
Vėjo energijos išteklių ir jėgainių techninių ekonominių rodiklių įvertinimas projektavimo stadijoje

**Gytis Petrauskas,
V. Adomavičius**

*Elektros ir šviesos inžinerijos katedra,
Kauno technologijos universitetas,
Studentų g. 48–329, LT-3031 Kaunas*

Straipsnyje nagrinėjamos pagrindinės vėjo elektros jėgainės tipo parinkimo vietai su apibrėžtais vėjo greičio tikimybiniais parametrais problemos, aprašyti du svarbiausi vietovės vėjo energijos išteklių įvertinimo metodai, vėjo elektros jėgainės galios priklausomybės nuo vėjo greičio įvertinimas, skaičiuojant jėgainės pagaminamos elektros energijos kiekį, aspektai ir dažniausiai projektavimui naudojama vėjo elektros jėgainių programinė įranga.

Raktažodžiai: vėjo elektros jėgainė, vėjo energija, Veibulio skirstinys, vėjo parametų atlasas, galios kreivė, WindPRO

1. IŽANGA

Po didžiojo naftos kainos šuolio XX a. aštuntojo dešimtmečio pradžioje ir išryškėjus technogeninės ekologinės krizės padariniams, labiau susidomėta iškasamojo kuro nereikalaujančiais, todėl ekologiškai švariais energijos konversijos būdais, tarp jų ir vėjo elektros jėgainėmis (VEJ). Pirmosios vėjo energiją elektros energetikoje plačiau naudoti ėmėsi JAV, Vokietija, Danija ir kai kurios kitos Vakarų Europos valstybės paskutiniajame XX a. dešimtmetyje.

Šiuolaikinius vėjo energijos panaudojimo mastus pasaulio valstybėse rodo kai kurie čia pateikiami duomenys apie įvairiose šalyse įrengtą VEJ galią ir vėjo energetikos plėtojimo perspektyvas. Šiuo metu jau paskelbti kai kurių šalių 1999 m. duomenys ir prognozės vėjo energetikos srityje [1]. Vien per 1999 m. Vokietijoje buvo įrengta VEJ, kurių suminė galia lygi 1568 MW (naujas vienerių metų pasaulio rekordas). 2000 m. pradžioje viršyta riba, kuri pagal Vokietijos VEJ statybos scenarijų 1997–2007 m. laikotarpiui buvo numatyta tų metų pabaigai (įrengta 4442 MW vietoje 4210). Pagal tą scenarijų 2004 m. numatyta bendra įrengta veikiančių VEJ galia 8340 MW, o 2007 m. – 12071 MW. Danija tik jūroje planuoja įrengti bendros 5000 MW galios VEJ. Iš AEŠ ši šalis 2030 m. tikisi pasigaminti 36% jai reikalingos elektros energijos. Jungtinė Karalystė iš AEŠ 2010 m. tikisi gaminti 10% elektros energijos. Ispanija iki 2002 m. planuoja pastatyti VEJ, kurių suminė įrengta galia bus 1400 MW. Sparčiai plėtojama ne tik pramoninė vėjo energetika, kurioje naudoja-

mos šimtų ir tūkstančių kilovatų galios jėgainės, bet ir buitinė, skirta sodybos ar individualaus namo poreikiams tenkinti, kur dažniausiai naudojamos iki keilių kilovatų galios VEJ.

2. VĖJO ENERGIJOS IŠTEKLIŲ ĮVERTINIMAS

Projektuojant vėjo elektros jėgaines ypač svarbu apskaičiuoti (prognozuoti) jų pagaminamos energijos kiekį. Tai leistų atlikti perspektyvinį vėjo elektros jėgainės ekonominį įvertinimą, t. y. suskaičiuoti jos gaminamos energijos savikainą, jėgainės atsipirkimo laiką ir t. t. Pagrindinis veiksnys, lemiantis pagaminamos energijos kiekį, yra vietovės, kurioje statoma jėgainė, vėjo energijos ištekliai. Oro srauto, praeinančio pro plotą A (pvz., pro vėjo jėgainės vėjaračio šluojamą plotą), esant vėjo greičiui V ir oro tankiui ρ , galia gali būti apskaičiuojama pagal žinomą formulę:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho V^3 A.$$

Kaip matyti, oro srauto galia yra proporcinga vėjo greičio kubui. Analogiškai apskaičiuojama ir vėjo energija per laikotarpį t :

$$E = \frac{1}{2} \rho A V^3 t.$$

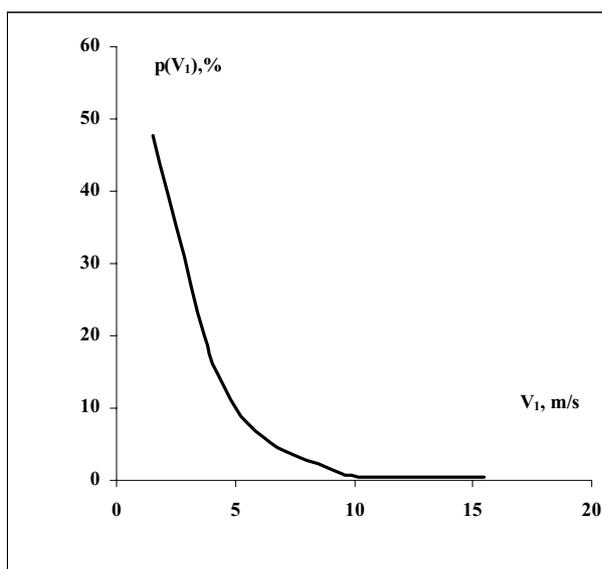
Taigi norint prognozuoti vėjo jėgainės pagaminamos energijos kiekį per tam tikrą laikotarpį, prieš tai reikia kuo tiksliau įvertinti vėjo greitį per tą patį laikotarpį.

Šiuo metu dažniausiai naudojami du vietovės vėjo energijos išteklių įvertinimo būdai.

Vienas paprasčiausių ir tiksliausių vėjo energijos išteklių nustatymo būdų yra jų apskaičiavimas pagal vėjo parametrų matavimo duomenis. Taikant šį metodą, vietovėje, kurioje numatyta statyti vėjo elektros jėgainę, vėjaračio ašies aukštyje atliekami matavimai specialia įranga, kurią dažniausiai sudaro anemometras, indukcinė vėjo krypties matuoklė ir matavimo rezultatų registravimo įrenginys. Visas vėjo greičio spektras (tradiciskai tariama, kad vėjo greitis gali kisti nuo 0 iki 25 m/s) suskaidomas į intervalus. Naudojant paplitusią matavimo aparatūrą WICOM-C arba „NRG Systems“, imami 1 m/s vėjo greičio intervalai. Matavimo aparatūra vėjo greitį gali matuoti kas 1–60 s. Gauti duomenys integruojami ir kas 10 min užrašomi į kompiuterio atmintį. Apdorojus gautus matavimo rezultatus, sudaroma tam tikros vietovės kiekvieno vėjo greičio intervalo pasirodymo tikimybės diagrama (1 pav.) [3].

Pagrindinis šio metodo privalumas – tai paprastumas. Tačiau jis turi ir esminį trūkumą – prieš atliekant skaičiavimus, reikia atlikti ilgalaikius vėjo greičio stebėjimus toje vietovėje. Taip pat šis metodas netaikytinas skaičiuojant grupinių vėjo jėgainių, sudarytų iš kelių ar keliolikos VEJ, prognozuojamus pagaminamos energijos kiekius, nes jame neįvertinama jėgainių įtaka viena kitai.

Antras vietovės vėjo energijos išteklių įvertinimo metodas yra pagal vėjo greičio tikimybės tankio funkcijos parametrus [3]. Iš vėjo greičių matavimo ir jų pasirodymo tikimybės skaičiavimo rezultatų matyti, kad vėjo greičio tankio funkcijos asimetrija yra teigiama, t. y. $\alpha > 0$, ir kad ši funkcija turi ryškų maksimumą tam tikrame vėjo greičio intervale. Šias



1 pav. Vėjo greičio pasirodymo Molėtų rajono Alantos gyvenvietėje tikimybės diagrama

sąlygas geriausiai tenkina Veibulio skirstinys. Veibulio skirstinio tankio funkcija:

$$p(V) = \frac{k_w}{V} \left(\frac{V}{C_w} \right)^{k_w-1} e^{-\left(\frac{V}{C_w} \right)^{k_w}};$$

čia $p(V)$ – vėjo greičio V pasirodymo tikimybė, k_w – Veibulio skirstinio formos parametras, C_w – Veibulio skirstinio skalės parametras.

Vakarų Europos regionų vėjo greičio Veibulio skirstinio parametrai yra pateikti Europos vėjo parametrų atlase (WasP), į kurį nuo 2001 m. numatyta įtraukti ir Lietuvos teritoriją. Taigi, turint vietovės vėjo greičio skirstinio parametrus, galima suskaičiuoti vėjo greičio pasirodymo tikimybę kiekvienam intervalui. Naudojant kompiuterinę techniką, intervalus galima gerokai susiaurinti, šitaip padidinant pagaminamos elektros energijos skaičiavimo tikslumą.

VEJ stiebo aukštis priklauso nuo jos galios, todėl aukštis nuo žemės paviršiaus, kuriam yra pateikti Veibulio skirstinio parametrai, ir numatomos statyti VEJ vėjaračio aukštis gali nesutapti. Todėl atliekamas vėjo greičio tikimybės tankio funkcijos parametrų perskaičiavimas reikiamam aukščiui. Jei iš Veibulio skirstinio žinome, kad su tam tikra tikimybe p_i aukštyje h_1 pasirodo vėjo greitis V_{i1} , tai aukštyje h_2 su ta pačia tikimybe p_i pasirodys vėjo greitis V_{i2} , kurį galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$V_{i2} = V_{i1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\beta.$$

Koeficientas β priklauso nuo žemės paviršiaus šiurkštumo arba nulinio lygio (aukščio nuo žemės paviršiaus, kuriame teorinis vėjo greitis lygus nuliui). Jis gali būti surandamas iš 1 lentelės.

Turėdami pagal aukštį perskaičiuotą vėjo greičio tikimybės priklausomybę, galime atlikti tolimesnius pagaminamos energijos kiekio skaičiavimus kaip ir pirmajame metode:

$$E_{iš} = \sum_i p_i \cdot P_{iši} \cdot n_h.$$

Pagrindinis vietovės vėjo energijos išteklių įvertinimo pagal vėjo greičio tikimybės tankio funkcijos parametrus metodo privalumas yra tai, kad projektuojant jėgainę nereikia atlikinėti išankstinių ir ilgalaikių vėjo greičio matavimų, o užtenka tik pasinaudoti Europos vėjo parametrų atlaso duomenimis. Tačiau šis metodas turi ir keletą trūkumų. Pagrindinis iš jų yra tai, kad perskaičiuojant vėjo greitį pagal aukštį, įvertinamas tik bendrasis žemės paviršiaus šiurkštumas, bet jis nevertinamas pagal vėjo kryptį. Tuo tarpu žemės paviršiaus šiurkštumas tam tikra kryptimi gali būti ypač mažas (vandens telkinys) arba labai didelis (pastatai) ir kaip tik ta kryptimi,

1 lentelė

Paviršiaus tipas	Paviršiaus šiurkštumo klasė	Paviršiaus nulinis lygis	β
Vandens paviršius.	0	0,0002	0,01
Visiškai atvira vietovė su lygiu paviršiumi, pvz., keliai, aerodromai, ganyklos ir t. t.	0,5	0,0024	0,077
Atvira, retomis kalvomis apsupta žemės ūkio vietovė be tvorų ir medžių su retai pasitaikančiais pastatais.	1	0,03	0,12
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais, užimanti maždaug 0,125 km ² plotą.	1,5	0,055	0,145
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais, užimanti maždaug 0,25 km ² plotą.	2	0,1	0,16
Tarp laukų įsiterpusi kaimo vietovė su namais ir sodais, užimanti maždaug 1 km ² plotą.	2,5	0,2	0,2
Kaimo gyvenvietė, nedideli miesteliai, sodai ir miškai.	3	0,4	0,28
Dideli miestai su aukštais pastatais.	3,5	0,8	0,375
Labai dideli miestai su aukštais pastatais ir dangoraižiais.	4	1,6	0,46

kuria vėjo pasirodymo tikimybė yra didžiausia. Tai gali turėti reikšmingos įtakos skaičiavimo rezultatų tikslumui.

3. VEJ TECHNINIŲ EKONOMINIŲ RODIKLIŲ ĮVERTINIMAS

Greta vietovės vėjo energijos išteklių, skaičiuojant per tam tikrą laikotarpį jėgainės pagaminamos elektros energijos kiekį, būtina įvertinti ir numatomo naudoti jėgainės tipo techninius rodiklius. Šiam tikslui reikalingiausia VEJ galios kreivė (jėgainės išėjimo galios priklausomybė nuo vėjo greičio). Galios kreivė yra gamintojo nustatoma eksperimentiškai kiekvienam VEJ tipui ir pateikiama kartu su pagrindiniais jėgainės parametrais bei charakteristikomis. Padauginus kiekvieno vėjo greičio intervalo pasirodymo tikimybę p_i iš jėgainės išėjimo galios tame greičio intervale $P_{i\bar{v}}$ (kW) ir iš valandų skaičiaus per

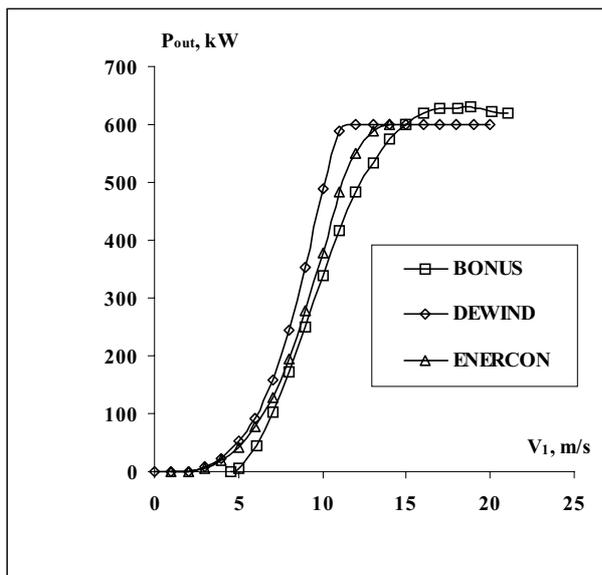
metus n_h , gaunamas tam greičio intervalui tenkantis pagamintos energijos kiekis (kWh per metus). Sudėję visiems vėjo greičio spektro intervalams suskaičiuotus energijos kiekius, gauname bendrąjį tikimybinių jėgainės pagamintos energijos kiekį konkrečioje vietovėje:

$$E_{i\bar{v}} = \sum_i p_i \cdot P_{i\bar{v}} \cdot n_h$$

Pavyzdžiui, 2 lentelėje palyginimui pateikti pagaminamo elektros energijos kiekio skaičiavimo pagal išmatuotus vėjo parametrus rezultatai, kurių būtų galima tikėtis gauti Molėtų rajono Alantos gyvenvietėje [2] pastačius Danijos kompanijoje BONUS bei Vokietijos kompanijose DEWIND ir ENERCON pagamintas vienodos 600 kW nominaliosios galios vėjo elektros jėgainės. Šių jėgainių galios kreivės pateiktos 2 paveiksle. Pagal galios kreivę matyti, kad vyraujant mažiems vėjo greičiams, didesnę vėjaračio

2 lentelė

Vėjo greičio intervalas m/s	Pasirodymo tikimybė %	Jėgainės BONUS išėjimo galia kW	Metinis BONUS pagamintos energijos kiekis kWh	Jėgainės DEWIND išėjimo galia kWh	Metinis DEWIND pagamintos energijos kiekis kWh	Jėgainės ENERCON išėjimo galia kWh	Metinis ENERCON pagamintos energijos kiekis kWh
0–3	47,8	0	0	0	0	0	0
3–4	17,25	0	0	13	19,800	11	16,700
4–5	13,42	0	0	35	40,600	30	34,800
5–6	8,84	20	15,300	70	53,500	59	45,000
6–7	5,25	70	31,700	124	56,200	102	46,300
7–8	3,35	138	39,900	200	57,900	160	46,300
8–9	2,3	210	41,700	300	59,600	210	41,700
9–10	1	293	25,300	425	36,70	330	28,500
10–11	0,4	380	13,100	550	19,000	438	15,100
11–20	0,39	630	21,200	600	20,200	600	20,200
Suma	100 %	188,400	364,000	295,000



2 pav. Trijų tipų 600 kW VEJ galios kreivės

skersmenį (48 m) turinti DEWIND jėgainė pagamins didesnę energijos kiekį. Kadangi Molėtų rajono Alantos gyvenvietėje vidutinis metinis vėjo greitis šių jėgainių stiebo aukštyje tik 4,3 m/s, didžiausiu per metus pagaminamos energijos kiekiu nagrinėjamu atveju pasižymi kaip tik ši jėgainė (364000 kWh per metus). Vėjaratis yra vienas brangiausių jėgainės elementų, todėl BONUS jėgainė, turinti mažesnę vėjaratį (41 m), yra pigesnė. Ekonominiu požiūriu BONUS jėgainė gali būti tinkamesnis variantas, nors jos per metus pagaminamas energijos kiekis yra daug mažesnis (188000 kWh). Norint parinkti optimalų konkrečiai vietai vėjo elektros jėgainę, reikia spręsti optimizavimo pagal ekonominius parametrus uždavinį, panaudojant specialią programinę įrangą. Vėjo energetikoje dažnai pasitaiko atveju, kai mažesnę vidutinį naudingumo koeficientą turinti jėgainė vietai su tam tikrais vėjo greičio parametrais ekonominiu požiūriu yra tinkamesnė už didesnę naudingumo koeficientą turinčią jėgainę. Toks atvejis yra vadinamas vėjo jėgainių efektyvumo paradoksu.

4. PRAKTINIAI SKAIČIAVIMAI

Kauno technologijos universiteto Atsinaujinančiųjų šaltinių energijos technologijų centro laboratorijoje yra atliekamas šiais dviem vėjo energijos išteklių įvertinimo metodais pagrįstas kompiuterizuotas laboratorinis darbas. Studentai, ruošdamiesi laboratoriniam darbui namuose, apskaičiuoja jėgainės pagaminamos elektros energijos kiekį pirmuoju metodu, t. y. pagal vėjo greičio matavimų rezultatus. Atlikdami šį kompiuterizuotą darbą laboratorijoje, jie, naudodami specialią tam laboratoriniam darbui skirtą programinę įrangą, apskaičiuoja tos pačios jėgainės pagamina-

mos elektros energijos kiekį antruoju metodu, t. y. pagal vietovės vėjo greičio tikimybės tankio funkcijos (Veibulio skirstinys) parametrus. Darbo pabaigoje palyginami abiem metodais gauti rezultatai.

Profesionaliems vėjo jėgainių projektavimo darbams dažnai naudojama Danijos kompanijos ENERGI- OG MILJUDATA (EMD) sukurta programinė įranga „WindPRO“. Naudojant šią programinę įrangą, galima pakankamai tiksliai apskaičiuoti projektuojamųjų vėjo elektros jėgainių pagaminamos energijos kiekius ir šitaip konkrečiai vietai parinkti optimalų jėgainės tipą.

„WindPRO“ sudaro 13 modulių. Vienas iš jų – „ATLAS Energy Calculation“ skirtas VEJ pagaminamai energijai skaičiuoti. Kad būtų galima šiuos skaičiavimus atlikti, turi būti įvesti tokie duomenys:

- vietovės topografinis žemėlapis (20 km spinduliu aplink vėjo elektros jėgainę);
- vietovės vėjo greičio pasiskirstymo (pagal Veibulio skirstinį) parametrai kiekvienam krypties segmentui (naudojami 12 krypties segmentų);
- kiekvienam segmentui atskirai įvedama tiksli informacija apie jame esančius objektus (pastatai, medžiai, kalvos ir t. t.) ir žemės paviršių;
- tikslios naudojamos(ų) vėjo jėgainės(ių) statybos vietos(ų) koordinatės (turbinų parametrus ir charakteristikas „WindPRO“ automatiškai nuskaito iš elektronine forma pateikto vėjo jėgainių katalogo).

Naudojant pateiktą elektroninį Europos vėjo parametrų atlasą (WasP), „WindPRO“ automatiškai nuskaito duomenis apie vietovės vėjo greičio pasiskirstymą.

Vėjo jėgainės pagaminamos energijos skaičiavimo, pasitelkus „WindPRO“ programinę įrangą, metodus, palyginti su anksčiau išvardytais metodais, turi keletą privalumų. Vienas privalumų yra tikslumas, nes:

- vėjo greičio ir žemės paviršiaus parametrai tiksliai įvertinami pagal koordinates ir pagal kryptį,
- įvertinama kiekvienos grupinėje vėjo jėgainėje naudojamos VEJ įtaka kitoms šalia esančioms jėgainėms.

Kitas privalumas – tai paprastumas, nes programa automatiškai nuskaito didžiąją dalį skaičiavimams reikalingos informacijos. Be išvardytų privalumų, šis metodas turi ir vieną esminį trūkumą – reikalinga brangiai kainuojanti programinė įranga. Visų 13 „WindPRO“ modulių kaina 12950 EURO, o Europos vėjo parametrų atlasas WasP 7,0 kainuoja 2420 EURO.

Kauno technologijos universiteto Elektrotechnikos ir automatikos fakultetui mokymo tikslams ENERGI- OG MILJUDATA (EMD) padovanojo profesionalią „WindPRO“ versiją. Šios programinės įrangos pagrindu yra rengiamas kursinis darbas studentams.

5. IŠVADOS

1. VEJ pagaminamos energijos skaičiavimas, remiantis vietovės vėjo greičio matavimų rezultatais, pasižymi tikslumu ir paprastumu. Tačiau turi ir esminį trūkumą – prieš atliekant tokius skaičiavimus, vietovėje, kuriai projektuojama jėgainė, numatomoje(se) vietoje(se) reikia atlikti ilgalaikius vėjo greičio matavimus.

2. Pagrindinis VEJ pagaminamos energijos skaičiavimo pagal vėjo greičio tikimybės pasiskirstymo tankio funkcijos (Veibulio skirstinys) parametrus metodo privalumas yra tai, kad nereikia atlikinėti išankstinių vėjo greičio matavimų. Tačiau šis metodas turi ir trūkumų. Vienas jų – perskaičiuojant vėjo greitį pagal aukštį, įvertinamas tik bendrasis žemės paviršiaus šiurkštumas. Tai gali turėti reikšmingos įtakos skaičiavimo rezultatų tikslumui.

3. Tikslūs VEJ pagaminamos energijos skaičiavimus, neturint išankstinių vėjo greičio stebėjimo duomenų, galima atlikti tik įvertinus tikimybinį vėjo greičio pasiskirstymą kiekviename krypties segmente bei kiekvieno vietovėje esančio objekto įtaką oro srauto energijos parametrui. Šiems skaičiavimams atlikti tikslinga pasitelkti specialiąją programinę įrangą.

4. Vietovei su konkrečia vėjo greičio tikimybės pasiskirstymo funkcija jėgainės tipo parinkimas priklauso nuo VEJ techninių charakteristikų, iš kurių svarbiausia yra jos išvystomos galios priklausomybė nuo vėjo greičio, ir ekonominių parametrų (jėgainės kaina, statybos ir montavimo darbų kaina, eksploatacijos išlaidos ir kt.). Optimalus jėgainės tipas konkrečiai vietai su apibrėžtais vėjo greičio tikimybiniais parametrais parenkamas, atlikus ekonominį variantų palyginimą

Gauta
2001 03 15

Literatūra

1. Wagner A. Set for 21st century: Germany's New Renewable Energy Law //Renewable Energy World, March–April, 2000. P. 73–83.

2. Tiriamojo darbo ataskaita „Vėjo matavimo bandymų įvertinimas su vėjo jėgainės pelno paskaičiavimu“. RWE Energie Aktiengesellschaft Bereich Anwendungstechnik. 1998.
3. Wind energy technology / John F. Walker, Nicholas Jenkins. Published: Chichester: Wiley, c1997. Pages: XIV, 161 s. Series: (UNESCO energy engineering series).
4. Katinas V., Tumosa A. Vėjo energijos potencialo įvertinimas Lietuvoje // Energetika, 1995. Nr. 4.

Gytis Petrauskas, V. Adomavičius

EVALUATION OF WIND ENERGY RESOURCES, WIND TURBINE TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS AT THE STAGE OF DESIGN

S u m m a r y

The paper deals with evaluation of wind energy resources by means of measuring wind energy parameters in the locality and by the data of wind energy atlas. Selection of a suitable type of wind turbine for a locality with definite wind parameters also depends on the technical and economic parameters of the wind turbine. The optimum decision could be made by economic comparison of the possible versions.

Key words: wind turbine, power curve, Weibal distribution, WindPRO, WasP

Гитис Петраускас, В. Адомавичюс

УЧЕТ РЕСУРСОВ ЭНЕРГИИ ВЕТРА, ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРЯНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Р е з ю м е

В статье описаны два способа учета ресурсов энергии ветра местности – по данным мониторинга и по атласу параметров энергии ветра. Выбор типа ветряной электростанции (ВЭС) и количество вырабатываемой ею электроэнергии зависят также от ее технических параметров, прежде всего от мощности ВЭС, обусловленной скоростью ветра. Оптимально решить задачу выбора типа ВЭС можно путем экономического сравнения вариантов применения возможных их типов.

Ключевые слова: энергия ветра, турбина