkleliu (13 × 16). Šitaip visa šalies teritorija buvo padalyta į 208 sektorius (kas 25 km).

Neturint oficialių duomenų, kuriant DB daugiausia dėmesio skirta šiuurkštumo ilgiui meteorologijos stotyse įvertinti. Vėjo greičio priklausomybė nuo aukščio bet kurioje meteorologijos stotyje nustatoma pagal formulę:

$$V = V(ms) \frac{\ln\left(\frac{H}{sr}\right)}{\ln\left(\frac{H(ms)}{sr}\right)}; \tag{1}$$

čia  $V$  – vėjo greitis aukštyje  $H$ ;  $V(ms)$  – vidutinis vėjo greitis meteorologijos stoties aukštyje;  $H(ms)$  – žinomas meteorologijos stoties matavimų aukštis;  $H$  – aukštis virš žemės paviršiaus;  $sr$  – žemės paviršiaus šiuurkštumo ilgis.

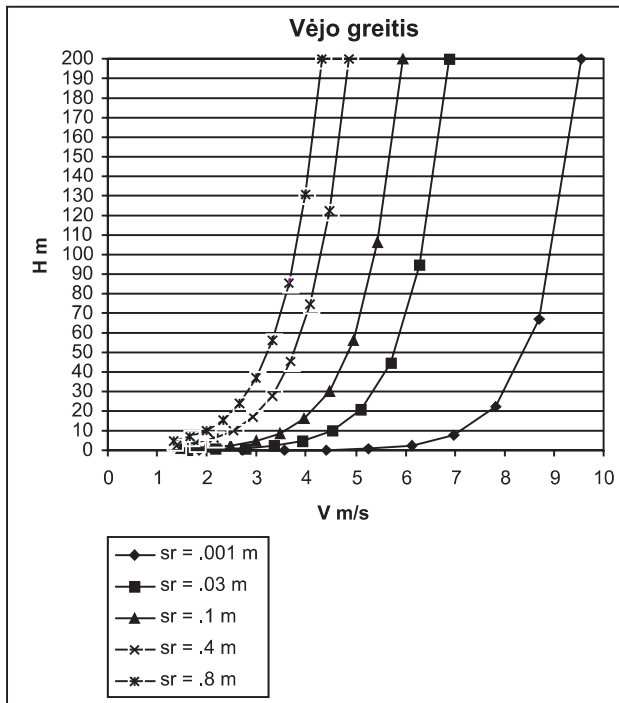
Atlikti skaičiavimai parodė, kad vėjo greitis  $V$  esminiai priklauso nuo aukščio ir vietovės šiuurkštumo ilgio  $sr$  (2 pav.). Perskaičius meteorologijos stotyje 10 m aukštyje atliekamų matavimų rezultatus į kitus aukščius, priklausomai nuo vietovės šiuurkštumo ilgio, vėjo greitis gali skirtis beveik 3 kartus.

Tai leidžia spręsti ir atvirkštinį uždavinį: minimizuojant funkcionalą ir žinant vėjo greitį keliuose aukščiuose, galima apskaičiuoti vidutinį vietovės šiuurkštumo ilgį (2).

$$\Psi(sr) \equiv \frac{1}{N} \sum_i \left| 1 - \frac{V_i}{V_{ms}} \right| = \frac{1}{N} \sum_i \left| 1 - \frac{\ln\left(\frac{H_i}{sr}\right)}{\ln\left(\frac{H_{ms}}{sr}\right)} \right| = \min; \tag{2}$$

čia  $N$  – žinomų matavimų skaičius.

Skaičiavimuose panaudoti prieinami nepriklausomų eksperimentų atliktų matavimų konkrečiose vietovėse duomenys bei Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos vėjo greičio įvertinimai 30 ir 50 m aukštyje, kurie buvo pateikti Baltijos šalių vėjo išteklių atlaso projektui. Kitų meteorologijos stočių ar vėjo matavimo vietovių šiuurkštumo ilgiai dar buvo patikslinti panaudojant vėjo greičio matavimo duomenis Kretingoje, Vilkųčiuose, Būtingėje



2 pav. Vėjo greičio priklausomybė nuo aukščio ir vietovės šiuurkštumo aukščio

ir Tauragėje. Atraminuose taškuose už šalies teritorijos ribų vėjo greičio parametrai buvo parinkti atsižvelgiant į Baltijos šalių vėjo atlaso duomenis. Meteorologijos stotyse, kurioms nebuvo gauta papildomos informacijos apie vėjo greičio matavimus, šiuurkštumo ilgis buvo priimtas 0,1 m. Gauti meteorologijos stočių šiuurkštumo ilgio įvertinimai pateikti 1 lentelės stulpelyje „Šiuurkštumo ilgis m“.

Panaudojus gautus šiuurkštumo ilgio įvertinimus, LHMT vėjo greičio duomenys remiantis (1) formule atsikuria su ±1% aritmetiniu nuokrypiu (1 lentelės paskutinis stulpelis). Darant prielaidą, kad visų meteorologijos stočių šiuurkštumo ilgis yra 0,1 m, apskaičiuoto vėjo greičio paklaida būtų ±15%. DB papildymas Weberio kriterijaus parametrais kol kas nerealaus dėl reikalingos informa-

1 lentelė. Vėjo matavimo vietos šiuurkštumo ilgio įvertinimas pagal Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos (LHMT) vėjo greičio 30 ir 50 m aukštyje duomenis

Eil. nr.	Meteorologijos stoties ar matavimo vieta	Meteorologijos stoties rodikliai										
		Koordinatė x	Koordinatė y	Vėjo greitis V m/s	Matavimo aukštis m	Aukštis virš jūros lygio m	Šiuurkštumo ilgis m	Vėjo greitis, kai H = 30 m	Vėjo greitis, kai H = 50 m	LHMT duomenys, kai H = 30 m	LHMT duomenys, kai H = 50 m	Aritmetinis nuokrypis
1	Biržai	9,8	11,2	3,4	13	56	0,16	3,561	4,805	3,57	4,81	1,003
2	Šventoji	0,7	10,5	4,8	10	2	0,22	5,792	7,816			
3	Telšiai	3,6	10,3	4	12	153	0,032	3,108	4,194	3,12	4,21	1,004
4	Šiauliai	6,3	10,1	3,7	17	108	0,043	2,849	3,845	2,87	3,87	1,007
5	Palanga	0,8	10,3	4,6	14	4	0,04	3,616	4,88			
6	Panevėžys	8,5	9,1	3,5	14	55	0,11	3,326	4,488	3,34	4,5	1,004
7	Dusetos	12,5	9,3	3,4	16	111	0,1	3,085	4,163			
8	Uostas	0,8	8,9	6,1	12	4	0,02	4,391	5,926			
9	Klaipėda	0,7	9,4	5,4	10	10	0,042	4,544	6,132	4,55	6,14	1,001
10	Laukuva	4	9	4,2	17	167	0,082	3,626	4,893	3,62	4,89	0,998
11	Utena	12	8	3,4	17	120	0,045	2,638	3,561	2,64	3,57	1,001
12	Raseiniai	5,8	7,5	4,2	11	103	0,08	3,928	5,301	3,96	5,34	1,008
13	Šilutė	1,6	7,5	4	18	4	0,15	3,848	5,192	3,84	5,18	0,998
14	Nida	0,7	8,4	5,6	16	17	0,02	3,858	5,206			
15	Kėdainiai	8	7	3,3	12	43	0,1	3,174	4,284			
16	Ukmergė	10	6,9	3,5	14	73	0,19	3,749	5,059	3,78	5,1	1,008
17	Tauragė	3,7	6,9	3,1	14	33	0,7	4,765	6,431			
18	Švenčionys	12,6	6,4	3,5	11	198	0,1	3,429	4,627			
19	Kaunas	7,5	5,5	3,6	8	76,1	0,12	3,948	5,327	3,93	5,31	0,996
20	Kybartai	4,9	4,2	4,1	15	57	0,047	3,275	4,419	3,3	4,45	1,008
21	Marijampolė	6,3	3,8	4	15	75	0,1	3,676	4,961			
22	Varėna	9,5	2,4	3,1	17	109	0,06	2,528	3,412	2,52	3,4	0,997
23	Lazdijai	6,8	2,4	3,4	16	125	0,155	3,377	4,557	3,38	4,57	1,001
24	Druskininkai	8	1,3	2,9	25	94	0,1	2,419	3,264			
25	Dotnuva	7,9	7,4	3,1	10	43	0,1	3,1	4,183			
26	Dūkštas	13,9	8,2	2,3	10	180	0,1	2,3	3,104			
27	Ignalina	13,4	7,4	1,9	10	180	0,1	1,9	2,564			
28	Vilnius	11,3	4,9	4,1	10	190	0,042	3,45	4,656	3,45	4,66	1
29	K7	16	13	3,4	10	100	0,1	3,4	4,588			
30	K0	16	0	3,2	10	130	0,1	3,2	4,318			
31	K1	4	0	3,6	10	100	0,1	3,6	4,858			
32	K2	0	0	3,6	10	110	0,1	3,6	4,858			
33	K3	0	7	8	50	0	0,03	4,966	6,702			
34	K4	0	9	8	50	0	0,03	4,966	6,702			
35	K5	0	13	8	50	0	0,03	4,966	6,702			
36	K6	6	13	3,6	10	100	0,1	3,6	4,858			

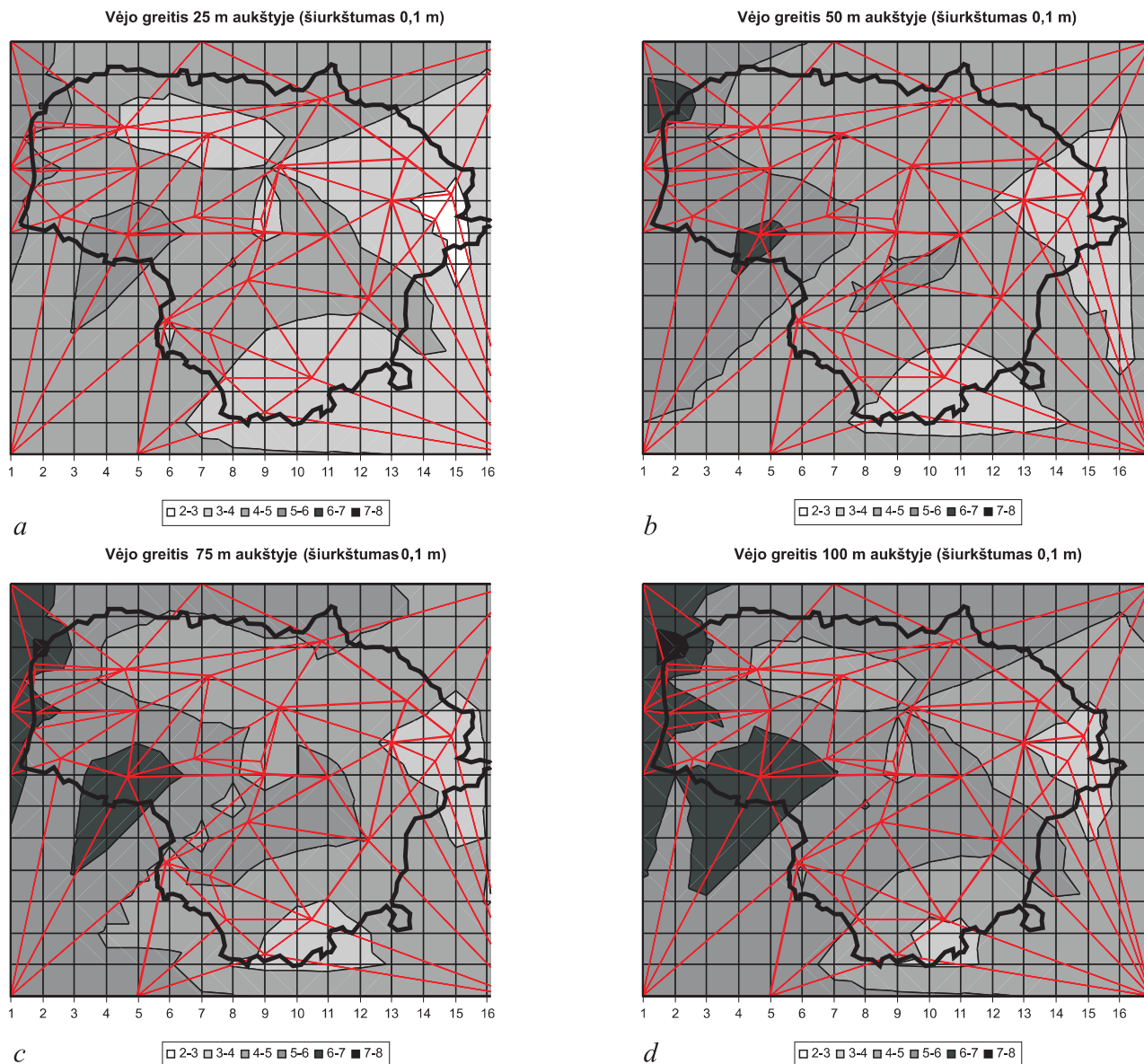
cijos stygiaus. Panaudojus 1 lentelėje pateiktus duomenis ir laisvai pasirinkus arba vizualiai įvertinus vietos šiuurkštumo ilgį, nėra sudėtinga apskaičiuoti vidutinį vėjo greitį bet kuriame taške.

Tam reikia atlikti šias procedūras:

- nustatyti, kuriame trikampyje (1 pav.) yra pasirinktas taškas, ir identifikuoti to trikampio viršūnėse esančių meteorologijos stočių vėjo greičių parametrus;
- perskaičiuoti trikampio viršūnėse esančių meteorologijos stočių parametrus, esant nagrinėjamame taške numatytam šiuurkštumo ilgiui bei VE bokšto aukščiui;
- rasti vidutinį vėjo greitį: iš nagrinėjamo taško einančio statmens susikirtimo vietą su vėjo greičių plokštuma, kuri išvesta per apskaičiuotas vėjo greičio reikšmes trikampio viršūnėse.

Skaičiavimui palengvinti buvo sukurtas specialus algoritmas su vietine DB, kuris leidžia ne tik apskaičiuoti pasirinktame taške VE parametrus, bet ir koreguoti duomenų bazėje esančių parametrų rodiklius, gavus naujos informacijos apie vėjo greičio matavimus bet kurioje šalies vietovėje.

Sukurtas algoritmas pirmiausia buvo panaudotas šalies teritorijoje modeliuojamo vėjo greičio laukų palyginimui esant 0,1 m šiuurkštumo ilgiui ir įvairiems VE bokšto aukščiams (3 pav.). Didesni nei 6 m/s vėjo greičiai 25 m aukštyje būdingi tik siaurai pajūrio zonai bei Tauragės regionui. Pastaroji zona išryškėjo tik pakoregavus Tauragės meteorologijos stoties vėjo greičio matavimus gerokai didesniu šiuurkštumo ilgio įverčiu. Didesniai teritorijos daliai, esant šiam aukščiui ir 0,1 m šiuurkštumo ilgiui,



3 pav. Vėjo greičių pasiskirstymas skirtinguose aukščiuose: *a* – 25 m, *b* – 50 m, *c* – 75 m, *d* – 100 m esant 0,1 m šiurkštumo ilgiui

būdingas vėjo greitis yra tarp 4 ir 5 m/s. Pietryčių Lietuvai bei trimis regionams aplink Panevėžį būdingos mažesnio nei 4 m/s vėjo greičio zonos, kurias sąlygoja mažesni vėjo greičiai, fiksuojami Telšių, Šiaulių, Dusetų, Utenos, Kėdainių bei Dotnuvos meteorologijos stotyse. Tokio vėjo greičio zona taip pat užfiksuota netoli Kybartų.

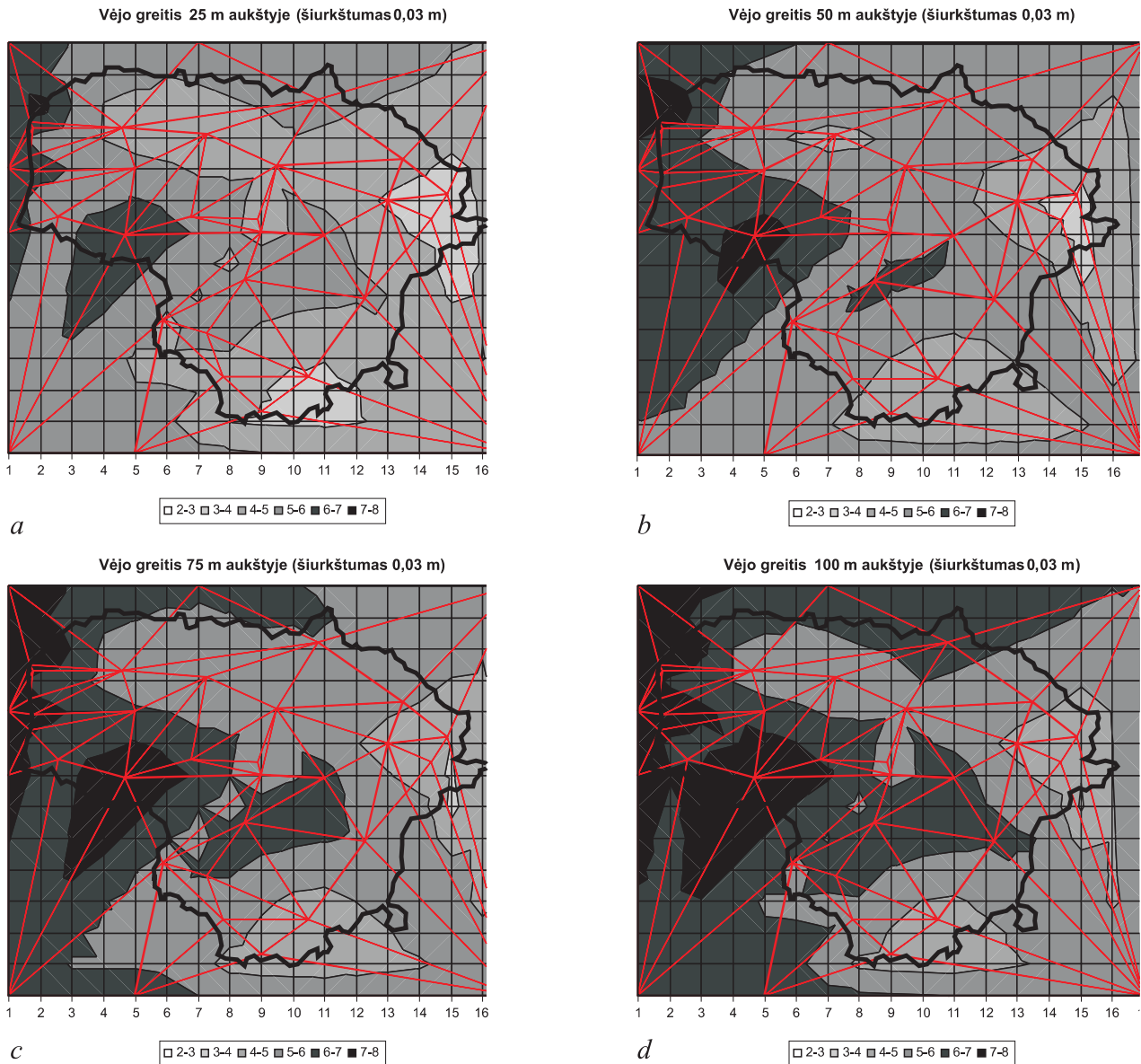
Vidurio Lietuvoje 50 m aukštyje 6–7 m/s vėjo greičio zona nusitęsia už Raseinių, o šiaurinėje dalyje ji pasiekia Plungės bei Sedos rajonus. Tokio pat vėjo greičio zona susiformuoja apie Kauną ir Ukmergę. Šiauroje pajūrio zonoje vėjo greitis jau patenka į 7–8 m/s intervalą. Toks pat vėjo greitis stebimas ir aplink Tauragę.

Vos ne pusėje šalies teritorijos 75 m aukštyje vidutiniai metiniai vėjo greičiai yra didesni nei 6–7 m/s, o kitoje dalyje vyrauja 5–6 m/s vėjo greičiai. 100 m aukštyje jau didesnėje Lietuvos dalyje vyrauja 6–7 m/s vėjo greičio zonos. Išlieka mažesnių vėjo greičių, būdingų 25 m aukščiui, zonos, tačiau jose vėjo greitis jau patenka į 4–5 m/s intervalą. Šiek tiek išsiplečia 6–7 m/s vėjo greičių zona.

Praktiškai VE turėtų būti parenkamos vietos, kurių šiurkštumo ilgis mažesnis nei 0,1 m. Tinkamai parinkus vietą vėjo parametrai būtų geresni. Tai matyti 4 paveiksle, kuriame pateikti vėjo greičio laukai esant 0,03 m šiurkštumo ilgiui. Galima pastebėti, kad tokiomis sąlygomis vėjo greičiai padidėja vidutiniškai 1 m ir tinkamos VE vietos nusistumia toliau nuo jūros. Praktiniams poreikiams čia pateiktų iliustracijų nepakanka, ir kiekvienu atveju jis turėtų būti perskaičiuojamas pagal siūlomą algoritmą.

### 3. VĖJO ENERGETIKOS PLĖTROS EKONOMINIŲ GALIMYBIŲ ĮVERTINIMAS

Lietuvos energetikos sistemos ekonominiai tyrimai rodo, kad uždarius Ignalinos AE 2009 m. kils didelis poreikis naujų elektros gamybos pajėgumų [1, 2], todėl greta kitų technologijų turėtų atsirasti niša ir vėjo energetikai. Plataus masto VE įtraukimas į elektros gamybos rinką turėtų būti grindžiamas ilgalaikių ribinių kaštų (IRK) (angl. *long run marginal cost*) analize, kurių palyginimas su kitų tipų elektrinėmis turėtų apibrėžti



4 pav. Vėjo greičių pasiskirstymas skirtinguose aukščiuose: a – 25 m, b – 50 m, c – 75 m, d – 100 m esant 0,03 m šiuurkštumo ilgiui

šios energijos rūšies ekonominį potencialą konkurencinėje rinkoje. Šiame darbe apsiribosime VE ir atominių elektrinių IRK palyginimu.

IRK apima kapitalo, eksploatacijos ir priežiūros, kuro bei išorinius kaštus. Metiniai kapitalo kaštai realizuojamos produkcijos vienetui apskaičiuojami pagal formulę:

$$MKP = INV \cdot CRF / RQ; \tag{3}$$

čia *MKP* – metiniai kapitalo kaštai Lt/MWh, *INV* – reikalingos investicijos tūkst. Lt, *RQ* – elektros energijos realizavimo apimtys GWh, *CRF* – kapitalo atstatymo faktorius (angl. *capital recovery factor*) skaičiuojamas pagal formulę:

$$CRF = \frac{DN \cdot (1 + DN)^{TM}}{(1 + DN)^{TM} - 1}; \tag{4}$$

čia *DN* – diskonto norma, *TM* – įrengimų tarnavimo trukmė.

Planuojant tradicines iškasamo kuro elektrines paprastai yra taikoma 30 metų įrengimų techninio tarnavimo trukmė,

o *DN* – 10%. Tačiau tai nėra griežta taisyklė. Esant garantuotai elektros supirkimo rinkai, galima tikėtis, kad atsirastų investuotojų, kuriuos tenkins ir 5% *DN*. *DN* gali priklausyti ir nuo daugelio kitų veiksnių, tarp jų – ir nuo konkrečios šalies ekonominės ir politinės situacijos. Šiuo atveju įrengimų atsipirkimo laikas atitiktų jų techninio tarnavimo trukmę.

Atominių elektrinių (AE) techninio tarnavimo laikas yra 60 metų. Tačiau sunku tikėtis investuotojų, kuriuos tenkintų toks ilgas stambių investicijų grąžos laikotarpis. VE techninio tarnavimo laikas yra nuo 20 iki 30 metų. Skaičiuojant IRK, priimtinas abiejų tipų elektrinių 30 metų tarnavimo trukmė. Svarbiu veiksniu išlieka tokių elektrinių metinio darbo nominaliu galingumu trukmė, kuri AE priimama 8000, o VE – 2500 valandų per metus.

Naujos AE konkurencingumo šalies ir užsienio rinkose analizė [21–23] rodo, kad jos IRK sąlygojantieji rodikliai gali kisti gana plačiose ribose. Todėl lyginamiesiems skaičiavimams pasirinkti mažiausių (minAE) ir didžiausių (maxAE) tikėtinų kaštų scenarijai, kurių analizės išeities duomenys pateikti 2 lentelėje. Analogiškai sudaryti VE scenarijai, atspindintys skirtingus ka-

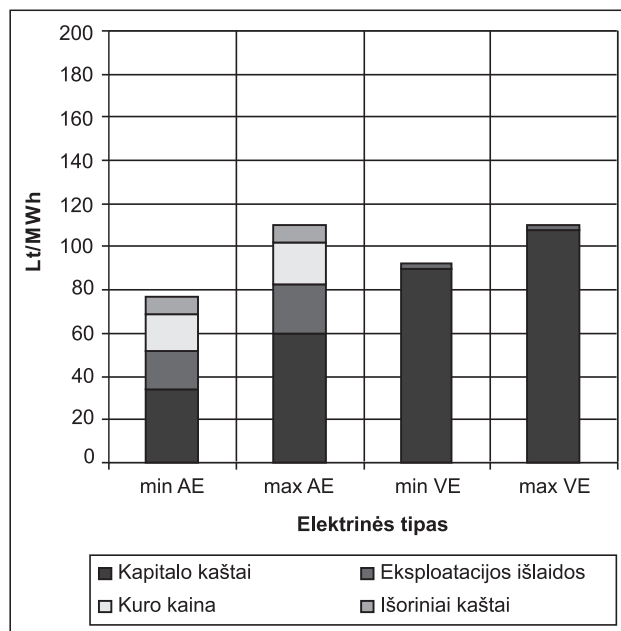
2 lentelė. IRK skaičiavimo pradiniai duomenys

Eil. nr.	Pradiniai duomenys	Matavimo vienetas	Elektrinės tipas			
			min AE	max AE	min VE	max VE
1	Elektros gamyba	GWh	4800	4800	4800	4800
2	Instaliuota galia	MW	600	600	1920	1920
3	Metinis darbo val. skaičius	h/met.	8000	8000	2500	2500
4	Santykinės investicijos	Lt/kW	4200	7400	3450	4140
5	Bendros investicijos	Mln. Lt	2520	4440	6624	7948,8
6	Tarnavimo trukmė	metai	30	30	30	30
7	Pastoviosios eksploatacijos išlaidos	Lt/MWh	6,3	11,1	1,38	1,656
8	Kintamosios eksploatacijos išlaidos	Lt/MWh	11	11	1	1
9	Eksploatacijos išlaidos, iš viso	Lt/MWh	17,3	22,1	2,38	2,656
10	Kuro kainos	LT/MWh	17,05	19,67	0	0
11	Išoriniai kaštai	Lt/MWh	8,44	8,44	0	0

pitalo kaštus. Nors tobulėjant technologiniams sprendimams VE kaštai mažėja, pastaruoju metu dėl naftos brangimo kylančios metalo kainos koreguoja šias tendencijas. Santykinai aukštas VE kainas palaiko ir nuolat didėjanti jų paklausa tarptautinėje rinkoje. IRK analizei priimtas minimalių ir maksimalių investicijų kaštų 20% skirtumas (2 lentelė).

Nors būtų galima atsižvelgti į eksploatacijos bei kuro kainų augimo tendencijas, IRK skaičiavimuose naudojama dabartinės rinkos kainos. Priimame, kad eksploatacijos kaštų dalis yra proporcinga investicijų dydžiui, o kintamoji dalis – pagamintos produkcijos kiekiui. Branduolinio kuro kainų spartaus augimo neprognozuojama, o dabartinės kainos kinta nedideliame diapazone [21]. Daroma prielaida, kad vėjo energija nebus apmokestinta. Taip pat priimami nuliniai VE išoriniai kaštai. AE išorinius kaštus sudaro išlaidos panaudotam branduoliniui kurui tvarkyti ir laidoti.

Mažiausi elektros energijos kaštai nagrinėjamosiose elektrinėse būtų radus investuotojus, kuriuos tenkintų 5% diskonto norma (5 pav.). Šiuo atveju AE IRK būtų mažiausi esant *minAE* ir sudarytų apie 77 Lt/MWh. Tačiau esant *maxAE* jie padidėtų iki 110,4 Lt/MWh. Tuo tarpu *minVE* atveju VE IRK būtų apie

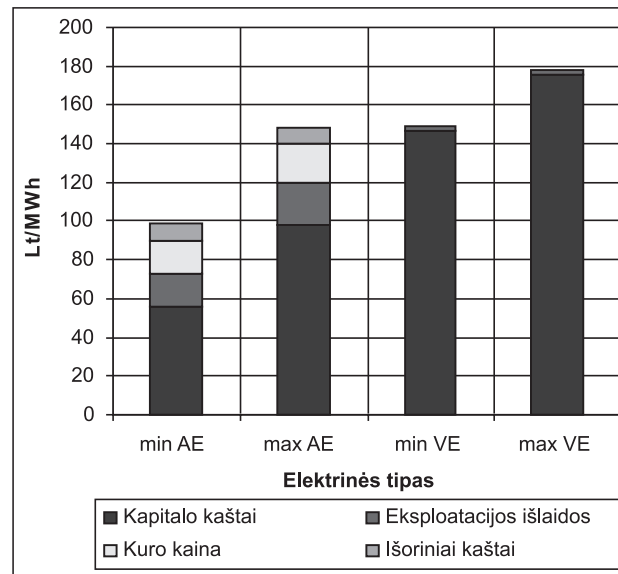


5 pav. AE ir VE IRK palyginimas, esant 5% DN

92 Lt/MWh ir prilygtų vidutiniams ilgalaikiams AE kaštams. Pažymėtina, kad aukštų kainų scenarijaus atveju VE ir AE ilgalaikiai kaštai būtų vienodi. Tai reiškia, kad esant 5% diskonto normai VE yra konkurencingos AE.

Esant 10% DN, AE IRK, priklausomai nuo išlaidų scenarijaus, padidėtų atitinkamai iki 98,5 ir 148,3 Lt/MWh (6 pav.). Šiomis sąlygomis VE kaštai išaugtų iki 148,8–178,3 Lt/MWh. Taigi VE išliktų konkurencingos AE tik esant mažesniems jų kaštams.

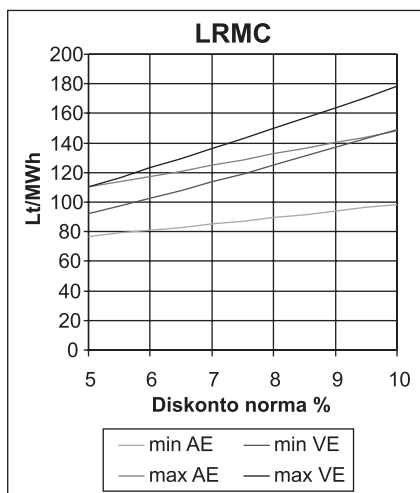
Atlikti skaičiavimai rodo, kad DN gali būti lemiantis veiksnys tiek naujos AE statybai, tiek VE plėtrai. Detalesnė IRK pri-



6 pav. AE ir VE IRK palyginimas, esant 10% DN

klausomybė nuo DN parodyta 7 pav. Vienodos sąlygos AE ir VE plėtrai, atitinkančios darnios energetikos plėtros principus, galėtų būti sudarytos esant 9% DN. Tokių sąlygų sudarymas jau būtų valstybinės politikos prerogatyva.

Šiuo metu šalies elektros energetikos plėtrai taikomus matematiniais modelius sistemų dinaminio modeliavimo požiūriu [22] derėtų priskirti intervencionistinių modelių klasei. Kol kas prioritetas skiriamas stambaus masto elektros gamybos šaltiniams, apribojant vėjo energetikos bei decentralizuotų elektros gamybos šaltinių įsiskverbimo į rinką galimybes [23, 24]. Šių tyrimų rezultatai rodo, kad ribotos galios AE ir VE yra konkurencingos. Elektros energetikos plėtros strateginio planavimo po-



7 pav. IRK priklausomybė nuo DN

žiūriu būtina VE bei netolimos perspektyvos elektros energijos importo galimybes pirmiausia vertinti „globaliai racionaliais“ sprendimais, paremtais tradiciniais ekonominiais modeliais. Kartu negalima atmesti, kad atsižvelgiant į Lietuvos nacionalinius interesus (energijos tiekimo patikimumas ir prieinamumas, elektros gamybos šaltinių įvairovės poreikis ir pan.) vėjo energetikai gali būti taikomi intervencionistiniai įsiskverbimo į rinką modeliai. Į tai būtina atsižvelgti rengiant naują vėjo energetikos plėtros programą laikotarpiui po 2010 metų.

#### 4. IŠVADOS

1. Pasiūlytas naujas vėjo energijos techninio potencialo įvertinimo matematinis modelis regioniniam vėjo energetikos planavimui suderintas su naujų VE technologinėmis galimybėmis ir vėjo energetinių išteklių monitoringo sistemos sukūrimu.

2. Parodyta, kad 100 m aukštyje didesnėje Lietuvos teritorijos dalyje vyrauja 6–7 m/s vėjo greičio zonos, tinkamos vėjo energetikai plėtoti.

3. AE ir VE ilgalaikių ribinių kaštų (IRK) palyginimas rodo, kad abi jos gali turėti vienodas konkurencines galimybes atviroje elektros rinkoje.

4. Valstybės vykdoma vėjo elektrinių plėtros skatinimo politika turėtų būti koreguojama atsižvelgiant į jų svarbą nepriklausomybės nuo vieno kuro tiekėjo didinimui po Ignalinos AE uždarymo 2009 metais.

5. Elektros energetikos darnaus vystymosi požiūriu rengiant naują vėjo energetikos plėtros programą tikslinga remtis sistemų dinaminio modeliavimo principais, kurie įgalintų realizuoti Nacionalinėje energetikos strategijoje numatytas atsinaujinančių energijos šaltinių panaudojimo apimtis.

Gauta 2007 06 27

Priimta 2007 08 20

#### Literatūra

1. Nacionalinė energetikos strategija. Patvirtinta Lietuvos Respublikos Seimo 2007 m. sausio 18 d. nutarimu Nr. X-1046.
2. Miškinis V., Galinis A. Lietuvos nacionalinės energetikos strategijos gairės // *Energetika*. 2006. Nr. 3. P. 24–32.
3. Katinas V., Tumosa A. Vėjo energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje. Vilnius, 1995. P. 37.
4. Jarmokas R., Katinas V. The possible usage of wind energy in Lithuania // *Wind Energy in Baltic International Conference*. Riga, 1996.
5. Būtinge wind power plant (pre-engineering). Nord Trondelag Electricity Board, Norway, March 1997.
6. Regional Baltic Wind Energy Programme. Final Report. Prepared Renewable Energy Laboratory Lithuanian Energy Institute. Kaunas, 2000.
7. Paulauskas A., Paulauskas S. Priorities of Lithuania wind power // *Materials of II International Conference “Decentralization of Energetics: The Future of Urban Energetics”*. Klaipėda. May 2, 2002. P. 149–158.
8. Paulauskas A. Vakarų Lietuvos regiono vėjo energetikos techninio potencialo teritorinis pasiskirstymas // *KTU konferencijos medžiaga*. Kaunas, 2003.
9. Markevičius A., Katinas V. Vėjo energetikos plėtros tendencijos // *Energetika*. 2003. Nr. 1. P. 22–27.
10. Adomavičius V., Linkevičius Ž., Steponavičienė E. Vėjo elektrinės energetinio ir ekonominio efektyvumo priklausomybė nuo bokšto aukščio // *Konferencijos „Elektros energetika ir technologijos“ pranešimų medžiaga*. Kauno technologijos universitetas, 2005. P. 242–247.
11. Neverdauskas E. V., Šulga D. Tolesnės vėjo energetikos skverbties įtaka perdavimo tinklo režimų saugai // *Konferencijos „Elektros energetika ir technologijos“ pranešimų medžiaga*. Kauno technologijos universitetas, 2005. P. 248–251.
12. Katinas V., Markevičius A., Burlakovas A. Vėjo energetika ir jos artimiausia perspektyva Lietuvoje // *Energetika*. 2006. Nr. 3. P. 67–76.
13. European Wind Atlas – 1989 Risoe National Laboratory, Denmark.
14. WindPower Development in Baltic States, United Nations Development Programme // [www.undp.lt](http://www.undp.lt)
15. „Elektros energijos, kuriai gaminti naudojami atsinaujinantys ir atliekiniai energijos ištekliai, gamybos ir pirkimo skatinimo tvarka“. Patvirtinta Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2001 m. gruodžio 5 d. nutarimu Nr. 1474 (Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2004 m. sausio 13 d. nutarimo Nr. 25 redakcija). 2004 m. sausis.
16. Lietuvos Respublikos ūkio ministro įsakymas Nr. 4-102 „Dėl vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos elektros energetikos sistemos techninių taisyklių patvirtinimo“. Vilnius, 2004 m. balandis.
17. Markevičius A., Burlakovas A., Tamašauskienė M. Vėjo energetikos plėtra iki 2010 metų // *Konferencijos „Šilumos energetika ir technologijos“ pranešimų medžiaga*. Kaunas, 2005 m. vasario 3–4 d.
18. Paulauskas A., Paulauskas S. Problems and decisions of sustainability culture innovations in Lithuania // *Selected Papers of International Scientific Conference “Citizen*



- and governance for Sustainable Development” (ISI proceedings). Vilnius, 28–30 September 2006. P. 101–106.
19. The wind regime at Butinge, Lithuania. Kjeller: Institute for Energy Technology, Norway, 1996, December. 23 p. + appendix.
  20. Ole Rathmann. The UNDP/GEF Baltic Wind Atlas. The UNDP/GEF Regional Baltic Wind Energy Programme. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2002.
  21. Galinis A., Tarvydas D. Naujos atominės elektrinės konkurencingumas šalies ir užsienio rinkose // Tarptautinė konferencija „Elektros ir valdymo technologijos – 2006“. P. 97–102.
  22. Leaver J., Baglino A. System Dynamics Modeling (SDM) of New Zealand’s Energy Economy. Centre for Sustainable Energy Initiatives School of the Built Environment Unite New Zealand. 2001.
  23. Galinis A., Tarvydas D. A new nuclear power plant in Lithuania in the light of power system development in the Baltic region // Energetika. 2006. Nr. 3. P. 102–109.
  24. Norvaiša E. Lietuvos elektros ir šilumos sektorių darnaus vystymo modeliavimas ir analizė / Daktaro disertacijos tezės. Kaunas, 2004.

Aleksandras Paulauskas, Matas Tamonis

#### SPECIFICATION OF WIND POWER DEVELOPMENT TECHNICAL AND ECONOMIC FOREGROUND

##### Summary

Extrapolation of long-term wind data from the height of 10 and 30 meters up to 100 meters and the coverage of the Lithuanian territory with a grid of 63 triangles on the basis of a specific mathematic model of wind speed dependence on height and roughness class allowed to re-evaluate the distribution of wind resources.

According to this model, the average wind speed at the height of 100 meters is 6–7 mps. This means that wind conditions are acceptable for wind power development in the bigger part of the territory of Lithuania.

In the article, expedience of a wide wind power integration into the energy production process is based on a comparison of long-run marginal costs of wind and nuclear power plants. Exploration and comparison of scenarios of minimal and maximal reliable costs show that

in case of a discount rate of 9% wind power and nuclear power would have equal development possibilities.

A new programme of wind power development based on the principles of sustainable development, and the system dynamics modelling would allow wind power integration into the market.

**Key words:** wind sources, wind data, wind power station, installed capacity, wind power technical potential, wind power, sustainable development, regional planning, long-run marginal costs

Александрас Паулаускас, Матас Тамонис

#### УТОЧНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО И ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

##### Резюме

Экстраполирование многолетних данных по измерению ветра с высоты от 10 и 30 до 100 метров, разбивая территорию Литвы на 63 треугольника, на основании созданной математической модели зависимости скорости ветра от высоты и шероховатости поверхности позволило в новом ракурсе оценить распределение ресурсов ветра. Согласно результатам моделирования на высоте 100 м средняя скорость ветра достигает 6–7 м/с. Это говорит о том, что на большей части территории Литвы имеются подходящие условия для развития ветроэнергетики.

В данной статье целесообразность широкого внедрения ветроэнергетики в процесс энергопроизводства обосновывается сравнением долгосрочных предельных затрат ветроустановок и атомной электростанции. Сравнение сценариев минимальных и максимальных затрат показало, что ветровая и атомная энергетика имеют одинаковые возможности развития при 9-процентной дисконтной норме.

Использование принципов устойчивого развития и системного динамического моделирования при подготовке новой программы развития ветроэнергетики должно показать целесообразность внедрения последней в общий процесс энергопроизводства в рыночных условиях.

**Ключевые слова:** ресурсы ветра, параметры ветра, ветроустановка, инсталлированная мощность, технический потенциал ветроэнергетики, ветроэнергетика, устойчивое развитие, региональное развитие, долгосрочные предельные затраты