

# Vėjo srauto parametrų kitimo dėsningumų tyrimas Lietuvos pajūryje

**Evaldas Birgiolas,**

**Vladislovas Katinas**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Atsinaujinančių energijos  
šaltinių laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas*

Darbe nagrinėjamos vėjo energijos panaudojimo Lietuvoje galimybės. Nustatyta, kad vėjo energijos išteklių šalyje nėra dideli. Todėl atsižvelgiant į kitus nedidelius Lietuvos energijos išteklius ir prisiimtus įsipareigojimus Europos Sąjungai, būtina siekti didesnio vėjo energijos panaudojimo elektros gamybai. Siekiant įgyvendinti užsibrėžtus tikslus turime iširti ir įvertinti vėjo energijos panaudojimo ypatumus mūsų šalyje bei numatyti galimas technologines naujoves eksploatuojant vėjo elektrines (VE). Atlikus eksperimentinius tyrimus Lietuvos pajūrio zonoje ir išanalizavus duomenis gauta, kad stebėjimo duomenų aproksimavimo metodas Veibulo tankio pasiskirstymo funkcija yra korektiškas ir tinka VE statybos aikštelių efektyvumui įvertinti. Vėjo parametrai ir jo turbulencijos lygis per parą kinta. Tam turi įtakos vietovės reljefo šiurkštumo laipsnis, vėjo kryptis ir vietovės meteorologinės sąlygos. Nustatyta, kad vidutinis metinis vėjo greitis 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus Lietuvos pajūrio regione yra apie 6,4 m/s, taip pat pastoviai kinta vėjo greitis, turbulencija ir kryptis. Visa tai turi neigiamą įtaką VE darbui, kadangi mažėja gaminamos elektros energijos kiekis. Be to, kyla įrangos, VE integravimo į elektros perdavimo tinklus kainos, siekiant užtikrinti gaminamos energijos standartais apibrėžtus kokybės rodiklius.

**Raktažodžiai:** vėjo greitis, turbulencija, vėjo energijos srautas, vėjo elektrinė, vėjaratis, vėjo energijos konversija, paviršiaus šiurkštumas, meteorologinės sąlygos

## 1. ĮVADAS

Didėjant kuro ir energijos (šilumos ir elektros) kainoms, pastaraisiais metais ypač daug dėmesio skiriama vietiniams, atsinaujinantiems ir atliekiniams, energijos šaltiniams. Šalyje naujai rengiami ir priimami įstatymai, nutarimai bei kiti teisės norminiai dokumentai, reglamentuojantys vietinio bei atsinaujinančio kuro panaudojimą energijos gamybai, ruošiami techniniai reikalavimai numatomiems statyti energijos gamybos objektams, vartojantiems atsinaujinančius ir atliekinius energijos šaltinius. Tačiau toli gražu, dar ne visi šalies atsinaujinančių energijos šaltinių išteklių yra panaudojami. Antai galimi vėjo energijos išteklių Lietuvoje [1–4], atsižvelgiant į vietovės reljefą, esamus statinius ar kt. kliūtis (krūmai, aukšti medžiai, žolės ir t. t.), jų aukštį nuo žemės paviršiaus, vėjo greitį, oro tankį ir kt. būdingus parametrus, per metus, preliminariais skaičiavimais, gali sudaryti apie 0,2 TWh arba kompensuoti apie 18 tūkst. t importuojamos naftos. Tikslus Lietuvos vėjo energijos išteklių įvertinimui būtina atlikti tyrimus įvairiuose šalies regionuose, kaip tai buvo atliekama kitose už-

sienio šalyse [5–7]. Tai leidžia nustatyti vėjo energetikai plėtoti palankias vietas.

Tačiau suprantama, kad vėjas, kaip pagrindinis vėjo elektrinių (VE) energijos šaltinis, sunkiai prognozuojamas per metus. Be kita ko, vėjo srautas, aptekantis VE vėjaračio darbo mentes, ne visuomet yra vienodo aerodinaminio režimo: laminarinio ar turbulentinio. Dėl šių priežasčių [8, 9] kinta VE pagamintos elektros energijos kiekis. Siekiant efektyvesnio vėjo energijos panaudojimo, būtina žinoti vėjo parametrų kitimo dėsningumus, kurie yra apibrėžiami vietovės reljefo ir meteorologinėmis sąlygomis. Tyrimai [9–12] rodo, kad meteorologinių stočių duomenys leidžia tik preliminariai įvertinti vietovės tinkamumą vėjo energetikos plėtrai. Todėl norint tiksliai nustatyti VE efektyvumą pasirinktoje vietovėje būtini išsamūs vėjo parametrų tyrimai įvairiuose aukščiuose panaudojant šiam tikslui sukurtą šiuolaikinę įrangą. Straipsnyje analizuojamas vėjo srauto energetinių rodiklių kitimas pajūrio regione, perspektyviausiam vėjo energetikai plėtoti. Šiame regione remiantis preliminariais tyrimais yra numatytos VE statybos zonos, kuriose konkurso keliu parenkami investuotojai. Todėl

gauti tyrimai yra labai svarbūs vertinant šio regiono vėjo energetikos plėtros galimybes, taip pat parenkant vėjo elektrines. Nesant pakankamo VE produktyvumo, jų įrengimas pasirinktoje vietovėje ir ekonominis pagrįstumas mažėja, kadangi atsipirkimo laikotarpis pailgėja.

Šio darbo tyrimus rėmė Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas.

## 2. TYRIMŲ METODIKA

Vėjo srauto parametrų matavimams naudota vokiečių bendrovės *Ammonit* matavimo įranga *Wicom-C* bei kaušelių tipo anemometrai [5]. Matavimo įranga sumontuota ant stovo, kuris stovi ant kalvos, 24 m aukštyje virš jūros paviršiaus lygio. Vietovės koordinatės: 21° 09' rytų ilgumos ir 55° 46' šiaurės platumos. Vėjo parametrai fiksuojami kas 10 sekundžių, suintegruojami ir kas 10 minučių užrašomi į matavimo įrangos atmintį. Vėjo parametrai buvo registruojami prietaisais 10, 30 ir 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus, o vėjo kryptis tik – 30 m aukštyje. Vėjo turbulencijos parametrai įvertinti remiantis kelių mėnesių vėjo greičių matavimo rezultatais, įrašytais į matavimo įrangos atmintį, Giruliuose (1,5 km nuo Baltijos jūros). Matavimo duomenims apibendrinti panaudota *Microsoft* programa *Excel*. Tyrimo metu gauti duomenys buvo konvertuojami ir išsaugomi kompiuterio atmintyje, o apibendrinti tyrimo rezultatai pateikiami grafikuose ir lentelėse.

Vidutinis vėjo greitis apskaičiuojamas:

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

čia  $V_i$  – momentinė vėjo greičio reikšmė fiksuojamu momentu (m/s);  $k$  – fiksuojamų reikšmių skaičius,  $k = 1, 2, \dots, 60$ .

Standartinis vėjo greičio nuokrypis skaičiuojamas:

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

Vėjo srauto turbulencijos lygis ( $Tu$ ) išreiškiamas:

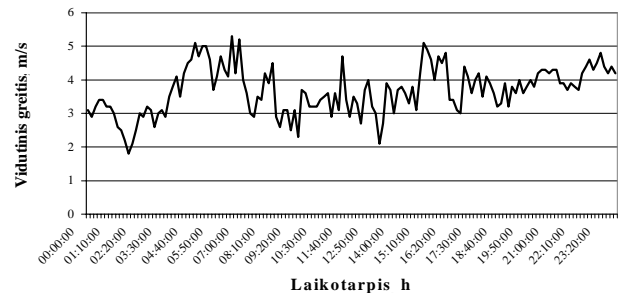
$$Tu = \frac{\sigma}{V_{vid.}} \cdot 100 (\%). \quad (3)$$

## 3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APIBENDRINIMAS

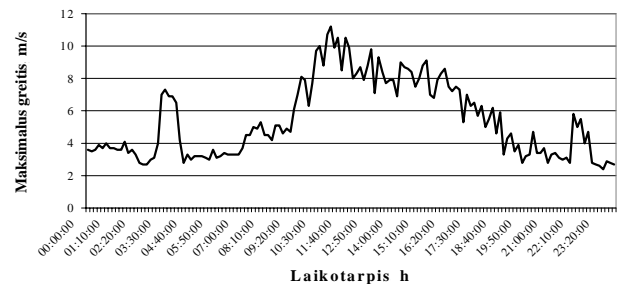
Pasirinktoje vietovėje vėjo greičio ir krypties skaičiavimams nemaža įtakos turi įvairūs urbanistikos objektai (gyvenamieji, visuomeninės ar viešosios paskirties pastatai ir kt.), gamtinės kliūtys, žemės paviršiaus reljefas (lygūs ar gauburiuotas, duobėtas) ir želdiniai (aukšta žolė, krūmai, pavieniai medžiai, miškai). Vėjo srautui atitrūkus nuo aptekamos kliūtis formuojasi besisukan-

tys vėjo sūkurių, turintys įtakos vėjo greičiui ir kryptiai. Sukaupus matavimo duomenis, skirtinguose aukščiuose pasirinktu dažniu (kas 10 s) buvo apskaičiuotos pagrindinės statistinės vėjo charakteristikos: minimalus, vidutinis ir maksimalus vėjo greičiai per mėnesį. Kaip matyti 1 ir 2 paveiksluose, didžiausi vėjo srauto būdingų greičių nuokrypių impulsai pasireiškia naktį.

Analogiškos vėjo greičių profilių reikšmės gaunamos 30 ir 10 m matavimo aukščiuose.



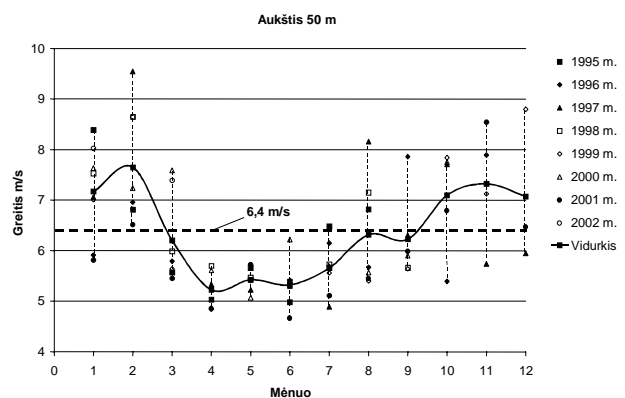
1 pav. Vidutinio vėjo greičio kitimas 50 m aukštyje per parą



2 pav. Maksimalaus vėjo greičio kitimas 50 m aukštyje per parą

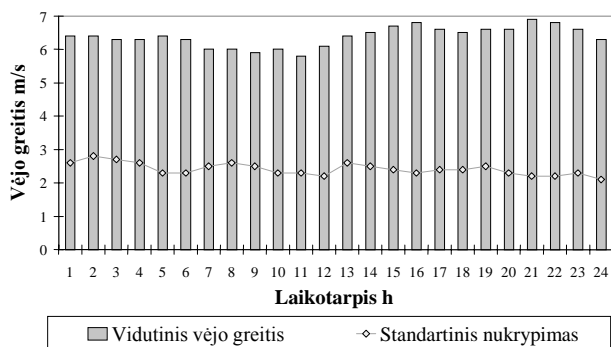
Atlikti vėjo energijos parametrų matavimai pajūrio regione (Giruliuose) rodo, kad čia vėjo greičiai yra pakankami (3 pav.), palyginti su vėjo greičiais pasirinktose kitose Lietuvos VE statybos aikštelėse. Vidutinis metinis vėjo greitis Giruliuose yra lygus 6,4 m/s 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus. Vyraujančios vėjo kryptys – šiaurės vakarų ir pietvakarių. Matavimai rodo, kad didžiausi vėjo greičiai yra žiemą, o mažiausi – vasarą.

Gauti matavimo duomenys (4 ir 5 pav.) rodo, kad vėjo greičio pulsacijos yra pakankamai didelės.

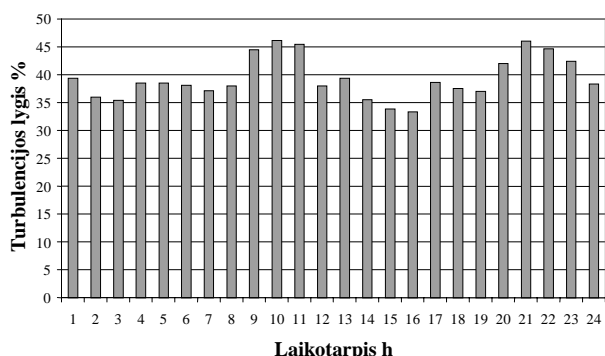


3 pav. Vidutinių vėjo greičių kitimas Klaipėdos regione (Giruliuose) 1995–2002 m.

Susiformavusios vėjo greičio pulsacijos neigiamai veikia VE įrengimus (vėjaračių, multiplikatorių ir kt.) ir trikdo įprastinį jų darbą bei sumažina tarnavimo laiką. Esant turbulenciniam vėjo srautui kinta vėjo kinetinė energija, be to, netolygiai pasiskirstęs vėjo srautas nevienodai apteka vėjaračio darbo mentes, todėl sumažina vėjo elektrinės pagaminamos energijos kiekį. Smarkūs sukūriai (turbulenciniai), vėjo gūšiai gali nepataisomai sugadinti VE įrengimus (vėjaračio mentes ir kt.).

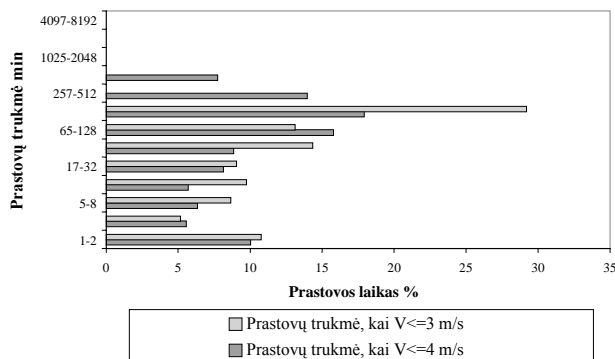


4 pav. Vėjo greičio ir standartinio nukrypimo grafikai per parą



5 pav. Vėjo srauto turbulencijos lygis per parą

Pasitaiko atvejų, kai VE vėjaračio ašies aukštyje vėjo greitis yra per didelis ar per mažas, todėl stabdomas įrenginio darbas. Tais atvejais, kai vėjo greitis 50 m aukštyje didesnis nei 25 m/s ar 20 m/s – 30 m aukštyje, matavimo įranga užfiksuoja vadinamuosius kritinius momentus, vėjo parametrų reikšmės užrašomos kas sekundę ar kitu pasirinktu dažniu. Duomenys išsaugomi matavimo įrangos atmintyje ir pasitelkus skaičiavimo algoritmą nustatomos pagrindinės pasirinkto laikotarpio vėjo charakteristikos. Taip pat apskaičiuojami duomenys, kiek laiko vėjo greitis per mėnesį gali būti mažesnis nei 4 m/s – 50 m aukštyje ar 3 m/s – 30 m aukštyje, t. y. laikotarpiai, kurių metu šiuolaikinės didelės galios VE negali dirbti dėl per mažo vėjo greičio. Gauti duomenys (6 pav.) rodo, kad prastovų trukmė pagal laiką yra skirtinga. Dažniausiai pasikartoja prastovos, kurių trukmės laikas nuo 128 iki 258 min., tai sudaro apie 20–30% visų prastovų trukmės. Kitų prastovų trukmė yra gerokai trumpesnė, negu minėtos prastovos.



6 pav. Vėjo srauto mažų greičių grafikas

Apibendrinus vėjo parametrų tyrimo duomenis galima įvertinti energijos srautą, suteiktą vėjaračiui. Tai leidžia nustatyti projektuojamos VE darbo trukmę, pagamintos energijos kiekį, apskaičiuoti VE ekonominį efektą bei atsipirkimo laiką, taip pat VE darbo elementų tarnavimo trukmę.

Vėjo energijos srautas (1 lentelė), esant pastoviam vėjo greičiui, priklausomai nuo oro tankio apskaičiuojamas:

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

čia  $E$  – vėjo energijos srautas ( $W/m^2$ );

$\rho$  – oro tankis ( $kg/m^3$ );

$V$  – vėjo greitis (m/s).

1 lentelė. Vėjo energijos srautas, kai  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ,  $T = 15^\circ C$

Vėjo greitis m/s	Energijos srautas $W/m^2$
0	0
1	0,6
2	4,9
3	16,5
4	39,2
5	76,6
6	132,3
7	210,1
8	313,6
9	446,5
10	612,5
11	815,2
12	1058,4
13	1345,7
14	1680,7
15	2067,2
16	2508,8
17	3009,2
18	3572,1
19	4201,1
20	4900,0
21	5672,4
22	6521,9
23	7452,3

Vėjo greitis labai priklauso nuo aukščio virš žemės paviršiaus. Žinant vėjo greitį pasirinktame aukštyje  $h_1$ , vėjo greitį aukštyje  $h_2$  galima apskaičiuoti pagal (5) formulę pasitelkus logaritminę išraišką:

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{h_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right)} \quad (m/s); \quad (5)$$

čia  $V_1$  – aukštyje  $h_1$  išmatuotas vėjo greitis (m/s);

$V_2$  – aukštyje  $h_2$  skaičiuojamas vėjo greitis (m/s);

$h_0$  – vietovės šturkštumo parametras;

$h_0 = 0,1 \cdot h_n$ ,  $h_n$  – šturkštumo elemento aukštis (m);

$h_1$  – matuojamas vėjo greitis meteorologinėse stotyse 10 m aukštyje (m);

$h_2$  – skaičiuojamas vėjo greitis pasirinktame aukštyje (m).

Visa tai leidžia parinkti statomos VE bokšto aukštį.

Priklausomai nuo esamų kliūčių vietovėje (šturkštumo laipsnio) ir meteorologinių sąlygų pokyčių pastoviai kinta vėjo greitis ir kryptis, taip pat vėjo energijos srauto dydis. Tada vėjo energijos srautas aprašomas stacionarine funkcija, o vėjo energijos srautas išreiškiamas:

$$E = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} f(v) V^3 dv \quad (W/m^2); \quad (6)$$

čia  $f(v)$  – greičio tikimybių pasiskirstymo funkcijos tankis. Ši funkcija nustatoma pagal vėjo greičio reikšmių pasiskirstymo grafiką (7 pav.).

Iš empirinių vėjo greičio histogramų matyti, kad aproksimuojantis tikimybių pasiskirstymo tankis turi turėti ryškų maksimumą greičių 5–10 m/s intervale ir teigiamą asimetriją. Šioms sąlygoms įvertinti (7 pav.) priimtinausias Veibulo pasiskirstymo tankis [3]:

$$f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^k} = 1 - e^{-AK^k}; \quad (7)$$

čia  $A = \frac{1}{a^k}$ ;  $a$  ir  $k$  – Veibulo pasiskirstymo tankio funkcijos parametrai.

Iš (6) ir (7) lygybių gaunama lygtis vėjo energijos srautui ( $W/m^2$ ) apskaičiuoti:

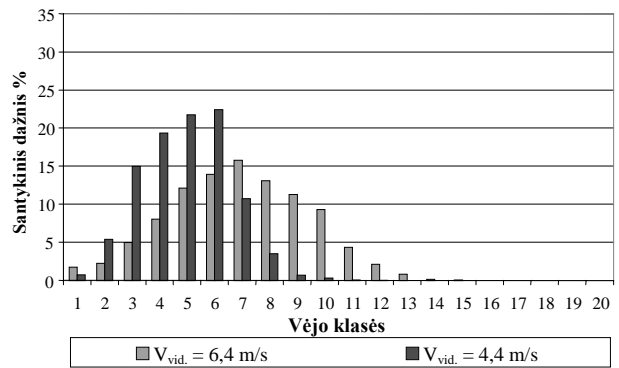
$$E = 0,5 \rho a^3 \Gamma(1 + 3/K); \quad (8)$$

čia  $\Gamma$  – Eulerio gama funkcija.

Veibulo pasiskirstymo parametrus apskaičiuoti gali būti taikomi įvairūs skaičiavimo metodai, dažniausiai – mažiausių kvadratų metodas. Šiuo metodu apibendrinus kelerių metų vėjo greičio kitimo stebėjimo duomenis vietovėje, kurioje numatoma įrengti VE, yra nustatoma empirinė pasiskirstymo funkcija. Norint nustatyti vėjo greitį pasirinktame aukštyje, daroma prielaida, kad

tikimybių pasiskirstymas dėl  $V_{h_1}$  ir  $V_{h_2}$  priklauso tam pačiam Veibulo pasiskirstymo tankio funkcijos tipui. Tokiu būdu gaunama, kad  $(a_{h_1}, k_{h_1})$  ir  $(a_{h_2}, k_{h_2})$  ryšys atitinkamiems skaičiavimams nuo žemės paviršiaus pasirinktuose aukščiuose  $h_1$  ir  $h_2$  išreiškiamas lygybėmis:

$$a_2 = \alpha \cdot a_1^\beta; \quad (9)$$



7 pav. Vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas

$$k_2 = \frac{k_1}{\beta}; \quad (10)$$

$$\text{čia } \alpha = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{B_0}; \quad (11)$$

$$\beta = 1 + B_1 \cdot \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right). \quad (12)$$

Vidutinis greitis apskaičiuojamas:

$$v_{\text{vid.}} = a \Gamma(1 + 1/K) \quad (m/s). \quad (13)$$

Nustačius Veibulo pasiskirstymo parametrus, galima nesunkiai apskaičiuoti VE technines ir ekonomines charakteristikas, t. y. generuojamos energijos kiekį, atsipirkimo laiką ir kt. parametrus.

#### 4. IŠVADOS

1. Lietuvos pajūrio zonoje įrengta šiuolaikinė vėjo energijos parametru matavimo įranga (WICOM-C), atlikti vėjo energijos parametru matavimai, kurie leidžia apskaičiuoti VE techninius ir ekonominius rodiklius.

2. Matavimo duomenų matematinės analizės rezultatai rodo, kad pasirinktas vėjo greičio stebėjimo duomenų aproksimavimo Veibulo pasiskirstymo funkcijomis metodas yra korektiškas ir tinka VE statybos aikštelių efektyvumui įvertinti.

3. Tyrimo duomenys rodo, kad pajūrio regione vidutinis metinis vėjo srauto greitis 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus yra 6,4 m/s, t. y. pakankamas efektyviam VE funkcionavimui, todėl šis šalies regionas yra vienas perspektyviausių vėjo energetikos plėtrai Lietuvoje.

Gauta 2006 01 04

**Literatūra**

1. Katinas V., Markevičius A., Birgiolas E. Vėjo energetikos panaudojimo galimybės Lietuvoje // Lietuvos mokslas ir pramonė. Kauno technologijos universitetas, 2003. Šilumos energetika ir technologijos. Kaunas: Technologija, 2003. P. 283–287.
2. Katinas V., Skema R. Renewable energy policy in Lithuania // Energy Policy. 2001. Vol. 29. P. 811–816.
3. Katinas V., Markevičius A. Vėjo energetika. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2001. 77 p.
4. Nacionalinė energetikos strategija. Kaunas: Lietuvos energetikos institutas, 2002. 44 p.
5. Wicom–C Datalogger // Ammonit Gesellschaft fur Messtechnik. Berlin, 1994. 63 p.
6. Petersen E. L., Troen I. Estimation of Wind Resources // Wind Energy in Denmark. Research and Technological Development, 1990. Copenhagen. Ministry of Energy. Danish Energy Agency. 1991. P. 30–37.
7. Sagrillo M. How estimate your average wind speed // Windletter. 1996. Vol. 23. No. 1. P. 4.
8. Sesto E. Execute Committee Chairman's Editorial // Wind Energy Newsletter. Intern. Energy Agency. 1995, No. 8. P. 1–12.
9. Wind Energy the Facts/European Wind Energy Association (EWEA). Belgium: European Community, 1999. 230 p.
10. Estimation of the wind resource at proposed wind turbine sites: The problems of spatial and temporal variability / J. P. Palutikof, J. H. Bass, J. A. Halliday, T. D. Davies and R. J. Barthelmie // Wind Engineering. 1990. Vol. 14. No. 1. P. 1–8.
11. The potential of wind energy in Sor-Trondelag, Norway // Proceedings of European community wind energy conference in Germany. March, 1993. P. 87–90.
12. Behnke R., Kampet, Moder M., Usievich V. Market Analysis for the Implementation of Wind Energy Technologies along the Eastern Baltic Coast. Berlin: Ministerium für Wirtschaft, 1993. 24 p.

**Evaldas Birgiolas, Vladislovas Katinas****ASSESSMENT OF WIND FLOW PARAMETERS ON LITHUANIAN COAST****Summary**

The possibility of using wind energy in Lithuania is investigated. Wind flow sources on the Lithuanian coast are rather small, however, considering the national obligations to the European Union it is necessary to increase the use of renew-

able energy sources in the country's electricity production. To reach this aim, it is necessary to evaluate wind energy resources and to foresee possible technological obstacles for the exploitation of wind turbines. Data of an experimental investigation of the Lithuanian coast region show that Weibull function parameters are fit for the evaluation of the sites of wind turbine construction. Wind parameters and the level of turbulence are changing during the day. It depends on the roughness of the surface, direction of the wind and other meteorological conditions. In Lithuanian coast region, the average wind velocity is 6.4 m/s 50 m above ground level. There are constant changes of wind direction and turbulence level, which cause a negative influence on the wind turbine operation, because it decreases the generation of energy and needs more expensive equipment for the generation of good quality electricity. In this research, data collected from anemometer sensors on the Lithuanian coast were used.

**Key words:** wind velocity, turbulence, wind energy, wind power plant, weather conditions

**Эвальдас Биргиолас, Владисловас Катинас****ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВЕТРА В ПРИМОРЬЕ ЛИТВЫ****Резюме**

Исследуются возможности применения ветроэнергетики в Литве. Установлено, что в стране потенциал ветровой энергии невелик. Согласно принятым Литвой по требованию Евросоюза обязательствам, в стране должно быть расширено использование ветровой энергии. Необходимо исследовать особенности применения ветра в энергетике в различных регионах Литвы. Осуществлено экспериментальное исследование параметров ветра в приморском регионе Литвы. Установлено, что при обобщении параметров ветра функция Вейбула достаточно хорошо обобщает 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 ветра и метеорологических условий. В приморском регионе Литвы средняя годовая скорость ветра на высоте 50 метров от поверхности земли – 6,4 м/с, однако скорость и турбулентность ветра постоянно меняются, что отрицательно влияет на работу ветровых электростанций, так как при этом сокращается количество производимой электроэнергии, кроме того, требуется дорогостоящая аппаратура – для получения высококачественной энергии, параметры которой определяются требованиями европейских стандартов.

**Ключевые слова:** скорость ветра, турбулентность, поток ветровой энергии, ветровая электростанция, конверсия ветровой энергии, шероховатость поверхности, метеорологические условия