

# Vėjo energijos ištekliai ir stebėjimo postų kūrimas Lietuvoje

Vladislovas Katinas,  
Antanas Markevičius

Lietuvos energetikos institutas,  
Atsinaujinančių energijos šaltinių  
laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-3035 Kaunas

Vėjo energijos ištekliams Lietuvoje nustatyti buvo panaudota moderni matavimo aparatūra. Vėjo parametrams nustatyti panaudotas matematinis modelis, atitinkantis tarptautinius standartus, leidžiantis nustatyti vėjo energijos išteklius įvairiose vietose ir įvairiuose aukščiuose nuo žemės paviršiaus.

Rezultatai gali būti panaudoti vėjo jėginių statybos vietai parinkti, taip pat jų galingumui nustatyti.

**Raktažodžiai:** vėjo energija, ištekliai, stebėjimo postai

## 1. ĮVADAS

Šiuo metu Lietuvoje pagrindiniai energijos šaltiniai yra įvežtinis kuras ir branduolinė energija. Europoje vis daugiau dėmesio skiriama atsinaujinantiems energijos šaltiniams, tarp jų ir vėjo energetikai.

Daugiausia vėjo jėginių [1, 2] buvo pastatyta Vokietijoje, Danijoje, Olandijoje ir kitose šalyse. Šiuo metu Vokietijoje veikiančių vėjo jėginių galia 2002, Danijoje – 1135, Olandijoje – 349, Švedijoje – 123, Latvijoje – 2 x 0,6 MW, pradėta statyti jėgainės Estijoje. Galima tikėtis, kad pirmosios modernios vėjo jėgainės mūsų šalyje bus pastatytos artimiausiu metu.

Vėjo energijos išteklių įvertinimas atliekamas, remiantis daugiamečiais vėjo greičio ir krypties matavimais. Pirminiai vėjo energijos išteklių duomenys skaičiuojami, remiantis meteorologijos stočių matavimo duomenimis. Po to parenkamos vėjo jėginių statybos aikštelės, o jų tinkamumas galutinai nustatomas atliekant 0,5 metų arba 1 metus matavimus tam tikslui skirta aparatūra. Lietuvoje yra apie 25 meteorologijos stotys, kurios gana tolygiai išdėstytos po visą šalies teritoriją. Čia vėjo greičio ir krypties matavimai atliekami kas 3 val. Nustatyta, kad daugiausia stočių laikomasi Pasaulinės meteorologijos organizacijos (PMO) reikalavimų.

## 2. VĖJO ENERGIJOS IŠTEKLIŲ SKAIČIAVIMAS

Vėjo energijos kiekis per 1 s, tenkantis 1 m<sup>2</sup> vėjaračio plotui, statmenam vėjo srautui, esant pastoviam vėjo greičiui, skaičiuojamas pagal formulę [2]:

$$E = 0,5 \rho V^3; \quad (1)$$

čia  $\rho$  – oro tankis,  $V$  – vidutinis vėjo greitis m/s,  $E$  – energija W/m<sup>2</sup>.

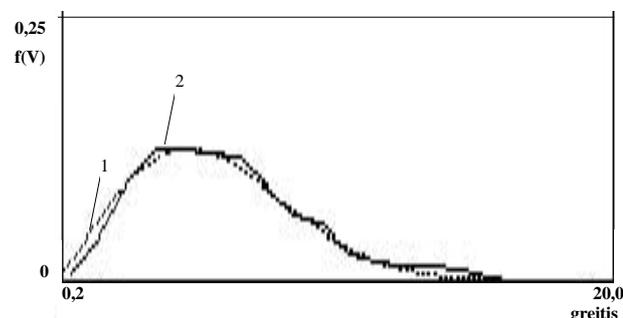
Vėjas dažnai keičia savo dydį ir kryptį, todėl pastoviai kinta ir energija  $E(t)$ . Kai vėjo greitis aprašomas atsitiktine stacionarine laiko  $t$  funkcija, vėjo energiją galima išreikšti

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

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

Empirinėse vėjo greičio histogramose matyti (1 pav.), kad aproksimuojantis tikimybių pasiskirstymo tankis turi turėti ryškų maksimumą greičių intervale 5–10 m/s ir teigiamą asimetriją. Šioms sąlygoms įvertinti tinkamiausias Veibulo pasiskirstymo tankis [3]:

$$f(V) = \frac{K}{a^K} V^{K-1} e^{-(V/a)^K} = KAV^{K-1} e^{-AV^K}. \quad (3)$$



1 pav. Empirinis (1) ir aproksimuojantis (2) tikimybių pasiskirstymo tankiai. Matavimo aukštis 50 m, vėjo vidutinis greitis 5,72 m/s, Veibulo pasiskirstymo parametrai  $a = 6,45$ ,  $k = 2,06$

Atitinkama Veibulo pasiskirstymo funkcija:

$$F(V) = 1 - e^{-(V/a)^K} = 1 - e^{-AV^K}; \quad (4)$$

čia  $A = 1/a^K$ .

Parametrai  $a$  ir  $K$  yra nustatomi įvairiais metodais [4]. Plačiausiai paplitęs mažiausių kvadratų metodas. Jis 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 tokie dydžiai, kad pagal (4) formulę apskaičiuota pasiskirstymo funkcija (1 pav.) būtų kuo artimesnė empirinei funkcijai  $F^-(V_i)$ . Artimumo sąvoką apibūdina skirtumų tarp „empirinių“ ir „teorinių“ reiškinų kvadratų sumos minimumo sąlygos patenkinimas:

$$\sum_{j=1}^M |p_j - f_j| \times g_j; \quad (5)$$

čia  $p_j$  – empirinė tankio funkcija,  $f_j$  – Veibulo tankio funkcijos reikšmė,  $g_j$  – svorio funkcija. Parametras  $a$  patikslinamas panaudojus eksperimentinį vidutinį vėjo greitį.

Tarus, kad tikimybių pasiskirstymas dėl  $V_{h_1}$  ir  $V_{h_2}$  priklauso tam pačiam Veibulo pasiskirstymo tipui, gaunama, kad parametrai atitinkamai aukščiauose virš

Radus Veibulo pasiskirstymo parametrus  $a$  ir  $K$ , galima rasti pagrindinius dydžius, apibūdinančius atsitiktinį dydį – vėjo greitį įvairiame aukštyje nuo žemės paviršiaus. Šiuo atveju naudojamos formulės: energija

$$E = (\rho/2) a^3 \Gamma(1+3/K) \quad (W/m^2); \quad (8)$$

čia  $\Gamma$  – Eulerio gama funkcija,

dispersija

$$D = a^2 [\Gamma(1+2/K) - \Gamma^2(1+1/K)], \quad (9)$$

moda

$$V_{\max} = a \left( \frac{K-1}{K} \right)^{1/K}, \quad (10)$$

vidutinis greitis

$$\bar{V} = a \Gamma(1+1/K). \quad (11)$$

Naudojantis šia metodika, buvo suskaičiuoti vėjo energijos išteklių [5], taip pat Veibulo parametrai pagrindiniams Lietuvos regionams 10 m ir 50 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Vėjo išteklių skaičiuoti panaudojus 1977–1986 m. meteorologijos sto-

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

Meteorologijos stotis	Vidutinis greitis V m/s			Energija E W/m <sup>2</sup>			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	2,40	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	4,50	49,7	95,0	156	2,02	2,20	2,35	3,32	4,22	5,07
Telšiai	2,90	3,71	4,47	42,2	82,5	138	2,33	2,54	2,72	3,28	4,18	5,02
Tauragė	2,67	3,44	4,16	35,3	69,8	117	2,15	2,34	2,51	3,02	3,88	4,68
Varėna	2,50	3,23	3,93	28,6	57,5	97,9	2,18	2,38	2,55	2,83	3,65	4,43

žemės paviršiaus  $h_1$  ir  $h_2$ :  $(a_{h_1}, K_{h_1})$  ir  $(a_{h_2}, K_{h_2})$  ryšys yra toks:

$$a_2 = \alpha a_1^\beta, K_2 = K_1/\beta \quad (6)$$

ir

$$\alpha = (h_2/h_1)^{\beta_0}, \quad \beta = 1+B_1 \ln(h_2/h_1); \quad (7)$$

čia  $h_1$  ir  $h_2$  – aukščiai virš žemės paviršiaus ir  $B_0 = 0,37$ ;  $B_1 = -0,088$  (nustatyti, remiantis matavimo duomenimis).

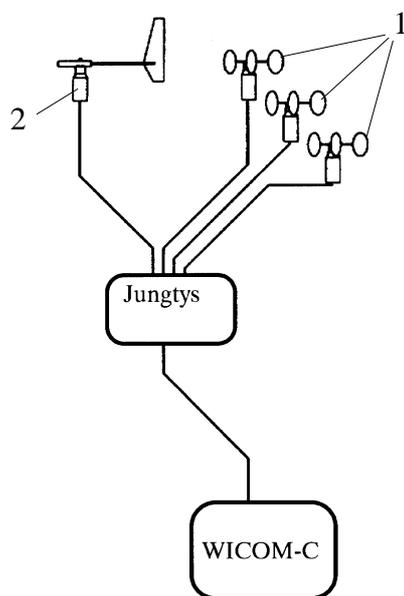
čių matavimus. Duomenys rodo, kad didžiausi vėjo energijos išteklių (1 lentelė) yra pajūryje.

### 3. VĖJO STEBĖJIMO POSTAI

Vienas vėjo parametrų matavimo postas buvo įrengtas Baltijos jūros pakrantėje (Giruliuose), kur vėjo greičiai dideli, o kitas – Vidurio Lietuvoje, kur vėjo greičiai gerokai mažesni.

Aparatūra WICOM-C pastatyta 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

matuojamas 10, 30 ir 50 m aukščiuose nuo žemės paviršiaus, o vėjo kryptis matuojama 30 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Vėjo parametrai buvo matuojami kas 10 s, integruojami per 10 min. ir užrašomi į matavimo kompiuterio atmintį. Aparatūros principinė sujungimo schema parodyta 2 pav. Pagrindiniai techniniai aparatūros duomenys:



2 pav. Vėjo parametrų matavimo aparatūros WICOM-C jungimo schema, kurioje 1 – vėjo greičio davikliai 10, 30, 50 m aukštyje nuo žemės paviršiaus, 2 – vėjo krypties daviklis 30 m aukštyje

Iš per mėnesį sukauptų vėjo matavimo duomenų apskaičiuotos pagrindinės statistinės vėjo charakteristikos, kurios apima vidutinį vėjo greitį per mėnesį, maksimalų greitį, vėjo reikšmių pasirodymo dažnį dvidešimtyje vėjo klasių (0–1 m/s, 1–2 m/s, ..., 19– $V_{\max}$  m/s) ir kt.

Kitas vėjo parametrų matavimo postas įrengtas Kaune, 76 m virš jūros lygio. Čia pastatyta JAV firmoje „NRG Systems“ pagaminta aparatūra „NRG logger 9200“. Ji matuoja vėjo greitį ir kryptį 19 m aukštyje virš žemės paviršiaus. Pagrindiniai techniniai aparatūros duomenys:

*Vėjo greitis*

matavimų dažnis 1–60 s;  
matavimų diapazonas 0,3–50 m/s;  
jautrumas 0,05 m/s;

*Vėjo kryptis*

matavimų dažnis 1–60 s;  
matavimų diapazonas 1–360° m/s;  
jautrumas 1°;

Aparatūros darbo temperatūrų diapazonas nuo –35°C iki +80°C.

Taikant tiesinės regresijos metodą, galima nustatyti daugiamečių vėjo greičio matavimų meteorologijos stotyje ir pasirinktoje aikštelėje ryšį [5]. Todėl turi būti atsižvelgta į dvi sąlygas:

1. Tarpusavio koreliacijos koeficientas tarp matavimų, atliktų meteorologijos stotyje ir pasirinktoje aikštelėje, turi būti artimas 1.

2. Vėjo kryptis abiejose matavimų vietose turi apytikriai sutapti.

Jeigu papildomi matavimai rodo gerą koreliaciją tarp matavimų abiejose vietovėse, tai galima ekstrapoliuoti daugiamečius vėjo greičio matavimo rezultatus, gautus meteorologijos stotyje pasirinktai aikštelei pagal formulę:

$$V_s = \mu_s + \frac{v\sigma_s}{\sigma_R} (V_R - \mu_R); \quad (12)$$

čia  $V_s$  – ekstrapoliuotas vėjo greitis pasirinktai aikštelei,  $V_R$  – daugiamečiai vėjo greičio matavimo rezultatai, gauti meteorologijos stotyje,  $\mu$  – išmatuotas vėjo greitis,  $\sigma$  – standartinis nuokrypis,  $\gamma$  – koreliacijos koeficientas,  $s$  – aikštelėje,  $R$  – meteorologijos stotyje.

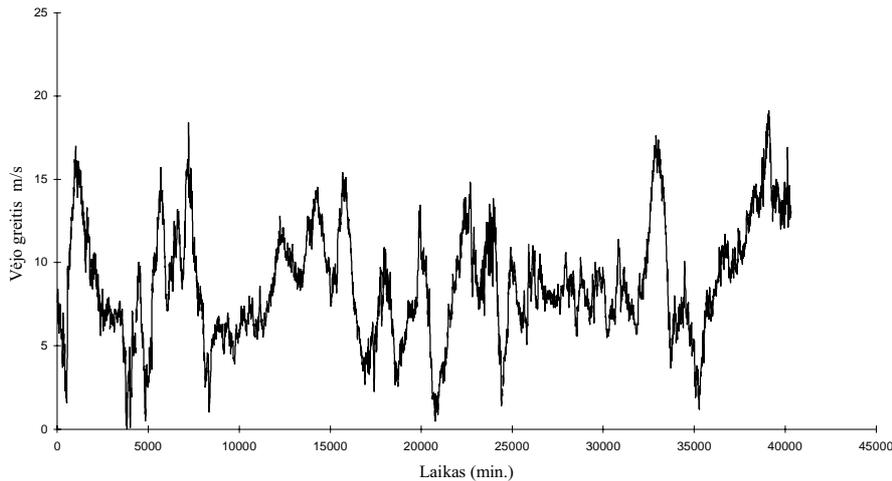
Pageidautina, kad papildomi matavimai būtų atliekami tame pačiame aukštyje, kuriame buvo atliekami daugiamečiai stebėjimai. Pagal matavimus, atliktus vėjo matavimo postuose, galima gana tiksliai įvertinti [5], ar vieta tinkama vėjo jėgainėms statyti, apskaičiuoti numatomą gauti elektros energijos kiekį, siekiant racionalaus pagamintos energijos panaudojimo, sudaryti jos darbo grafiką.

#### 4. VĖJO ENERGIJOS MATAVIMO DUOMENYS

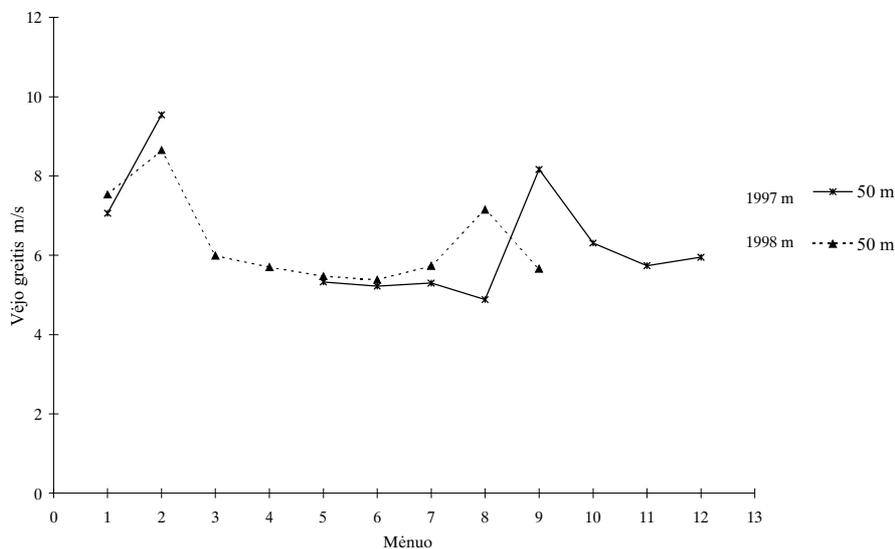
Vėjo greičio matavimo duomenys pavaizduoti 3 pav. Pažymėtina, kad kitimas laike yra chaotiškas.

Atlikti vėjo energijos parametrų matavimai pajūrio rajone (Giruliuose) rodo, kad čia vėjo greičiai yra pakankamai dideli (4 pav.). Vidutinis metinis vėjo greitis 1997–1998 m. buvo 6,6 m/s 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus. Vyraujanti vėjo kryptis (5 pav.) – vakarų. Matyti, kad didžiausi vėjo greičiai vyrauja žiemą, o mažiausi – vasarą. 1997 m. didžiausias vėjo greitis buvo vasarį, o mažiausias – rugpjūtį. Gauti duomenys rodo, kad esant didžiausiam vėjo greičiui (6 pav.), vyrauja vakarų krypties vėjai, o esant mažiausiam vėjo greičiui (7 pav.) – rytų krypties vėjai, t. y. vyraujanti vėjo kryptis iš žemyno pusės. Taigi norint labiausiai panaudoti vėjo energiją, tikslinga vėjo jėgaines statyti kuo arčiau jūros kranto, o esant galimybei ir pačioje jūroje. Tokiu atveju reljefo poveikis vėjo greičiui būtų mažiausias.

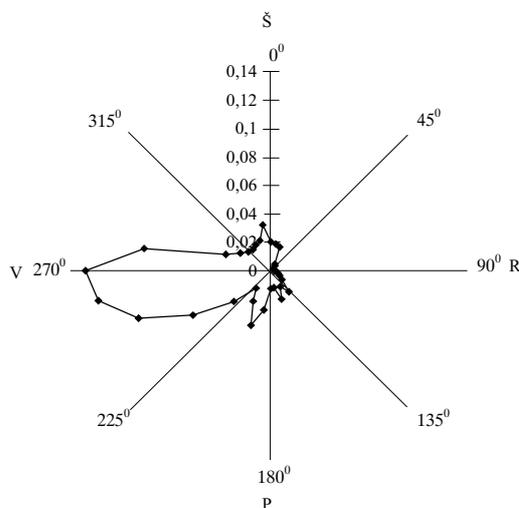
Lietuvos pajūrio zonoje vėjo greičio kitimas per parą išsidėsto gana tolygiai. Tai rodo vėjo greičio profilis (7 pav.), kuris sudarytas, atliekant daug matavimų per valandą tuo pačiu laiku visomis vieno



3 pav. Vėjo greičio matavimo duomenys 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus Klaipėdos regione (1998 m. vasario mėn.)



4 pav. Vidutinių vėjo greičių kitimas Klaipėdos regione (Giruliuose) 1997 ir 1998 m.



5 pav. Vėjo krypčių pasiskirstymas Klaipėdos regione (Giruliai) per mėnesį (1998 m. vasario mėn.)

mėnesio dienomis. Pvz., 6 pav. pirma figūra rodo vidutinį mėnesio vėjo greitį nuo 0 iki 1 val. Kiekvieną valandą vidutinė kvadratinė vėjo greičio reikšmė įvertinama standartiniu nuokrypiu.

Standartinis nuokrypis skaičiuojamas taip:

$$\sigma = \left( \frac{\sum_{i=1}^k (\bar{V} - v_i)^2}{(k-1)} \right)^{0,5}; \quad (13)$$

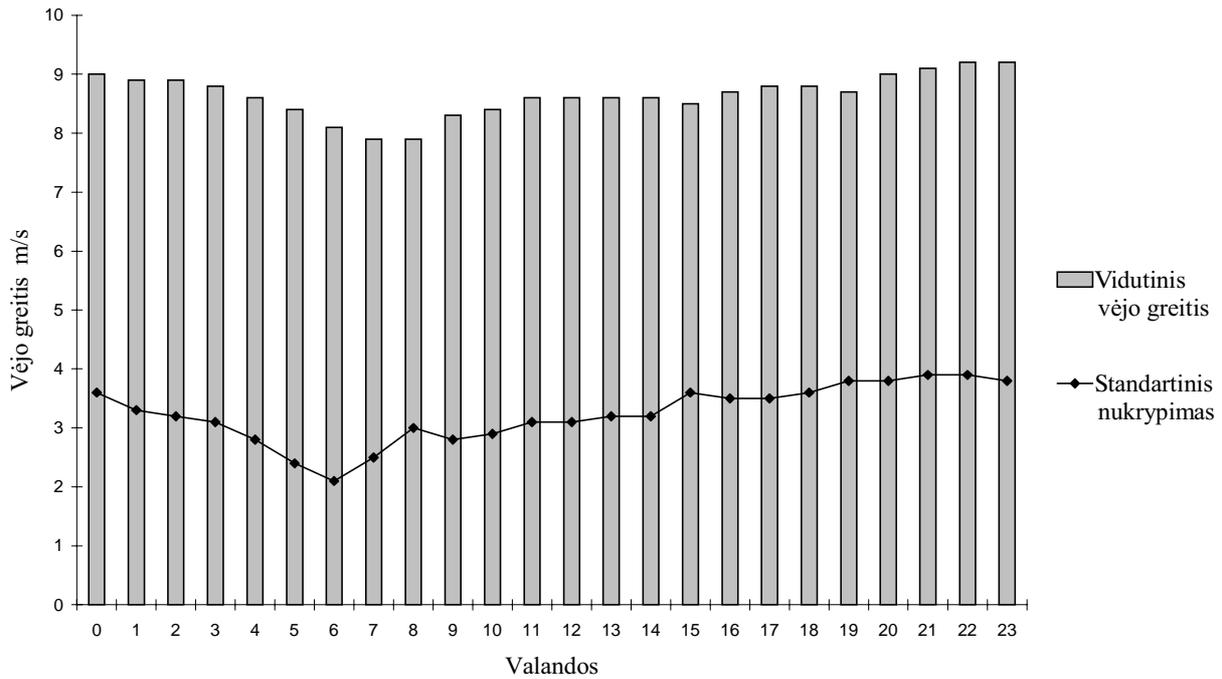
čia  $\bar{V} = \sum_{i=1}^k v_i / k$  – vidutinis

vėjo greitis;  $v_i$  – momentinė vėjo greičio reikšmė;  $k$  – matavimų skaičius vieno intervalo laikotarpyje.

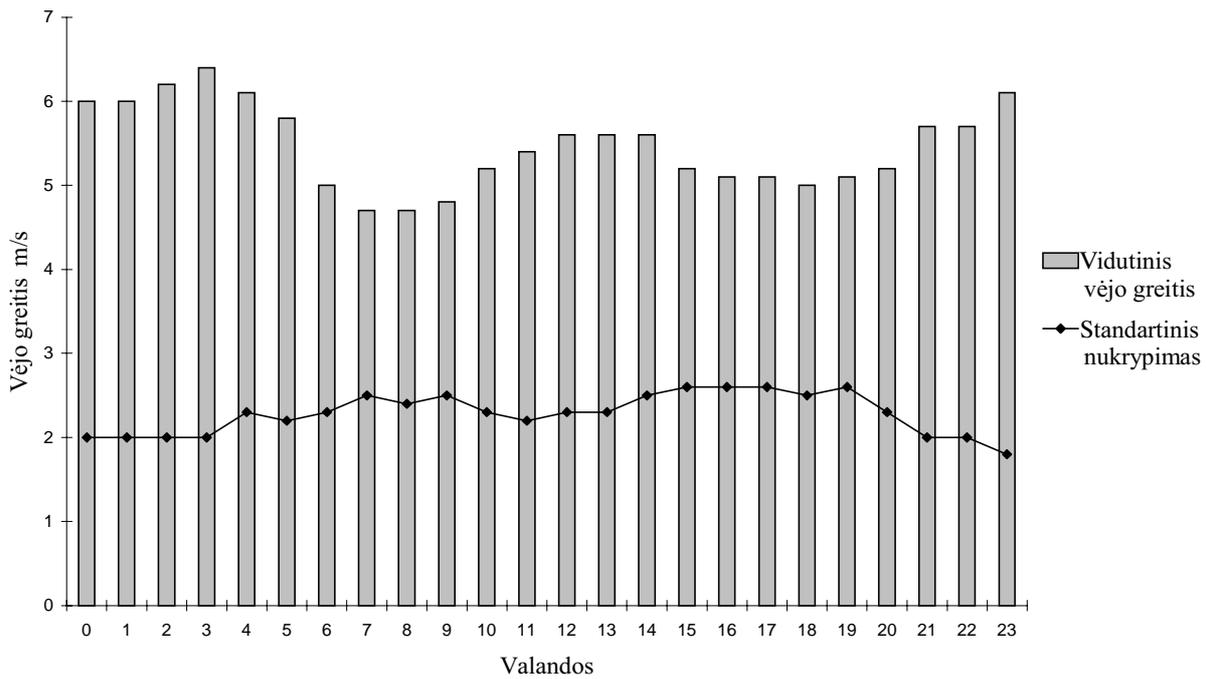
Esant didžiausiems (6 pav.) ir mažiausiems (7 pav.) vidutiniams mėnesio vėjų greičiams, jų pasiskirstymo profiliai labai skiriasi. Esant didžiausiems vėjo greičiams per parą, matyti mažai kintantis vėjo greičių profilis. Vėjo greitis, esant 9,54 m/s vidutiniam mėnesio greičiui, kinta ne daugiau kaip  $\pm 0,5$  m/s. Tuo tarpu esant mažiausiam vidutiniam vėjo greičiui (4,89 m/s), tas kitimas yra apie  $\pm 1$  m/s.

Matavimai (6 pav.) rodo, kad žiemą didžiausi vėjo greičiai, jų pasiskirstymo profilis gana tolygus per parą, todėl vėjo energijos panaudojimas pastatams šildyti būtų labai efektyvus. Vasarą, esant mažesniems vėjo greičiams, vėjo energiją būtų tikslinga panaudoti ūkio reikalams – vandeniui pakelti į vandenvietes, tvenkinių aeracijai bei žemės ūkio darbams.

Vidurio Lietuvoje (Kauno rajonas) gauti duomenys rodo, kad čia vėjo greičiai nedideli. Liepos mėn. vidutinis greitis tesiekia 2,4 m/s 19 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Vidutinis metinis vėjo greitis šiame aukštyje yra 4 m/s. Vyraujanti vėjo kryptis (9 pav.) – šiaurės–vakarų. Taigi Vidurio Lietuvoje galima statyti tik nedideles vėjo jėgaines, kurios galėtų praversti tiekiant vandenį ganykloms, nedidelėms gyvenvietėms, atliekant tvenkinių aeraciją žuvininkystės ūkiuose, taip pat galėtų būti taikomos žemės ūkyje.



6 pav. Vėjo greičio profilio kitimas per parą 50 m aukštyje nuo žemės paviršiaus Klaipėdos regione (Giruliai, 1998 m. vasario mėn.)



7 pav. Vėjo greičio profilio kitimas per parą 50 m aukštyje nuo žemės paviršiaus Klaipėdos regione (Giruliai, 1998 m. gegužės mėn.)

## 5. IŠVADOS

1. Matavimo stotys Lietuvos pajūryje, įrengtos panaudojus WICOM-C ir „NRG Systems“ firmų aparatūrą, leidžia fiksuoti ilgalaikius vėjo energetinių parametrų matavimus įvairiuose aukščiuose ir įvairiais matavimo dažniais.

2. Matavimo duomenų matematinio apdorojimo rezultatai rodo, kad pasirinktas vėjo greičio stebėjimo duomenų aproksimavimo metodas, pasitelkus Veibulo pasiskirstymo funkcijas, korektiškas įvairiems Lietuvos regionams, tinka vėjo jėgainių projektavimo (bei statybos aikštelių) įvertinimo darbams.

3. Iš suskaičiuotų skirtinguose Lietuvos regionuose energetinių parametrų matyti, kad pajūrio regione vėjo greičiai pasiskirstę pagal dydį kur kas tolygiau nei Vidurio arba Rytų Lietuvoje, o šis regionas tinkamiausias vėjo energetikai.

Gauta  
2001 06 22

#### Literatūra

1. Sesto E. Execute Committee Chairman's Editorial // Wind Energy Newsletter. Intern. Energy Agency. 1995. No. 8. P. 1–12.
2. Wind Energy The Facts/European Wind Energy Association (EWEA). Belgium: European Community. 1999. 23 p.
3. Katinas V., Tumosa A. Vėjo energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje. Vilnius, 1995. 38 p.
4. 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.
5. Palutikof J. P., Bass J. H., Halliday J. A. et al. Estimation of the wind resource at proposed wind turbine sites: The problems of spatial and temporal variability // Wind Engineering. 1990. Vol. 14, No. 1. P. 1–8.
6. Fortus M. I. Methods of statistical description of wind regions annexing to wind energy. Preprint No. 6. Moscow, 1990. 72 p. (in Russian).
7. Katinas V., Tumosa A. Wind energy potential in Lithuania / Solar World Congress. Budapest 1993 // Harmony with Nature. 1993. P. 464–465.
8. The potential of wind energy in Sor-Trondelag, Norway / European community wind energy conference in Germany. March, 1993. P. 87–90.
9. Jarmokas R., Katinas V. The possible usage of wind energy in Lithuania. Proc. of International Conference "Wind Energy in Baltic". Riga, 1996. P. 25–28.
10. Behnke R., Kampet T., Moder M., Usievich V. Market Analysis for the Implementation of Wind Energy Technologies along the Eastern Baltic Coast. Berlin, 1993. 24 p.
11. Sagrillo M. How estimate your average wind speed // Windletter. 1996. Vol. 23, No. 1. P. 4.

**Vladislovas Katinas, Antanas Markevičius**

#### **WIND ENERGY RESOURCES AND ERECTION OF OBSERVATION STATIONS IN LITHUANIA**

##### **S u m m a r y**

The power parameters of the wind have been measured by modern instrumentation according to the world-wide standards of wind turbine designers. Data on wind energy have been interpreted by international standard techniques. Prediction relation for the wind energy is presented. Equations to calculate wind resources in different sites are given. The results can facilitate the choice of wind turbines and prediction of their power generation rates.

**Key words:** wind energy, resources, observation stations

#### **Владисловас Катинас, Антанас Маркявичюс РЕСУРСЫ ЭНЕРГИИ ВЕТРА И СОЗДАНИЕ СТАНЦИЙ НАБЛЮДЕНИЯ В ЛИТВЕ**

##### **Р е з ю м е**

В работе использована современная измерительная аппаратура для установления энергетических ресурсов ветра в Литве.

Для расчета параметров ветра использована математическая модель, которая соответствует международным стандартам и позволяет установить энергетические ресурсы ветра в разных районах Литвы, а также в разных высотах от поверхности земли.

Полученные результаты могут быть использованы для подбора площадок ветряных турбин, а также для расчета максимальных мощностей.

**Ключевые слова:** энергия ветра, ресурсы, станции наблюдения