

Vėjo srauto energetinių parametru Lietuvos pajūrio regione tyrimas

Vladislovas Katinas,

Antanas Markevičius,

Marijona Tamašauskienė,

Judita Zita Vilemienė

Atsinaujinančių energijos

šaltinių laboratorija,

Lietuvos energetikos institutas,

Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas

El. paštas: res@mail.lei.lt

Straipsnyje nagrinėjamos vėjo energetikos panaudojimo Lietuvoje galimybės. Tyrimai rodo, kad Veibulo funkcijos parametrai gana tiksliai įvertina vietovės tinkamumą vėjo energetikos plėtrai. Lietuvos pajūrio regione vėjo vidutinis metinis greitis 50 m aukštyje nuo žemės paviršiaus lygus 6,4 m/s. Nustatyta, kad nuolat keičiasi vėjo kryptis ir greitis, tai turi įtakos vėjo elektrinių (VE) darbui. Siekiant užtikrinti aukštą VE gaminamos elektros energijos kokybę, būtina naudoti brangią įrangą. Lietuvos pajūrio zonoje įrengtų VE galios panaudojimo koeficientas C_p siekia apie 0,265, o VE, įrengtų šalies žemyninėje dalyje, kur kas mažesnis. Vėjo srautų judėjimas pajūrio regione turi aukštą koreliacijos laipsnį (apie 0,82). Todėl atlikus matavimus vienoje vietoje galima lengvai įvertinti vėjo greitį pasirinktose VE statybos aikštelėse.

Raktažodžiai: vėjo elektrinės, vėjaratis, konversija, galios koeficientas, efektyvumas, energija, srautų koreliacija, turbulentiškumas

1. ĮVADAS

Pastaruosius keletą metų vėjo energijos naudojimo tempai pasaulyje ir Lietuvoje paspartėjo, siekiant mažinti šiltnamio dujų išmetimo kiekį, taip pat apsirūpinti nuosavais energijos šaltiniais. 2008 m. pasaulyje VE pagamino 260 TWh elektros energijos, ir tai sudarė 1,5 % visos pasaulyje sunaudojamos elektros. Instaliuota VE galia pasaulyje pasiekė 121 188 MW. VE galia padidėjo 2008 m. 29 %, palyginti su 2007 m. lygiu. Panašiais tempais VE statyba didėjo ir Europos Sąjungoje. Lietuvoje 2005 m. veikė keturios nedidelės galios VE, kurių bendra įrengtoji galia siekė apie 1 MW, ir jos pagamino 1,8 GWh elektros energijos. Daugiausia elektros (beveik 90 %) gamino Vydmantų VE. 2006 m. pastatytos kelios naujos nedidelės galios VE, o 2006 m. pabaigoje – 2007 m. pradžioje pajūrio regione buvo įrengti ir prijungti prie elektros tinklo du VE parkai, kurių bendra įrengtoji galia sudarė 46 MW. 2006 m. VE Lietuvoje jau pagamino 13,75 GWh elektros energijos. Šiuo metu Lietuvoje įrengtų VE bendra galia siekia apie 90 MW [1, 2]. Įrengti 3 VE parkai, kurių bendra galia yra 60 MW, taip pat įrengtos didelės galios pavienės VE (0,63–2 MW). Mažųjų VE, kurių galia ne didesnė kaip 250 kW ir kurias be apribojimų prisijungiant prie elektros tinklų gali išrengti pavieniai energijos gamintojai ar ūkininkai, yra įrengta apie 16, o jų bendra galia sudaro apie

5 MW. Tyrimai [3–6] rodo, kad vėjo energijos išteklių jūros šelfe yra apie 35 % didesni negu žemyninėje šalies dalyje, kadangi ryškiai skiriasi paviršiaus šiurkštumo laipsnis. Vėjo išteklių tyrimai yra būtini, kadangi tinkamai parinkus VE vietą galima gauti ženkliai didesnę energijos kiekį iš tokios pat galios VE [7–10]. Fundamentiniai vėjo energetiniai tyrimai leidžia optimaliau panaudoti vietovės vėjo energetinius išteklius.

Vėjo energetinių parametru ir turbulentiškumo (staigūs vėjo greičio ir krypties pokyčiai) kitimas atsiranda dėl pastatų, medžių, uolų bei kitų kliūčių poveikio vėjo srautui. Atitrūkę nuo aptekamų kliūčių besisukantys oro sūkuriai įneša tam tikrą chaosą tiek vėjo krypties, tiek greičio atžvilgiu. Tyrimai [3, 6, 10, 11] rodo, kad kylančios vėjo greičio pulsacijos turi didelę įtaką VE darbui, nes mažina jų produktyvumą. Be to, galingi sūkuriniai gūsių gali sulaužyti VE rotorius arba kitas jų dalis. Šiuolaikinės VE yra gana brangūs įrenginiai, todėl būtina užtikrinti, kad VE galėtų sėkmingai funkcionuoti pasirinktos vietovės topografinėmis sąlygomis. Išskyla mokslinių-techninių problemų dėl VE panaudojimo efektyvumo, darbo patikimumo ir kt. Šiame darbe atliekami tyrimai: modernios matavimo aparatūros pagalba tiriama vėjo parametru kitimas, analizuojami vėjo srauto turbulentiškumo kitimo dėsniniai, įvertinamas VE įrengtos galios panaudojimo koeficiento kitimo pobūdis, nagrinėjama

pajūrio vėjo srautų koreliacija ir kiti veiksniai, turintys įtakos efektyviam VE darbui.

Straipsnio autoriai dėkingi Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui už mokslinių tyrimų bei projekto finansavimą ir rėmimą.

2. TYRIMO METODAI

Analitiniam vėjo energetinių išteklių įvertinimui ir prognozei pasirinktoje vietovėje būtina žinoti vėjo srautų kitimo dėsninumus. Šiems tyrimams atlikti buvo naudojama vokiečių bendrovės „Ammonit“ vėjo greičio, vėjo srauto pulsacijų ir vėjo krypties matavimo įranga „WICOM-C“ bei „dubenelio“ tipo anemometrai [12, 13]. Matavimo įranga buvo įrengta 1,5 km atstumu nuo Baltijos jūros Giruliuose, ant kalvos, kuri iškilusi 24 m virš jūros lygio. Jos koordinatės: 21° 09' rytų ilgumos ir 55° 46' šiaurės platumos. Vėjo greitis buvo matuojamas aparatūra WICOM-C trijuose aukščiuose nuo žemės paviršiaus: 10, 30 ir 50 m, taip pat 2009 m. atlikti papildomi matavimai 25, 45 ir 65 m aukščiuose. Vėjo kryptis matuojama 30 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Matavimai atliekami numatytu dažniu, suintegruojami per nustatytą laiką ir užrašomi į kompiuterio atmintį. Aparatūros matavimo pagrindiniai techniniai duomenys [12, 13]:

vėjo greitis:

matavimų intervalas 1–60 s,

matavimų diapazonas 0,0–50 m/s,

jautrumas 0,05 m/s;

vėjo kryptis:

matavimų intervalas 1–60 s,

matavimų diapazonas 0–360°,

jautrumas 1°.

Darbo temperatūrų diapazonas – 35 °C... + 80 °C.

Sukaupus kompiuterio atmintyje numatyto laikotarpio vėjo parametrų matavimo duomenis pagal sudarytą programą apskaičiuojamos pagrindinės statistinės vėjo srauto charakteristikos, tai vidutinis vėjo greitis, maksimalus greitis, vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnumas dvidešimtyje vėjo greičio klasių (0–1 m/s, 1–2 m/s, ..., 19– v_{\max} m/s). Pateikiami duomenys apie vėjo greičio pasiskirstymą pagal vėjo pūtimo kryptis kas 10°. Taip pat pateikiami matavimo duomenys, kiek laiko per mėnesį vėjo greitis buvo mažesnis nei 4 m/s 50 m aukštyje ir 3 m/s 30 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Visi šie matavimo ir statistikos duomenys iš aparatūros WICOM-C nuskaitomi portatyviniu kompiuteriu „Compaq Aero“ [14]. Kadangi informacijos, gautos iš aparatūros WICOM-C, kiekis didžiulis (dešimtys tūkstančių skaičių), ja naudotis labai nepatogu norint palyginti skirtingų mėnesių vėjo parametrų matavimo duomenis. Todėl Lietuvos energetikos institute buvo sukurtas programų paketas, kuriuo skaitmeninę informaciją, gautą iš matavimo aparatūros, galima pateikti grafiniu pavidalu. Tai gerokai padidino vėjo parametrų matavimo rezultatų vaizdumą ir palengvino skirtingų mėnesių vėjo parametrų palyginimą.

Kaupiant matavimo duomenis pasirinktuose aukščiuose, WICOM-C įranga numatytu laiku (kas 10 s) skanuoja vėjo parametrus, o po 60 matavimų apskaičiuoja pagrindines statistines vėjo charakteristikas. Vidutinis vėjo greitis per atitinkamą laiko intervalą apskaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{vid.} = \frac{\sum_{i=1}^k V_i}{k}; \quad (1)$$

čia V_i – momentinė vėjo greičio reikšmė fiksuojamu laikotarpiu (m/s);

k – matavimų skaičius vieno intervalo laikotarpyje.

Standartinis vėjo greičio nukrypimas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (V_{vid.} - V_i)^2}{(k-1)}}. \quad (2)$$

Vėjo srauto turbulentiškumo lygis išreiškiamas formule:

$$Tu = \frac{\sigma}{V_{vid.}}. \quad (3)$$

Pasitaiko atvejų, kai vėjo greitis pasirinktame aukštyje didesnis kaip 25 m/s 50 m aukštyje ir 20 m/s 30 m aukštyje. Tuomet, kai matavimo įranga užfiksuoja vadinamuosius kritinius atvejus, vėjo parametrų reikšmės užrašomos kas 1 s ar kitu numatytu laiku. Užfiksuoti duomenys išsaugomi matavimo įrangos atmintyje ir suprogramuoto skaičiavimo algoritmu apskaičiuojamos pagrindinės pasirinkto laikotarpio vėjo charakteristikos. Pateikiami duomenys apie vėjo greičio pasiskirstymą pagal vėjo pūtimo kryptis kas 10°. Taip pat pateikiami matavimo duomenys, kiek laiko per mėnesį vėjo greitis buvo mažesnis nei 4 m/s 50 m aukštyje ir 3 m/s 30 m aukštyje. Atsižvelgiant į sukauptus vėjo srauto tyrimo duomenis galima įvertinti energijos, tenkančios rotorius mentėms, kiekį, apskaičiuoti VE darbo trukmę, pagamintos energijos kiekį, nustatyti VE atsipirkimo laiką ir kitus parametrus.

Vėjo energijos kiekis priklauso nuo vėjo srauto greičio ir oro tankio. Vėjo energijos kiekis per 1 s, tenkantis 1 m² vėjaračio ploto (galia W/m²; čia W – vatas), apskaičiuojamas pagal formulę:

$$E(t) = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3; \quad (4)$$

čia E – vėjo energijos kiekis (W/m²);

ρ – oro tankis (kg/m³);

V – vėjo greitis (m/s).

1 lentelėje pateiktas vėjo energijos kiekis, kai oro tankis $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, oro temperatūra 15 °C.

Tyrimai rodo, kad vėjo greičio energijos kiekio kitimas priklauso nuo vėjo srauto tekėjimo pobūdžio (laminarinis ar turbulentinis), meteorologinių sąlygų, vietovės šiurkštumo laipsnio ir aukščio, kuriame matuojamas vėjo greitis. Tarkime, žinome vėjo greitį pasirinktame aukštyje h_1 , vėjo greitį

1 lentelė. Vėjo energijos kiekis (galia W/m²)

Vėjo greitis m/s	Energijos kiekis W/m ²	Vėjo greitis m/s	Energijos kiekis W/m ²	Vėjo greitis m/s	Energijos kiekis W/m ²
0	0	8	313,6	16	2 508,8
1	0,6	9	446,5	17	3 009,2
2	4,9	10	612,5	18	3 572,1
3	16,5	11	815,2	19	4 201,1
4	39,2	12	1 058,4	20	4 900,0
5	76,6	13	1 345,7	21	5 672,4
6	132,3	14	1 680,7	22	6 521,9
7	210,1	15	2 067,2	23	7 452,3

aukštyje h_2 galima apskaičiuoti pagal (5) ar (6) formules [14] naudojantis logaritmine išraiška:

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{h_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right)}; \tag{5}$$

čia $V_1 - h_1$ aukštyje išmatuotas vėjo greitis (m/s);
 $V_2 - h_2$ aukštyje skaičiuojamas vėjo greitis (m/s);
 h_0 – vietovės šiurkštumo parametras;
 $h_0 = 0,1 \cdot h_n \cdot h_n \cdot h_n$ – šiurkštumo elemento aukštis (m).
 Vėjo greičio skaičiavimo rodiklinė išraiška:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^n; \tag{6}$$

čia n – vėjo greičio profilio polinkio laipsnio rodiklis.
 Vėjo greičio profilio polinkio laipsnio rodiklis įvertina vietovės šiurkštumo laipsnį [10].

$$n = B_0 + B_1 \ln V_1; \tag{7}$$

$$\text{čia } B_0 = \frac{1}{\ln\left(\frac{h_g}{h_0}\right)} + \frac{0,088}{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}; \tag{8}$$

$$h_g = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0,5}; \tag{9}$$

$$B_1 = -\frac{0,088}{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}; \tag{10}$$

čia B_0 ir B_1 – koeficientai, priklausantys nuo vietovės šiurkštumo parametro h_0 ir nuo aukščių h_1 bei h_2 .

Esant kintamam vėjo srautui, kai kinta tekėjimo greitis, kryptis, greičio svyravimų dažnumas, t. y. esant dideliame vėjo srauto turbulentiniam tekėjimui, pagal (4) formulę apskaičiuotas energijos kiekis nėra tikslus. Tada būtina naudoti tikslesnį vėjo energijos skaičiavimo būdą.

Dažnai keičiantis vėjo greičio kryptis ir esant dideliame vėjo srauto turbulentiškumui skaičiuojant VE energijos išdirbį būtina įvertinti vėjo srauto kitimo statistines charakteristikas. Daroma prielaidą, kad tam tikru laikotarpiu t , kintant vėjo greičiui ir kinetinei vėjo energijai, analizuojamas vėjo greitis aprašomas stacionarine funkcija, kuri išreiškiama formule:

$$E = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} f(V) V^3 dV; \tag{11}$$

čia $f(V)$ – greičio tikimybių pasiskirstymo tankis.

Vėjo greičio tikimybių pasiskirstymo tankį (greičio nukrypimus) tiksliausiai nusako Veibulo (Weibull) tikimybių pasiskirstymo tankis, kur vėjo greičio tikimybė per tam tikrą laiką apskaičiuojama pagal (12) formulę:

$$f(V) = \frac{k}{a} V^{(k-1)} e^{-\left(\frac{V}{a}\right)^k} = kAV^{k-1}e^{-AV^k}, \text{ kai } 0 < V < \infty; \tag{12}$$

čia $A = \frac{1}{a^k}$;

a ir k – Veibulo pasiskirstymo parametrai.

Taigi Veibulo pasiskirstymo funkcija:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{a}\right)^k} = 1 - e^{-AV^k}. \tag{13}$$

Parametrai a ir k yra nustatomi įvairiais metodais [11, 14]. Plačiausiai paplitęs yra mažiausių kvadratų metodas. Jis yra taikomas, kai pagal stebėjimų duomenis galima nustatyti empirinę pasiskirstymo funkciją $F(V_i) = F_i^-$, dėl $V = V_i$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

Parametrams a ir k nustatyti imami dydžiai, kad pagal (13) formulę apskaičiuota pasiskirstymo funkcija (1 pav.) būtų kuo artimesnė empirinei funkcijai $F(V_i)$.

Artimumo sąvoką apibūdina „empirinių“ ir „teorinių“ reiškinų skirtumų kvadratų sumos minimumo sąlygos patenkinimas.

$$\sum_{j=1}^M |p_j - f_j| \cdot g_j; \tag{14}$$

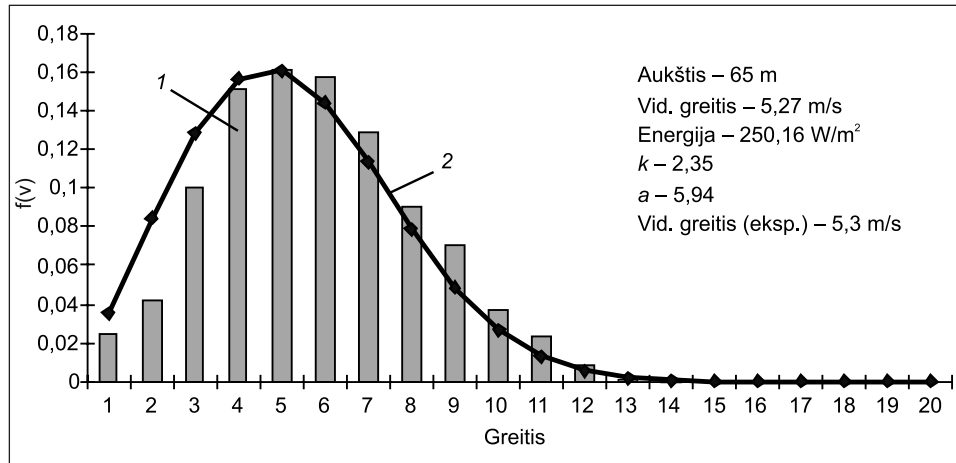
čia p_j – empirinė tankio funkcija;

f_j – Veibulo tankio funkcijos reikšmė;

g_j – svorio funkcija.

Apibendrinus kelerių metų vėjo greičio kitimo analizės duomenis vietovėje, kurioje planuojama įrengti VE, yra nustatoma empirinė pasiskirstymo funkcija. Daroma prielaida, kad tikimybių pasiskirstymas dėl greičių skirtingų aukščių V_{h1} ir V_{h2} priklauso tam pačiam Veibulo pasiskirstymo tipui. Tokiu būdu gaunama, kad Veibulo funkcijos parametrai (a_{h1} , k_{h1}) ir (a_{h2} , k_{h2}) ryšys ir atitinkamiems skaičiavimams nuo žemės paviršiaus pasirinktuose aukščiuose h_1 ir h_2 išreiškiamas lygybėmis:

1 pav. Vėjo greičio kitimo apibendrinimas Veibulo pasiskirstymu ir konstantų a ir k apskaičiavimas 65 m aukštyje virš žemės paviršiaus Klaipėdos regione (Giruliai) 2009 m. gegužę. 1 – empirinis pasiskirstymas; 2 – duomenys, apibendrinti Veibulo pasiskirstymu



$$a_2 = \alpha \cdot a_1^\beta; \tag{15}$$

$$k_2 = \frac{k_1}{\beta}; \tag{16}$$

čia koeficientai α ir β apskaičiuojami pagal formules:

$$\alpha = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{B_0}; \tag{17}$$

$$\beta = 1 + B_1 \cdot \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right); \tag{18}$$

čia $B_0 = 0,37, B_1 = 0,088$.

Jei turimi vėjo greičių tyrimo duomenys nepakankami Veibulo funkcijos parametrams nustatyti, tada žinant vidutinį vėjo greitį pasirinktoje vietovėje (duomenys iš meteorologinių stočių) Veibulo funkcijos parametras a galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$a = \frac{V_{vid}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}; \tag{19}$$

čia parametras $k = 1,8-2,3$;

Γ – Eulerio gama funkcija.

Žinant Veibulo pasiskirstymo parametrus, galima apskaičiuoti:

vėjo energijos srautą:

$$E = 0,5 \cdot \rho \cdot a^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right); \tag{20}$$

maksimalų vėjo greitį:

$$V_{max} = a \left(\frac{k-1}{k}\right)^{\frac{1}{k}}; \tag{21}$$

vidutinį vėjo greitį:

$$V_{vid} = a \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right); \tag{22}$$

dispersiją:

$$\sigma^2 = a^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]. \tag{23}$$

Atlikti vėjo energijos išteklių būdingiems Lietuvos regionams 10, 25 ir 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus skaičiavimai, apibendrinant Lietuvos meteorologinių stočių, kuriose vėjo parametrų matavimai atliekami 10 m aukštyje virš žemės paviršiaus kas 3 valandos, duomenis. Duomenys pateikti 2 lentelėje.

Iš mūsų atliktų tyrimų ir kitų autorių matavimų [17, 18] matyti, kad vėjo srauto galia E šalies teritorijoje ženkliai kinta. Didžiausi vėjo srauto išteklių yra pajūryje (Nida, Klaipėda, Kretinga, Vilkyčiai ir t. t.).

3. VĖJO ENERGIJOS KONVERSIJA VĖJARATYJE

Vėjo energijos konversija į kitas energijos rūšis – mechaninę, elektros ir šilumos – atliekama vėjaračiu ir kitais įrenginiais. Svarbiausia ir brangiausia VE dalis yra vėjaračis. Daugumos VE vėjaračio skersmuo siekia 60–70 m ir daugiau. Esant didesniai vėjaračiui, atsiranda problemų dėl jo mechaninio patvarumo.

Aerodinaminės jėgos, sukurtos vėjo, veikia rotoriaus sparnus, todėl kyla sukamasis judesys. Šių jėgų dydis priklauso nuo oro tankio ir vėjo greičio. Judančių kūnų kinetinė energija yra proporcinga jų masei.

2 lentelė. Vėjo energijos parametrai 10, 25 ir 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus

Meteorologijos stotis	Vidutinis greitis V m/s			Vėjo srauto galia E W/m ²			Veibulo parametrai					
	10	25	50	10	25	50	k			a		
							10	25	50	10	25	50
Nida	5,75	6,94	8,0	364	594	864	2,06	2,24	2,4	6,49	7,83	9,03
Kaunas	3,77	4,71	5,58	103	185	291	2,07	2,26	2,42	4,26	5,32	6,29
Utena	2,94	3,74	4,5	49,7	95,0	156	2,02	2,2	2,35	3,32	4,22	5,07
Varėna	2,5	3,23	3,93	28,6	57,5	97,9	2,18	2,38	2,55	2,83	3,65	4,43

Oro masių kinetinė energija yra proporcinga praeinančio per rotoriaus skerspjūvio plotą oro masei per laiko vienetą ir oro tankiui. Kuo oro tankis didesnis, tuo daugiau rotorius paima energijos. Esant normaliam atmosferos slėgiui 15 °C temperatūroje oro tankis lygus 1,225 kg/m³. Keičiantis oro drėgmei ar aukščiui virš žemės paviršiaus oro tankis kinta. Tipinės VE, kurios galia 600 kW, rotoriaus skersmuo yra apie 43 m, t. y. rotoriaus plotas yra apie 1590 m². Didesnis rotoriaus skersmuo gerokai padidina gaunamos energijos išdirbį, nes rotoriaus plotas yra proporcingas skersmens kvadratui.

Mažas vėjaratis ne visada gali pagaminti norimą energijos kiekį. Todėl būtina gerinti vėjaračio techninius ekonominius rodiklius. Būtina tiksliai įvertinti vėjo energijos konversijos galimybę, kadangi prieš vėjaratį esantis vėjo greitis V_0 negali sumažėti iki nulio, t. y. jis tampa V . Taigi naudingas vėjo greitis [15, 16], kuris verčiamas į mechaninę energiją, bus:

$$V_n = \frac{V_0 + V}{2}. \quad (24)$$

Vėjaračiui perduodama vėjo energija

$$E_V = \frac{m(V_0^2 - V^2)}{2}; \quad (25)$$

čia m – pro vėjaratį praėjusio oro masė, kurią galima aprašyti lygtimi:

$$m = \rho A \frac{V_0 + V}{2}; \quad (26)$$

čia ρ – oro tankis, A – rotoriaus plotas.

Iš (24)–(26) lygybių gauname:

$$E_V = \frac{\rho}{4} (V_0^2 - V^2) (V_0 + V) A. \quad (27)$$

Visa vėjo energija

$$E_0 = 0,5 \rho V_0^3 A. \quad (28)$$

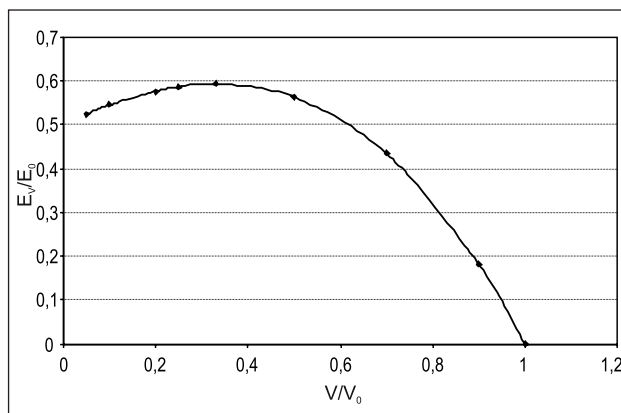
Šių energijų santykis išreiškiamas:

$$\frac{E_V}{E_0} = 0,5 \left[1 - \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{V}{V_0} \right) \right]. \quad (29)$$

Šių energijų santykis yra maksimalus (2 pav.) esant vėjo greičių santykiui $V / V_0 = 1/3$, taigi maksimalus energijos, kurią gali konvertuoti vėjaratis, kiekis, lygus 16 / 27, arba 0,593. Tai yra teorinė riba, prie kurios turi artėti specialistai, gaminantys VE. Gaminant elektros energiją VE, energija prarandama keičiantis vėjo greičiui ir kryptiai (η_v), transmisijoje perduodant sukamąjį judesį generatoriui (η_t), pačiame generatoriuje (η_g) ir t. t. Įvertinus tai, šiulaikinėse VE naudingai panaudojama 40 % vėjo energijos, tuo tarpu VE, gaminančios elektros energiją, naudingumo koeficientas lygus:

$$\eta = \eta_v \eta_t \eta_g = 0,4 \times 0,9 \times 0,95 = 0,342, \quad (30)$$

t. y. $\eta = 34,2 \%$.



2 pav. VE konvertuojamos energijos kiekis atsižvelgus į vėjo greičių prieš rotorijų ir už jo santykį

4. VĖJO ENERGETINIŲ PARAMETRŲ KITIMO CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAI

Tyrimai rodo, kad nelygiose ar užstatytose vietovėse sukeltos vėjo srauto didelės pulsacijos, t. y. susidaro didelis vėjo turbulentiškumas (3 pav.). Todėl VE energijos gamybai didelės įtakos turi vėjo greičio pulsacijų dydis.

Esant šioms veiksniams vėjo greičių prieš rotorijų ir už jo santykis mažėja, todėl VE gamina mažiau energijos. VE energijos išdirbis priklauso nuo dviejų pagrindinių veiksnių, t. y. nuo greičių prieš rotorijų ir už jo pokyčio sumažėjimo, taip pat nuo rotoriaus inercijos. Antroji priežastis: VE rotoriai yra dideli, todėl atsiranda didelės inercinės jėgos. Taigi vėjo turbulentiškų pulsacijų įtaka nedidelė, nors vidutinis greitis, esant didelėms pulsacijoms, gerokai padidėja.

Pajūrio zonoje dieną vėjo greitis yra didesnis negu naktį, kadangi dieną virš jūros paviršiaus ir žemyno temperatūrų skirtumas susidaro didesnis negu naktį. Dieną vėjo greitis ir jo pulsacijos yra didesnės, todėl energijos gamyba didesnė negu naktį. Tai turi teigiamos įtakos elektros tinklo apkrovimo grafikui, nes naktį energijos poreikis kur kas mažesnis. Tyrimai rodo, kad vėjo greičiai žiemą didesni negu vasarą (4 pav.).

Atlikti vėjo energijos parametrų matavimai pajūrio regione (Giruliuose) rodo, kad čia vėjo greičiai yra pakankami (5 pav.), palyginti su vėjo greičiais pasirinktose kitose VE statybos aikštelėse. Vidutinis metinis vėjo greitis Giruliuose yra lygus 6,4 m/s 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus.

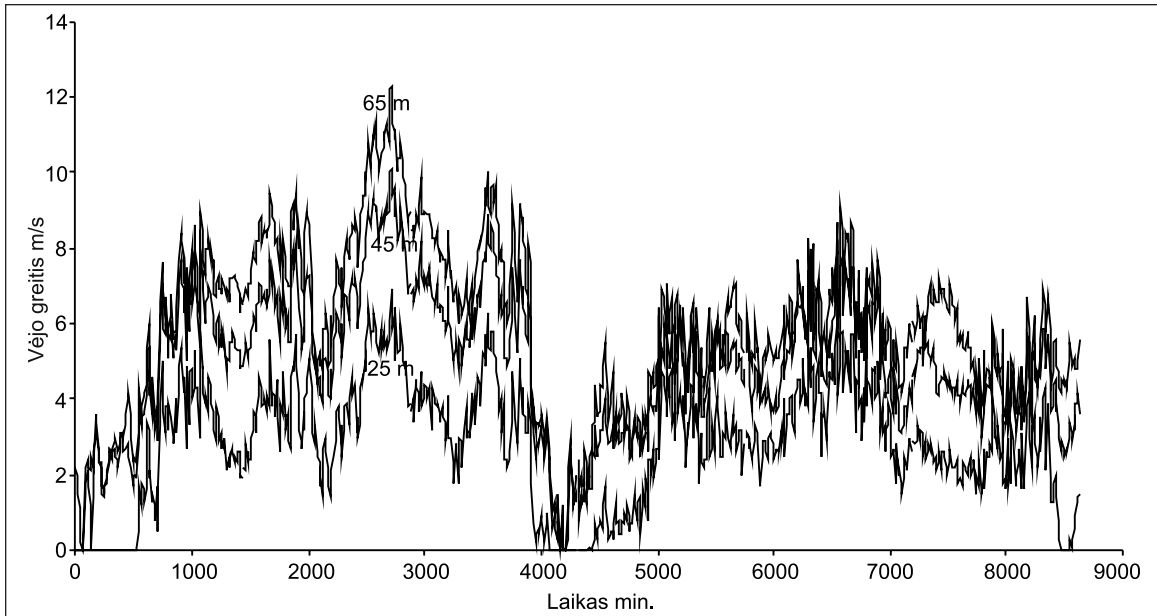
Taigi VE pagaminamos elektros energijos metinis kiekis (Wh/metus) bus:

$$E_m = E A \eta \quad (31)$$

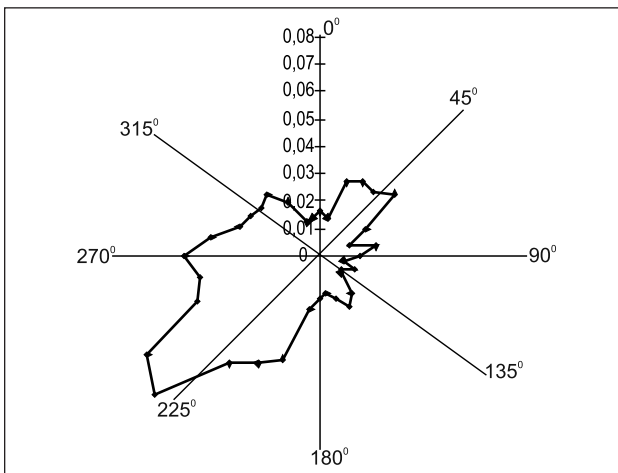
čia E – vėjo energija, apskaičiuojama pagal (11) formulę, vėjaračio ašies aukštyje,

A – VE rotoriaus besisukančių sparnų užimamas plotas, η – VE vėjo energijos konversijos naudingumo koeficientas, apskaičiuojamas pagal (30) formulę.

Vėjo energijos charakteristikoms įvertinti taikomi statistiniai duomenų apdorojimo metodai. Vėjo greičiai Lietuvos



3 pav. Vėjo greičio kitimas 65, 45 ir 25 m aukštyje virš žemės paviršiaus Klaipėdos regione (Giruliai) (2009 m. gegužės 26–31 d.)

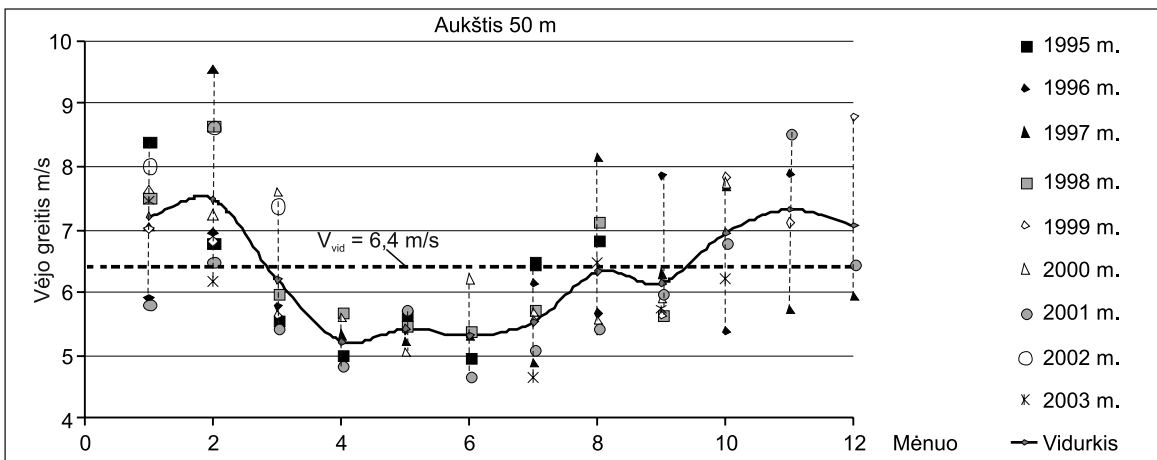


4 pav. Vėjo krypčių pasiskirstymas Klaipėdos regione (Giruliai) per mėnesį (2009 m. birželio 1–25 d.)

teritorijoje buvo matuojami Būtingės terminalo zonoje vykdamas Norvegijos instituto „Institute for energitechnik“ projektą [17]. Taip pat matavimai buvo atlikti Kretingoje, Vilkyčiuose ir Tauragėje vykdamas [18] UNDP projektą. Gauti duomenys [17–19] rodo, kad meteorologijos stočių duomenys gana gerai leidžia pasirinkti VE statybos aikštelę. Tačiau galutinis sprendimas apie VE statybos tinkamumą įmanomas tik atlikus vėjo energetinių parametrų matavimus specialia įranga.

5. VE EFEKTYVUMO ĮVERTINIMAS

VE negali panaudoti visos vėjo sraute glūdinčios energijos. Tai priklauso ne tik nuo vėjaračio konstrukcijos ypatybių, bet ir nuo vietovės vėjingumo. Norint įvertinti, kaip VE konvertuoja vėjo energiją įvairiuose šalies regionuose, buvo atlikta metinė VE galios panaudojimo koeficiento C_p



5 pav. Vidutinių vėjo greičių kitimas Klaipėdos regione (Giruliuose) 1995–2003 m.

kitimo analizė. Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_p = \frac{E_{fakt}}{E_{pot}}; \tag{32}$$

čia E_{fakt} – per tiriamą laikotarpį faktinis pagamintos energijos kiekis;

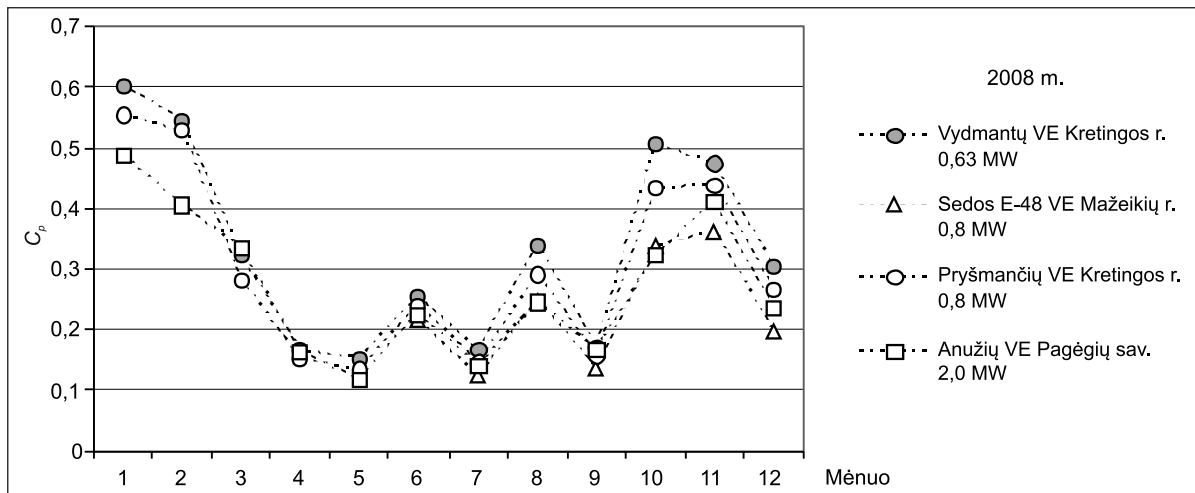
E_{pot} – potencialus energijos, kurią VE pagamintų veikdama nominalia galia, kiekis.

Skaičiavimams naudoti prie Baltijos jūros bei Vidurio Lietuvoje įrengtų VE faktiniai 2006–2008 m. energijos gamybos duomenys [2].

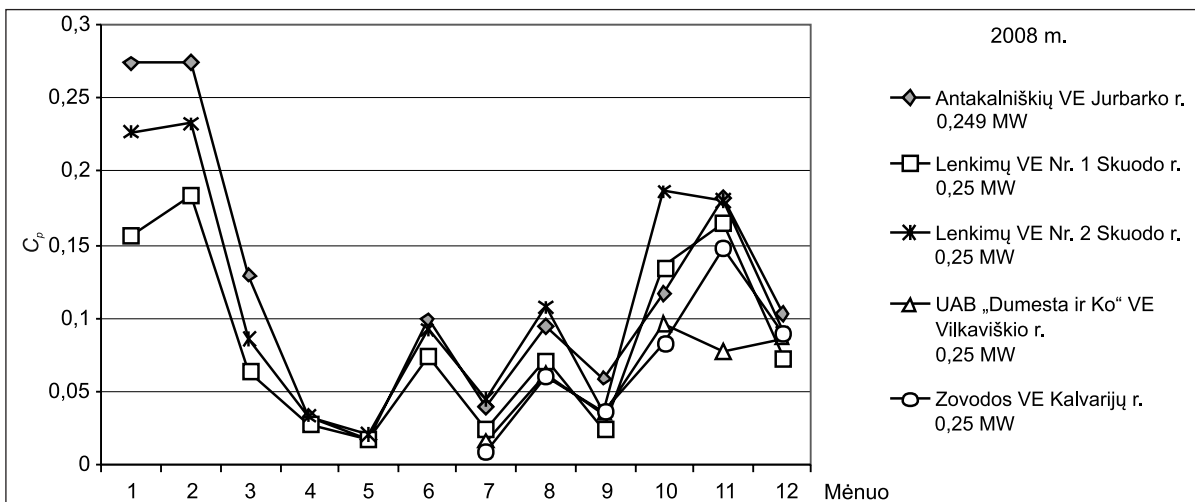
Pateikti didelių VE elektros energijos gamybos duomenys rodo (6 pav.), kad VE galios panaudojimo koeficientas C_p skirtingais metų laikais skiriasi: padidėjimas stebimas spalį–lapkritį, o sumažėjimas – gegužę–rugsėjį. Koeficiento C_p dydis priklauso ir nuo VE geografinės padėties: pajūrio regione veikiančių didelių VE ($N \geq 600$ kW) metinis galios panaudojimo koeficiento vidurkis yra apie 0,265, t. y. jos per metus panaudoja apie 26,5 % nominalios galios. Tai reiškia,

kad VE pagamino tiek energijos, kiek jos būtų pagaminusios veikdamos 2 266 valandas per metus nominalia galia. Ši C_p reikšmė artima Vokietijos žemyninėje dalyje statomų VE galios panaudojimo koeficientui.

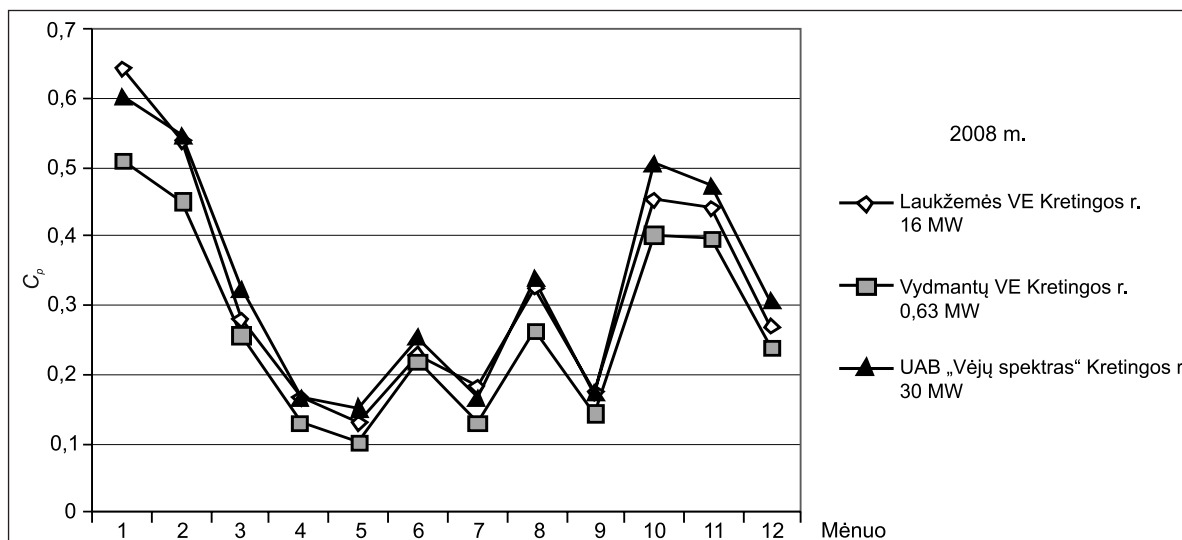
VE, veikiančių įvairiose šalies pajūrio regiono vietovėse, galios panaudojimo koeficientas C_p (6 pav.) mažai skiriasi. Būtina atkreipti dėmesį į tai, kad VE, įrengtų toliau nuo jūros, pastebimas C_p koeficiento mažėjimas. C_p kitimo pobūdis rodo, kad vėjo srautų judėjimai visame šalies pajūrio regione yra koreliuoti. Atlikus matavimus vienoje pasirinktoje vietovėje, galima įvertinti vėjo energetinius parametrus kitose. Visa tai patvirtina Norvegijos instituto Lars Tallhaug Institute for Energy Technology (Kjeller mieste) vėjo srautų koreliacijos tyrimo duomenys. Atliekant vėjo srautų parametų tyrimus matavimo įrangos buvo įrengtos Būtingės terminalo zonoje ir Melnragėje (Klaipėdos priemiestyje) šalia meteorologijos stoties. Tyrimais nustatyta, kad vėjo srautų koreliacijos koeficientas $\rho = 0,82$, t. y. koreliacijos koeficientas artimas 1,0. Tai leidžia taikyti tiesinės regresijos metodus nustatant vėjo energetinius parametrus pasirinktoje VE statybos aikštelėje,



6 pav. Metinis didelių VE ($N \geq 600$ kW) galios koeficiento C_p kitimas pajūrio regione



7 pav. Metinis mažų VE ($N \leq 250$ kW) galios panaudojimo koeficiento C_p kitimas pajūrio regione



8 pav. Metinis VE parkų ir Vydmantų VE galios panaudojimo koeficientų C_p kitimas

panaudojant meteorologijos stočių matavimo duomenis ir trumpalaikius vėjo energetinius matavimus, atliktus toje aikštelėje.

Aikštelės vėjo greičiui įvertinti naudojama formulė:

$$V_a = U_a + \frac{\rho \sigma_a}{\sigma_s} (V_s - U_s); \quad (33)$$

čia V – vėjo greitis,

U – matuotas vėjo greitis,

σ – standartinis vėjo greičio nuokrypis,

ρ – koreliacijos koeficientas.

Indeksai: a – aikštelė, s – meteorologijos stotis.

Mažų VE ($N \leq 250$ kW) C_p koeficiento kitimo pobūdis (7 pav.) Lietuvos pajūrio regione yra panašus kaip ir didelių VE ($N \geq 600$ kW), ir VE parkų (8 pav.).

Tyrimai (8 pav.) rodo, kad VE parkų ir pavieniai įrengtos VE galios panaudojimo koeficiento C_p kitimai per metus yra analogiški. Tai patvirtina, kad pajūrio regione vėjo srautų koreliacija yra didelė. Mažiau efektyvus mažų VE galios panaudojimas, palyginti su didelėmis VE, aiškinamas tuo, kad jos įrengtos blogesnėmis topografinėmis sąlygomis, taip pat jų bokšto aukštis yra mažesnis, negu didelių VE. Todėl statant mažas VE būtina didinti bokšto aukštį. Vėjo energetiniams parametrams įvairiuose aukščiuose apskaičiuoti galima naudotis (5) ar (6) formulėmis, esant mažo turbulentiškumo vėjo srautui, o esant didelio turbulentiškumo vėjo srautui – (25) lygybe.

6. IŠVADOS

1. Energetikos pasaulinės raidos analizė rodo, kad pastaraisiais metais sparčiausiai plėtojosi vėjo energetika, palyginti su kitų tradicinių energetikos šakų plėtra. 2008 m. vėjo energetika pagamino 1,5 % bendro pasaulyje sunaudojamos elektros energijos kiekio, o VE instaliavimo sparta siekė 29 %, palyginus su 2007 m. lygiu. 2008 m. pasaulyje įrengtų VE galia

sudarė apie 121,2 GW. Panašiais tempais VE statyba didėjo Europos Sąjungoje. 2010 m. Lietuvoje įrengtų VE bendra galia sudarė 90 MW.

2. Tyrimais nustatyta, kad pajūrio regione vidutinis metinis vėjo srauto greitis 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus yra apie 6,4 m/s, t. y. pakankamas efektyviam VE funkcionavimui, todėl šis šalies regionas yra vienas perspektyviausių vėjo energetikos plėtrai Lietuvoje. Vyraujančios vėjo kryptys yra šiaurės–vakarų ir pietų–vakarų.

3. Tyrimai rodo, kad vėjo parametrų matavimų rezultatai, gauti šiuolaikine kompiuterine matavimo aparatūra, duoda visą vaizdą apie vietovės tinkamumą VE statybai, leidžia optimaliai parinkti VE tipą, jos pagrindinius techninius parametrus, o vėjo greičio stebėjimo duomenų aproksimavimo Veibulo pasiskirstymo funkcijomis metodas yra korektiškas ir tinka VE statybos aikštelių efektyvumui įvertinti.

4. Tyrimais nustatyta, kad vėjo srautai šalies pajūrio regione yra koreliuoti. Koreliacijos koeficiento reikšmė apytiksliai lygi 0,82 ir daugiau. Tai leidžia įvertinti vėjo energetinius parametrus pasirinktoje VE statybos aikštelėje turint jų matavimų gretimoje vietoje duomenis.

5. Analizuojant VE galios panaudojimo koeficiento C_p kitimo pobūdžius nustatyta, kad šalies pajūrio regione panaudojama apie 26,2 % didelių VE instaliuotos galios. Mažų VE C_p yra kur kas mažesnis, negu didelių. Todėl statant mažas VE būtina didinti VE bokšto aukštį.

Gauta 2010 02 15

Priimta 2010 09 20

Literatūra

1. Pikšrys S. *Vėjo energijos plėtra ir perspektyvos Lietuvoje*. <http://www.lsta.lt/lt/events/view/240> (2009 06 19).
2. *Lietuvos energija*. <http://www.lpc.lt/lt>
3. *Wind Resource Assessment Handbook*. AWS Scientific, Inc. National Renewable Energy Laboratory, CO, USA, 1997.

4. *Offshore Wind Energy – Ready to Power a Sustainable Europe*. Final Report from the Project Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe. 2001. www.offshorewindenergy.org
5. Henderson A. R., Morgan C., Smith B., Sorensen H. C., Barthelmie R. J., Boesmans B. Offshore wind energy in Europe – a review of the State-of-the-Art. *Wind Energy*. 2003. Vol. 6. P. 35–52.
6. Nielsen P. *Offshore Wind Energy Projects Feasibility Study Guidelines*. SEAWIND altener project 4.1030/Z/01-103/2001. EMD, Aalborg, Denmark, 2003.
7. *World Wind Energy Association*. <http://www.wwindea.org/home/index.php>
8. *Britų vėjo energetikos asociacija*. <http://www.bwea.com/offshore/index.html>
9. *Danijos vėjo pramonės asociacija*. <http://www.windpower.org/en/tour/econ/index.htm>
10. Katinas V., Tumosa A. *Vėjo energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje*. Vilnius, 1995. 37 p.
11. Birgiolas E., Katinas V. Investigation of wind flow turbulence and energy parameters. *Energetika*. 2004. Nr. 4. P. 24–28.
12. Wicom-C datalogger. *Ammonit Gesellschaft fur Messtechnik*. Berlin, 1994. 63 p.
13. *Ammonit*. <http://www.ammonit.de/english/page2.html>
14. Birgiolas E., Katinas V. Vėjo srauto parametrų kitimo dėsningumų tyrimas Lietuvos pajūryje. *Energetika*. 2006. Nr. 2. P. 29–33.
15. Casch R., Twele J. *Wind Power Plants*. Berlin: Solarprapaxis, 2002. 390 p.
16. Hansen M. O. L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. London: James and James Ltd, 2000. 144 p.
17. *The Wind Regime at Butinge, Lithuania*. Kjeller: Institute for Technology, Norway, 1996. 23 p.
18. Rathmann O. *The UNDP / GEF Baltic Wind Atlas. Riso-R-1402 (EN)*. Riso National Laboratory, Roskilde, 2003. 36 p.
19. Markevičius A., Katinas V., Marčiukaitis M. Wind energy development policy and prospects in Lithuania. *Energy Policy*. 2007. Vol. 35. Iss. 10. P. 4893–4901.

Vladislovas Katinas, Antanas Markevičius,
Marijona Tamašauskienė, Judita Zita Vilemienė

INVESTIGATION OF WIND FLOW PARAMETERS IN THE LITHUANIAN COASTAL REGION

Summary

The possibility of using wind energy in Lithuania is considered. Data of an experimental investigation in the Lithuanian coastal region show that the Weibull function parameters are suitable for assessing the sites of wind turbine construction. In the Lithuanian coastal region, the average wind velocity 50 m above the ground level is 6.4 m/s. There are constant changes of wind direction and wind speed. They exert a negative influence on the wind turbines operation by decreasing the generation of energy and require more

expensive equipment for the generation of good quality electricity. In this research, data collected from anemometer sensors and wind speed measurements were used. Production of wind turbines (WT) installed at a different distance from the Baltic Sea shows that the mean annual capacity factor C_p of WT installed in the coastal region reaches about 0.265. The value of C_p for WT installed in the middle of country is the considerably lower. Wind stream velocities show a good correlation in different sites of Klaipėda Region. Therein, the cross correlation coefficient is about 0.82, i. e. close to 1.0. So, it is possible to predict wind speed in sites of WT, when the wind velocity in one place of this region is known.

Key words: wind turbines, rotor, conversion, capacity factor, energy, correlation, turbulence, efficiency

Владисловас Катинас, Антанас Маркявичюс,
Мариона Тамашаускене, Юдита Зита Вилемене

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВЕТРА В ПРИМОРЬЕ ЛИТВЫ

Резюме

Рассмотрены возможности применения ветроэнергетики в Литве. Проведено экспериментальное исследование параметров ветра в приморском регионе Литвы. Установлено, что при обобщении параметров ветра функция Вейбулла достаточно хорошо описывает данные, которые могут быть использованы при учете эффективности площадок для строительства ветровых электростанций. Параметры и турбулентность ветра заметно меняются в течение суток. Это зависит от шероховатости местности, доминирующего направления ветровых потоков и метеорологических условий. В приморском регионе Литвы средняя годовая скорость ветра в 50 метрах от поверхности земли составляет 6,4 м/с, однако величина скорости и турбулентность ветра постоянно меняются. Это отрицательно влияет на работу ветровых электростанций, так как уменьшается количество производимой электроэнергии, кроме того, требуется дорогостоящая аппаратура для получения высококачественной электроэнергии, параметры которой установлены требованиями Европейских стандартов. Исследование производства электроэнергии ветровых станций показало, что в приморском регионе Литвы коэффициент использования мощности таких электростанций составляет около 0,265. Однако внутри территории Литвы значение коэффициента C_p значительно ниже, чем в приморском регионе. Исследования показали, что скорость ветрового потока в различных местах Клайпедского региона высоко коррелирована. Коэффициент корреляции около 0,82, т. е. он близок к 1,0. Поэтому имея измерения скорости ветра в одном из мест, мы можем определить её и на тех площадках, где планируется строительство ветровых электростанций.

Ключевые слова: ветровые электростанции, ротор, конверсия, коэффициент мощи, энергия, корреляция потоков, турбулентность, эффективность