

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGOJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Andrius Stuknys

MAŽOS GALIOS VĖJO ELEKTRINĖS TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas

doc. dr. T. Šimkevičius

ŠIAULIAI, 2011

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGOJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU:

Katedros vedėjas,

lekt. dr. G. Valiulis _____
(parašas)

MAŽOS GALIOS VĖJO ELEKTRINĖS TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas

_____ doc. dr. T. Šimkevičius
(parašas)
2011.05.31

Atliko

_____ EM-9 gr. stud.
(parašas) A. Stuknys
2011.05.31

Recenzentas

_____ lekt. dr. G. Valiulis
(parašas)

ŠIAULIAI, 2011

Santrauka

Mažosios vėjo elektrinės yra vertingas atsinaujinančios energijos šaltiniai, kurie gali būti pastatyti šalia naudojimo vietos. Šis tyrimas buvo atliktas analizuojant mažųjų vėjo elektrinių charakteristikas skirtingose vietovėse. Mažųjų vėjo elektrinių vertinimas ir charakteristikų analizavimas pakankamai problemiškas mažų vėjo greičių vietovėse. Šios vėjo elektrinių vertinimo problemos susijusios su mažų vėjo greičių poveikiu rotoriaus efektyvumui ir elektros energijos gamybai. Šio tyrimo metu buvo analizuojami surinkti duomenys apie 1-kW, 3-kW ir 5-kW vėjo elektrines. Vėjo greitis buvo modeliuojamas naudojant Weibull'o skirstinį, žinant pasirinktų vietovių skalės ir formos parametrus. Žinant parametrus ir vėjo elektrinių galių kreives buvo pasirinktas optimalus elektrinės tipas. Pagrindinis tyrimo tikslas - pasirinkti efektyviausią vėjo turbinos dizainą mažiems vėjo greičiams ir išanalizuoti jos veikimą pasirinktoje vietovėje.

Summary

Small wind turbines are valuable sources of renewable energy which can be built close to the point of use. This study has been done on small wind turbines analyzing their performances in different places. Methods of evaluation and testing performance of small wind turbines have brought some difficulties when applied to small wind velocity localities. These problems relate effect of small wind velocities on rotor performance and power generation for wind turbine evaluation. This research has analyzed the observed data of 1-kW, 3-kW and 5-kW small wind turbines. Wind speeds have been modeled using the Weibull distribution, knowing the scale and shape parameters for different locations. Knowing parameters and power curves of the wind turbines, the optimal wind turbine has been chosen. The main aim of this research was to choose the most efficient wind turbine design in low wind speeds and analyze its performance in chosen locality.

Turinys

I.	Pratarmė	10
II.	Įvadas	11
2.1.	Vėjo energijos ištekliai Lietuvoje.....	12
2.2.	Pavienio naudojimo sistema.....	14
2.3.	Mažosios vėjo elektrinės.....	16
2.4.	Vėjo elektrinių poveikis.....	17
2.4.1.	Triukšmas	18
2.4.2.	Mirgėjimas ir atspindžiai.....	20
2.4.3.	Elektromagnetinis spinduliavimas	20
2.4.4.	Poveikis paukščiams	21
2.4.5.	Vizualinis poveikis.....	21
2.4.6.	Reljefo formos suardymas.....	21
2.5.	Vėjo elektrinės galios charakteristikos	22
2.5.1.	Vėjo elektrinės konstrukcija	23
2.5.2.	Vėjo elektrinių rotorijų tipai	24
2.5.3.	Vėjo elektrinių galios koeficientas ir greitaeigiškumas	25
2.6.	Vėjo energijos ištekliai	28
2.6.1.	Vėjo kryptis ir greitis	29
2.6.2.	Vėjas ir turbulentiškumas.....	30
2.6.3.	Kliūčių poveikis vėjui	31
2.6.4.	Trinties jėga	32
2.6.5.	Vėjo paros eiga	33
III.	Tyrimo temų ir metodų pristatymo dalis	34
3.1.	Matavimo vietos parinkimas.....	34
3.1.1.	Urbanistinės vietovės parinkimas	35
3.2.	Vėjo energija	36
3.3.	Weibull'o skirstinio parametrai ir turbulentiškumas.....	37
3.4.	Paviršiaus šiurkštumo įvertinimas.....	40
3.5.	Vėjo elektrinių generuojamos galios skaičiavimas	41
3.6.	Vėjo elektrinių galios charakteristikų vertinimas.....	42
VI.	Tyrimo rezultatų aprašymo dalis.....	43
4.1.	Vietovių vėjo greičių išteklių įvertinimas.....	43
4.1.1.	Nidos vėjo greičių išteklių įvertinimas.....	44
4.1.2.	Kauno vėjo greičių išteklių įvertinimas	45

4.1.3.	Utenos vėjo greičių išteklių įvertinimas.....	46
4.1.4.	Telšių vėjo greičių išteklių įvertinimas	47
4.1.5.	Tauragės vėjo greičių išteklių įvertinimas.....	48
4.1.6.	Varėnos vėjo greičių išteklių įvertinimas	49
4.1.7.	Vėjo greičių išteklių palyginimas	50
4.2.	Šiaulių vėjo greičių išteklių įvertinimas	51
4.3.	Pirminis mažos galios vėjo elektrinių įvertinimas	59
4.3.1.	1 kW vėjo elektrinių įvertinimas	60
4.3.1.	3 kW vėjo elektrinių įvertinimas	62
4.3.1.	5 kW vėjo elektrinių įvertinimas	64
4.4.	Vėjo elektrinių tyrimo rezultatai	66
4.4.1.	1 kW vėjo elektrinių generuojamos galios palyginimas	73
4.4.2.	3 kW vėjo elektrinių generuojamos galios palyginimas	74
4.4.3.	5 kW vėjo elektrinių generuojamos galios palyginimas	75
4.5.	Skersinio srauto (Cross-flow) vėjo elektrinės turbina.....	76
4.5.1.	Skersinio srauto 3, 6 ir 12 menčių vėjo elektrinės rotorius tyrimas.....	77
4.5.2.	Skersinio srauto 3 menčių vėjo elektrinės turbino tyrimo rezultatai.....	78
4.5.3.	Skersinio srauto 6 menčių vėjo elektrinės turbino tyrimo rezultatai.....	79
4.5.4.	Skersinio srauto 12 menčių vėjo elektrinės turbino tyrimo rezultatai.....	80
4.5.5.	Skersinio srauto turbinų tyrimo rezultatai.....	81
4.6.	Skersinio srauto vėjo elektrinės pasirinkimas	82
4.6.1.	Skersinio srauto FTC vėjo elektrinių konstrukcija	83
4.6.2.	Skersinio srauto FTC vėjo elektrinių pradinis įvertinimas.....	84
4.6.3.	Skersinio srauto FTC vėjo elektrinių generuojamos galios įvertinimas	88
4.6.4.	Skersinio srauto vėjo elektrinių privalumai ir trūkumai.....	91
	Išvados.....	93
	Literatūra.....	94

Lentelių sąrašas

- 1 lentelė. Lietuvos regionų daugiamečių vėjo greitis (m/s) 10 ir 50 m aukštyje
- 2 lentelė. Leidžiami triukšmo lygiai
- 3 lentelė. Infragarso veikimo zonos ir poveikis
- 4 lentelė. Infragarso ir žemo dažnio garsų ribiniai dydžiai
- 5 lentelė. Vėjo elektrinių rotorijų parametrų palyginimas
- 6 lentelė. Vėjo turbinų palyginimas
- 7 lentelė. Beaufort'o skalė
- 8 lentelė. Paviršiaus šiurkštumo klasifikacija
- 9 lentelė. Pateikti skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymas valandomis
- 10 lentelė. Kauno miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis
- 11 lentelė. Utenos miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis
- 12 lentelė. Telšių miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis
- 13 lentelė. Tauragės miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis
- 14 lentelė. Varėnos miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis
- 15 lentelė. Pasirinktų vietovių skaičiavimo rezultatai
- 16 lentelė. Šiaulių miesto skaičiavimo rezultatai
- 17 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių parametrai
- 18 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių parametrai
- 19 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių parametrai
- 20 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių (1-20) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.
- 21 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių (21-40) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.
- 22 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių (1-20) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.
- 23 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių (21-40) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.
- 24 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių (1-20) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.
- 25 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių (21-40) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.
- 26 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių analizės rezultatai
- 27 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių analizės rezultatai
- 28 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių analizės rezultatai

29 lentelė. Pagrindiniai FTC vėjo elektrinių parametrai

30 lentelė. FTC elektrinių pagaminamos energijos kiekių (kWh/m) skaičiavimo rezultatai

31 lentelė. Vėjo elektrinių pagaminamos energijos kiekių (kWh/m) skaičiavimo rezultatai

32 lentelė. FTC ZWYNDTM vėjo elektrinių techniniai duomenys

33 lentelė. Šiaulių miesto metinis vėjo greičių pasiskirstymas valandomis (nustatytas naudojant apskaičiuotus Weibull'o parametrus)

34 lentelė. FTC vėjo elektrinių pagaminamos energijos kiekių (kWh/mėn.) skaičiavimo rezultatai

35 lentelė. 150 m² namo ploto mėnesiniai energetiniai poreikiai

Paveikslų sąrašas

- 1 pav. Lietuvos vėjo atlasas ^[6]
- 2 pav. Pavienio naudojimo schema
- 3 pav. Skirtingų galių vėjo elektrinių statymo aukščiai
- 4 pav. Idealizuota vėjo elektrinės galios kreivė
- 5 pav. Horizontalios ašies ir vertikalios ašies vėjo elektrinių pavyzdžiai
- 6 pav. Vėjo elektrinių rotorių tipai
- 7 pav. Vėjo elektrinių rotorių galios koeficientų priklausomybė nuo greitaėigiškumo
- 8 pav. „Helix Wind“, „H Type“, „Gorlov“, „Natura Levo“ ir „Mag-Wind“, aerodinaminės vertikalios ašies vėjo turbinos
- 9 pav. „Looping“, „Wind-ball“ ir „Loop-Wing“ aerodinaminės horizontalios ašies vėjo elektrinės
- 10 pav. Vilniaus vėjų rožė (pagal Vilniaus AMS 1965–1990 metų stebėjimų duomenis)
- 11 pav. Turbulencijos formavimasis
- 12 pav. Turbulentinio vėjo srauto zona, kai vėjo kliūtis – nedidelis pastatas
- 13 pav. Trinties sluoksnio priklausomybė nuo paklotinio paviršiaus pobūdžio
- 14 pav. Ekman spiralė
- 15 pav. Matavimo vietų parinkimas
- 16 pav. Šiaulių miesto meteorologinė stotis
- 17 pav. Vėjo greičio energijos priklausomybės skirtingiems rotorius plotams
- 18 pav. Vėjo greičio pasiskirstymo funkcijos skirtingiems parametrams
- 19 pav. Vėjo greičio pasiskirstymo funkcijos skirtingiems parametrams
- 20 pav. Vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
- 21 pav. Vėjo elektrinių galių kreivės ir vėjo greičių tikimybinis pasiskirstymas
- 22 pav. 1 kW vėjo elektrinių galių kreivės ir galių vertės skirtingiems vėjo greičiams
- 23 pav. Nidos vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
- 24 pav. Kauno vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
- 25 pav. Utenos vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
- 26 pav. Telšių vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
- 27 pav. Tauragės vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
- 28 pav. Varėnos vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija
- 29 pav. Sausio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 30 pav. Vasario mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 31 pav. Kovo mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 32 pav. Balandžio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija

- 33 pav. Gegužės mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 34 pav. Birželio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 35 pav. Liepos mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 36 pav. Rugsjūčio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 37 pav. Rugsėjo mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 38 pav. Spalio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 39 pav. Lapkričio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 40 pav. Gruodžio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 41 pav. Metinis vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija
- 42 pav. Sausio mėnesio penkių parų vėjo greičiai
- 43 pav. Sausio mėnesio penkių parų vėjo srauto turbulencijos lygis
- 44 pav. 1 kW vėjo elektrinių galių kreivės
- 45 pav. 3 kW vėjo elektrinių galių kreivės
- 46 pav. 5 kW vėjo elektrinių galios kreivės
- 47 pav. Mažų vėjo greičių zonų pasiskirstymo funkcija
- 48 pav. Dvylikos menčių skersinio srauto vėjo elektrinės turbina
- 49 pav. 3, 6, 12 menčių skersinio srauto vėjo elektrinių turbinos
- 50 pav. 3 menčių turbinos statinio slėgio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui
- 51 pav. 3 menčių turbinos oro greičio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui
- 52 pav. 3 menčių turbinos momento ir generuojamos galios priklausomybė nuo greitaeigiškumo
- 53 pav. 6 menčių turbinos statinio slėgio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui
- 54 pav. 6 menčių turbinos oro greičio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui
- 55 pav. 6 menčių turbinos momento ir generuojamos galios priklausomybė nuo greitaeigiškumo
- 56 pav. 12 menčių turbinos statinio slėgio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui
- 57 pav. 12 menčių turbinos oro greičio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui
- 58 pav. 12 menčių turbinos momento ir generuojamos galios priklausomybė nuo greitaeigiškumo
- 59 pav. Skersinio srauto vėjo elektrinės konstrukcinė schema
- 60 pav. Skersinio srauto FTC vėjo elektrinės konstrukcinė schema
- 61 pav. FTC vėjo elektrinių galių kreivės
- 62 pav. FTC vėjo elektrinių galių kreivės iki 10 m/s vėjo greičiui
- 63 pav. Pasirinktų vėjo elektrinių palyginimas pagal statymo aukščius

I. Pratarė

Didėjant elektros energijos poreikiui, labai svarbūs tampa atsinaujinantys energijos šaltiniai, kurie nesibaigia ir yra nemokami, o jų naudojimas prisideda prie klimato kaitos stabilizavimo ir yra viena iš darnios visuomenės plėtros priemonių. Šiame tiriamajame darbe bus nagrinėjama mažoji vėjo energetika, jos naudojimas, privalumai ir trūkumai. Pagrindinis tikslas – mažos galios vėjo elektrinės tyrimas pasirinktam šalies regionui.

Prieš pasirenkant vėjo elektrinę, privaloma atlikti vėjo greičio tyrimus. Atlikus vėjo krypties matavimus, tyrimų rezultatų analizę ir atsižvelgiant į gautus rezultatus bus parenkama ir analizuojama vėjo elektrinė.

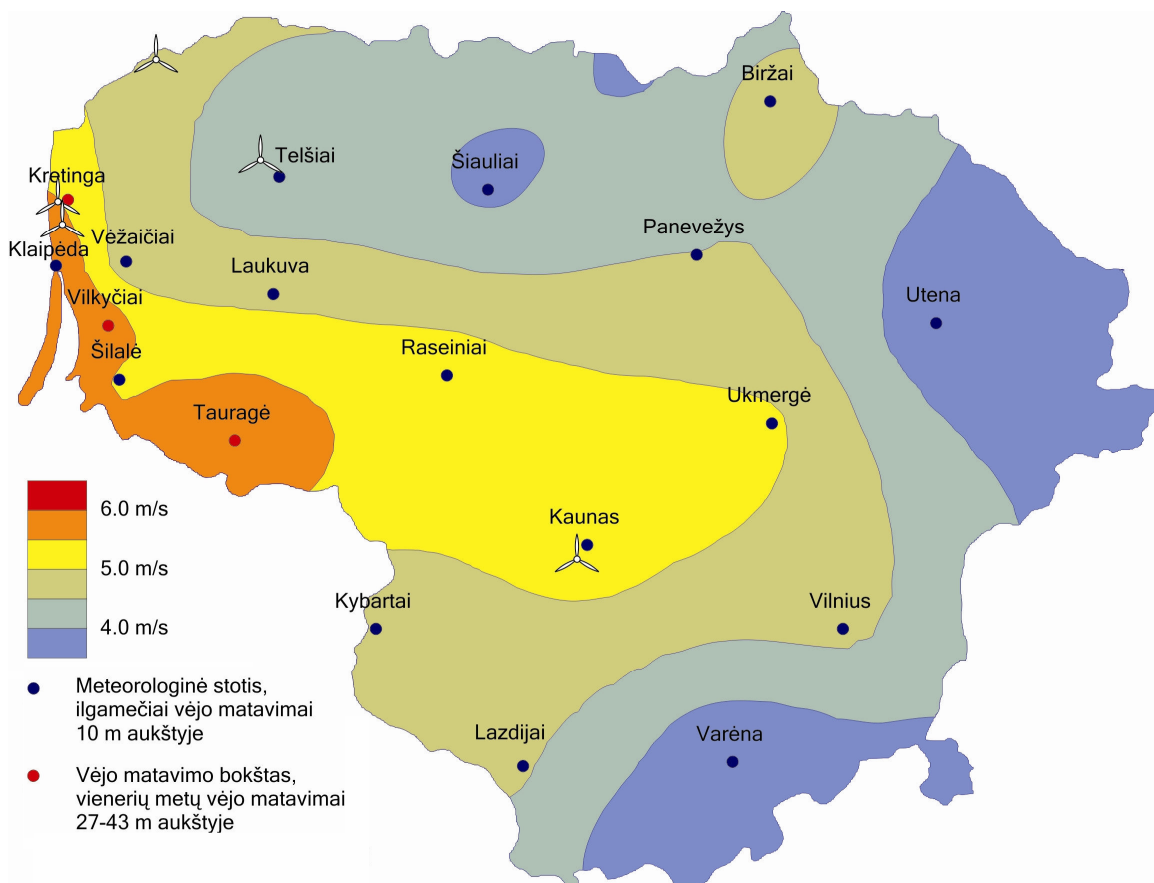
II. Įvadas

Tyrimo temos svarbą lemia poreikis ne tik didinti atsinaujinančių išteklių naudojimą, mažinti aplinkos tašą, bet ir naujų technologijų dėka apsirūpinti elektros energija nepriklausomai nuo instaliuotų elektros tinklų. Skaičiavimo metodikos leidžia tinkamai apskaičiuoti būtinąjį elektros energijos poreikį ir optimaliai paskirstyti gaminamą energiją taip, kad vartotojas būtų aprūpintas energija reikiamu momentu.

Mažųjų vėjo elektrinių galia siekia nuo 0,1 kW iki 50 kW, bet dėl vyraujančių mažų vėjo greičių apsimoka statyti tik nedidelės galios vėjo elektrines. Lietuvos sąlygomis tokios elektrinės atsiperka greičiau, kadangi jos dirba efektyviau esant mažiems vėjo greičiams. Efektyviausia tokias elektrines įrengti kartu su kitais atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Mažos galios vėjo elektrinės pagamina mažą dalį reikalingos elektros energijos, tačiau naujosios vėjo elektrinės yra žymiai efektyvesnės, bet labai brangios. Šio tipo elektrinių pasiūla rinkoje labai plati, tačiau jų kaina siekia iki dešimties tūkstančių litų už vieną kilovatą instaliuotos galios. Prieš statant vėjo elektrinę būtina įvertinti pagrindinius vėjo parametrus.

2.1. Vėjo energijos išteklių Lietuvoje

Pirminiai vėjo energijos išteklių Lietuvoje tyrimai, naudojant meteorologinių stočių duomenis, rodo, kad vėjo energijos panaudojimas galimas ir ekonomiškai pagrįstas. Vykdydama Jungtinių Tautų Baltijos šalių vėjo energetikos plėtros programą Danijos Riso vėjo energetikos tyrimų laboratorija parengė Lietuvos vėjo atlasą (1 pav.). Tyrimai parodė, kad vėjo energijos panaudojimas Lietuvoje yra galimas ir duoti naudą. Vidutinis vėjo greitis 10 m aukštyje Baltijos pajūrio zonoje yra nuo 5 iki 5,4 m/s, o Vidurio Lietuvoje – 3,5–4,0 m/s [4].



1 pav. Lietuvos vėjo atlasas ^[6]

Vėjo atlasuose pateikiami vidutiniai metiniai vėjo greičiai pagal matavimus, atliktus meteorologinėse stovyse, nebūtinai atitinka vidutinius vėjo greičius pasirinktoje vietovėje, todėl prieš pradėdant statyti vėjo elektrinę, būtina atlikti papildomus pasirinktos vietovės vėjo energijos parametrų matavimus, kurie leidžia tinkamai parinkti elektrinės tipą ir prognozuoti energijos gamybą. Mažosios vėjo elektrinės gerai veikia mažų vėjo greičių (2–6 m/s) zonose, todėl gali būti įrengiamos beveik visoje šalies teritorijoje. Pasaulyje gaminama įvairių konstrukcijų vėjo elektrinių, suprojektuotų mažesniems, vidutiniams ar didesniems vėjo greičiams. Šiuo metu Lietuvoje mažos galios vėjo energetika yra mažame lygmenyje - jos pagamina tik apie 3-4 % elektros energijos [12].

Atlase daugiamečiai vidutiniai vėjo greičiai užfiksuoti standartiniuose aukščiuose standartinio šiurkštumo (2-os klasės) paviršiuje. Atskiriems šalies regionams daugiamečiai vidutiniai vėjo greičiai 10 ir 50 m aukščiuose pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Lietuvos regionų daugiamečių vėjo greitis (m/s) 10 ir 50 m aukštyje

Regionas	Daugiametis vėjo greitis, m/s	
	10 m	50 m
Biržai	3,57	4,81
Telšiai	3,12	4,21
Šiauliai	2,87	3,87
Panevėžys	3,34	4,50
Klaipėda	4,55	6,14
Vėžaičiai	3,42	4,61
Laukuva	3,62	4,89
Utena	2,64	3,57
Raseiniai	3,96	5,34
Šilutė	3,84	5,18
Ukmergė	3,78	5,10
Kaunas	3,98	5,31
Kybartai	3,30	4,45
Vilnius	3,45	4,66
Varėna	2,52	3,40
Lazdijai	3,38	4,57

Vienas paprasčiausias būdų įvertinti vėjo sąlygas elektrinės statymo vietovėje yra daugiamečiai regionų vėjo vidutinių greičių tyrimai, tačiau į šią informaciją atsižvelgiama statant tik dideles vėjo elektrines, nes dėl nedidelio aukščio, turbulentiškumo ir inercijos – mažoms elektrinėms netinka. Tikslus būdas įvertinti vėjo greitį pasirinktoje vietovėje – pastatyti vėjo greičio matuoklį ir fiksuoti vidutinį vėjo greitį. Tiksliausiai būtų atlikti vienerių metų laikotarpio vėjuotumo tyrimus vėjo greičio matuokliu, registruojančiu vėjo greičio duomenis.

Labai svarbu įvertinti žemės paviršiaus šiurkštumą nuo kurio priklauso oro masių nešamos energijos kiekiai, vėjo elektrinės tipo parinkimas ir turbinos darbo efektyvumas, nes dėl didelio šiurkštumo vidutinis vėjo greitis 10 - 50 % mažesnis nei atviroje vietovėje.

Dėl gamtinių ir urbanistinių kliūčių būdingi lokalūs vėjo greičio sustiprėjimai (tunelio efektas, konvergencija pastatų kraštuose), vėjo kryptis nuo makrosrauto gali skirtis 180°.

Vietos parinkimas vėjo elektrinės statybai yra labai svarbus, nuo kurio priklauso elektrinės darbo ekonomiškumas, todėl būtina papildomai ištyrinėti vietovės vėjo greičio profilius ir vėjo parametrų kaitą.

2.2. Pavienio naudojimo sistema

Pavienio naudojimo vėjo elektrinė dirba nepriklausomai nuo išorinio elektros tinklo, taip pat gali dirbti ir su kitais elektros generatoriais. Tokios mažos autonominės sistemos, dažniausiai naudojamos akumuliatorines baterijas krauti. Esant Lietuvos vidutiniam vėjo greičiui 3–4,5 m/s tikslinga statyti tik nedidelės galios vėjo elektrines. Tokios sistemos labiau pasiteisina nutolusiose nuo elektros tinklų vietovėse. Jos gaminamos kelių tipų: vietovėms su didesniais vidutiniais metiniais vėjo greičiais, kitos – su mažesniais.

Siekiant padidinti elektros energijos tiekimo patikimumą naudojamos hibridinės saulės – vėjo elektrinės, kai į sistemą papildomai įjungiamos foto elektrinės panelės (2 pav.). Saulės energija pasižymi dideliu sezoniškumu, santykis tarp per mėnesį pagaminamo maksimalaus energijos kiekio vasarą ir minimalaus žiemą mūsų kraštui yra apie 10 – 20 kartų. Santykis tarp vėjo elektrinės per mėnesį pagaminamo maksimalaus energijos kiekio žiemą ir minimalaus vasarą mūsų šaliai yra apie 3 – 4 kartai. Lyginant su saulės elektrine vėjo elektrinės žymiai geriau tenkina energijos poreikį: kai energijos reikia daugiau, daugiau jos ir pagaminama, tačiau metinis energijos gamybos grafikas ne visada atitinka energijos poreikių grafiką. Energijos poreikiai metų bėgyje pakankamai svyruoja, todėl autonominė vėjo elektrinė elektros energijos poreikių gerai netenkina.

Galimi keli pavienio naudojimo sistemos jungimo scenarijai, priklausomai nuo gaminamos elektros energijos kiekio:

1. Vėjo elektrinės pagaminama elektros energija naudojama akumuliatorių krovimui. Tokia autonominė sistema pilnai aprūpina elektros energija, kai nėra kito elektros energijos šaltinio. Šiuo atveju didelę reikšmę turi akumuliatorių rūšis ir kokybė. Tokie akumuliatoriai geriau atiduoda sukauptą energiją ir žymiai ilgiau tarnauja, tačiau yra gerokai brangesni nei paprasti akumuliatoriai. Tokią pajungimo schemą riboja mažo vėjingumo zonos ir didelis apkrovimas.

Veikimo principas:

Vėjo elektrinė paverčia vėjo kinetinę energiją į nuolatinę elektros srovę. Srovės keitiklis paverčia nuolatinę elektros srovę į kintamą elektros srovę. Valdiklis kontroliuoja vėjo elektrinės pagamintą elektros energiją, papildomos energijos šaltinio (foto elektrinė) pagamintą elektros energiją ir akumuliatorių įkrovimą. Akumuliatoriai teikia elektros energiją tada, kai vėjo elektrinė ir saulės kolektoriai pagamina per mažai elektros energijos.

2. Vėjo elektrinės pagaminama elektros energija tiesiogiai pajungiama į namo elektros tinklą kaip papildoma elektros energija jau esančiam prisijungimui prie elektros tinklų. Šiuo atveju nereikalaujama didelė akumuliatorių talpa. Pajungimo schema tinkama mažo vėjingumo zonose.

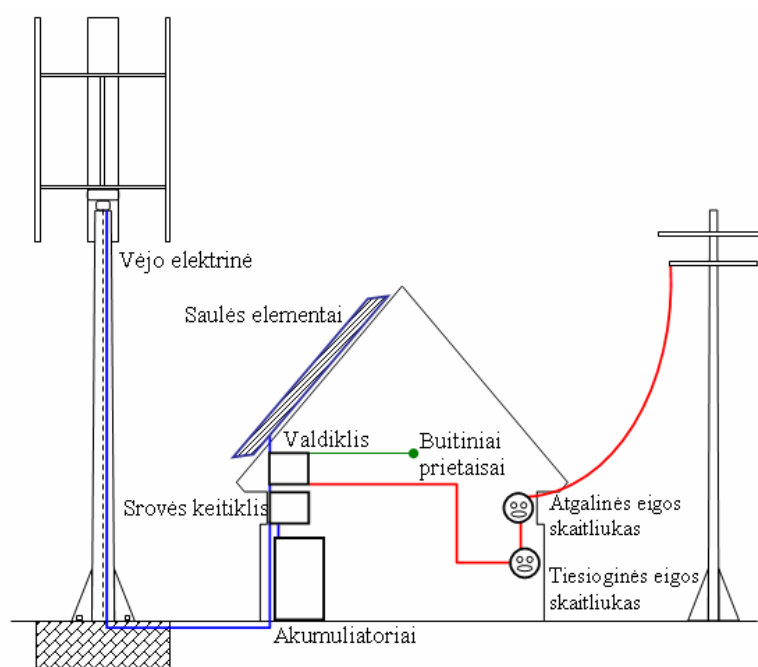
Veikimo principas:

Vėjo elektrinė paverčia vėjo kinetinę jėgą į nuolatinę elektros srovę. Srovės keitiklis paverčia nuolatinę elektros srovę į kintamą elektros srovę. Valdiklis kontroliuoja: vėjo elektrinės pagamintą elektros energiją, buities prietaisų sunaudotą elektros energiją, akumuliatorių įkrovimą, sunaudotą elektros energiją iš elektros tinklų ir pateiktą elektros tinklams nepanaudotą vėjo elektrinės elektros energiją. Tiesioginės eigos skaitliukas skaičiuoja sunaudotą elektros energiją iš elektros tinklų tik tada, kai vėjo elektrinė pagamina neužtektinai elektros energijos. Atgalinės eigos skaitliukas skaičiuoja elektros energiją pateiktą elektros tinklams. Taip pat šioje pajungimo schemoje gali būti naudojamas ir papildomas energijos šaltinis (foto elektrinė).

3. Mažos galios vėjo elektrinės savininkai parduoda perteklinę energiją skirstomiesiems tinklams – tai supaprastina pajungimo schemą: nesuvartota elektros energija parduodama, o esant poreikiui perkama. Šiuo atveju nereikalaujama didelė akumuliatorių talpa.

Veikimo principas:

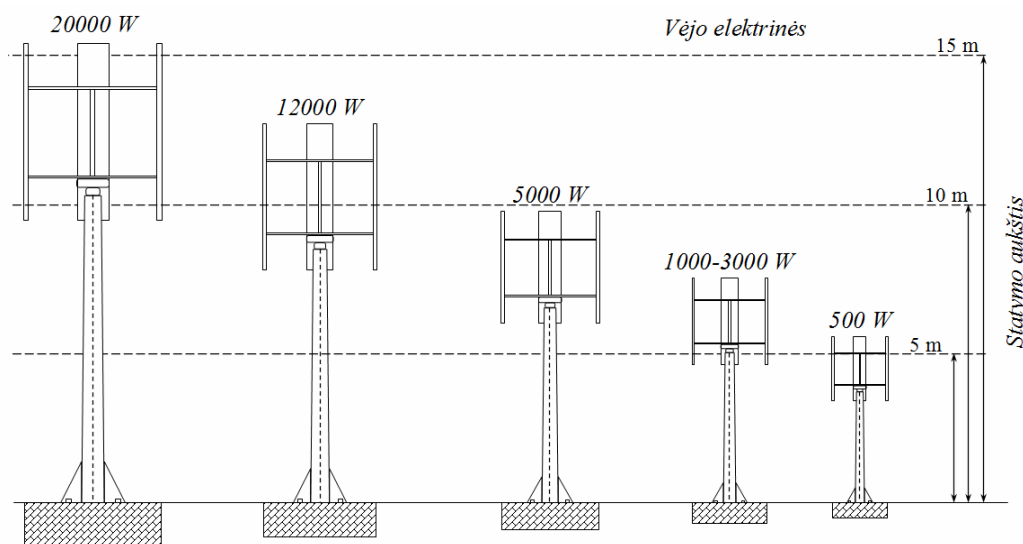
Vėjo elektrinė paverčia vėjo kinetinę jėgą į nuolatinę elektros srovę. Srovės keitiklis paverčia nuolatinę elektros srovę į kintamą elektros srovę. Valdiklis kontroliuoja: vėjo elektrinės pagamintą elektros energiją, buities prietaisų sunaudotą elektros energiją, sunaudotą elektros energiją iš elektros tinklų ir pateiktą elektros tinklams nepanaudotą vėjo elektrinės elektros energiją. Tiesioginės eigos skaitliukas skaičiuoja sunaudotą elektros energiją iš elektros tinklų tik tada kai vėjo elektrinė pagamina neužtektinai elektros energijos. Atgalinės eigos skaitliukas skaičiuoja elektros energiją pateiktą elektros tinklams.



2 pav. Pavienio naudojimo schema

2.3. Mažosios vėjo elektrinės

Mažosios vėjo elektrinės yra tokios vėjo elektrinės, kurių rotoriaus plotas neviršija 200 m². Šis plotas išreiškia elektrinės su ant bokšto įrengta gulsčiąją ašimi ir stačiojoje plokštumoje įtvirtintu, dažniausiai 3 mentis turinčiu rotoriumi. Su mažesniais kaip 2 m² rotoriais vėjo elektrinės į mažųjų vėjo elektrinių kategoriją nebeįeina. Kitas paplitęs pavadinimas yra miesto 5 – 30 kW galios vėjo elektrinės. Lietuvos vyriausybė ėmė skatinti mažųjų vėjo elektrinių statybą kaime. Norint statyti iki 250 kW galios pavienę vėjo elektrinę nebereikia detaliųjų žemės planų ir žemės paskirties pakeitimo procedūrų. Iki 10 m aukščio ir iki 10 kW galios elektrinės priskirtos nesudėtingų statinių I grupei, kuriai nereikia statybos leidimų ir kitokių statybinių procedūrų. Iki 15 m aukščio ir iki 30 kW galios vėjo elektrinės priskirtos nesudėtingų statinių II grupei, kuriai taikomi taip pat supaprastinti statybos reikalavimai. Dėl statymo aukščių ir vietos apribojimų vėjo elektrinės dažniausiai yra 1 kW, 3 kW ir 5 kW galios (3 pav.).



3 pav. Skirtingų galių vėjo elektrinių statymo aukščiai

Kai vėjo elektrinė neįjungiama prie elektros tinklų, tai elektros energijai nekeliama griežti reikalavimai, ypač jeigu ji naudojama šildymui, o žinant metines energijos sąnaudas, apskaičiuojamas reikalingas vėjo elektrinės galingumas. Į bendrą elektros tinklą jungiamos tik specialiai pritaikytos vėjo elektrinės. Šiuo atveju būtina laikytis vėjo elektrinių prijungimo prie Lietuvos energetikos sistemos taisyklių (Valstybės žinios, 2004, Nr. 57- 2007). Planuojant prijungti vėjo elektrinę prie esančio elektros perdavimo ar skirstomojo tinklo, reikalingas projektas su prijungimo schema bei planu, kuriame pateikiamas prijungimo linijų ilgis, elektrinės schema ir kiti reikalingi duomenys. Prie elektros tinklo jungiama vėjo elektrinė turi būti išbandyta ir turėti Europos Sąjungoje galiojantį atestavimo dokumentą – sertifikatą.

2.4. Vėjo elektrinių poveikis

Vėjo elektrinės įrengimo vietos parinkimas iki gyvenamosios vietos svarbus siekiant išvengti neigiamo poveikio arba jį sumažinti, nes gali įtakoti prastą aplinkinių gyventojų savijautą. Planavimo metu turi būti atliekamas galimo poveikio sveikatai vertinimas.

Vėjo elektrinės keliamas triukšmas gali būti aerodinaminio ir mechaninio pobūdžio, kurį sukelia rotorius, generatorius ir greičių dėžė. Didėjant vėjo greičiui triukšmas stiprėja tol, kol turbina pasiekia maksimalų konstrukcinį leidžiamą sukimosi greitį. Maksimalus sukimosi greitis reguliuojamas pakreipiant rotoriaus menčių kampą, o esant labai stipriam vėjo greičiui rotorius yra sustabdoma elektriškai ar mechaniškai, siekiant išvengti elektrinės pažeidimų.

Vėjo elektrinių gamintojai teigia, jog nėra neigiamo poveikio, tačiau poveikio sveikatai ekspertė iš JAV Dr.Nina Pierpont, apibūdina simptomus, atsirandančius dėl per mažo atstumo iki gyvenamųjų pastatų [13]:

- miego sutrikimai;
- galvos skausmai;
- tinitas (ūžesys ausyse);
- spaudimas į ausį;
- galvos svaigimas;
- šleikštulys;
- vėmimas;
- nemiga;
- nervingumas.

Elektrinės keliamas triukšmas dėl nepakankamo atstumo iki gyvenamojo pastato yra vienas svarbiausių faktorių, apibūdinančių įtaką žmogaus sveikatai ir labiausiai ribojančių vėjo elektrinės statybą. Triukšmo lygį nustato sanitarinės normos ir vietiniai įstatymai.

Vėjo elektrinių vizualinis poveikis aplinkai vertinamas pagal įtaką kraštovaizdžiui, įtaką faunai, pastatymo ploto naudojimą, trukdžius telekomunikacijos įrenginiams, tačiau vis didesnis dėmesys kreipiamas į mirgėjimą, kuris nėra reglamentuotas higienos normomis.

Besisukančios vėjo elektrinių dalys gali sukelti radijo transliacijos trikdžius. Rotorių mentės atspindi radijo bangas ir taip trukdo radijo ir televizijos bangų priėmimui.

Stebėjimai Vokietijoje, Olandijoje, Danijoje, Didžiojoje Britanijoje parodė, kad mažose ir vidutinio dydžio vėjo elektrinėse paukščiai žūsta labai retai. Tačiau ši problema gali būti aktuali, kai elektrinės pastatomos intensyvaus paukščių sezoninio migravimo kelyje ar jūros pakrantės zonoje.

2.4.1. Triukšmas

Lietuvos įstatymai nepakankamai išsamiai reglamentuoja vėjo elektrinių įrengimus, todėl taikomos bendros higienos normos.

Žmogus girdi garsus, kurių dažnis yra nuo 16 Hz iki 20 000 Hz. Triukšmas blogai veikia visą žmogaus organizmą, bet labiausiai - klausos analizatorių, centrinę nervų bei širdies kraujagyslių sistemas (Baltrėnas, 1981). Akustinis triukšmas - tai įvairaus stiprumo ir dažnio garso bangų visuma, galinti sukelti sveikatai nepalankius ir kenksmingus padarinius. Triukšmo matavimo vienetas yra decibelas, dBA. Triukšmo poveikis priklauso nuo garso stiprumo (dB), dažnio (Hz) ir veikimo trukmės. Raidė A parodo, kad garsas matuotas naudojant A dažninę charakteristiką. A korekcija – tai dažnių amplitudė, prilyginta ausies jautrumui.

Vėjo elektrinės yra įrenginiai ne tik keičiantys kraštovaizdį, bet ir jų sukeltas triukšmas gali veikti aplinkinius gyventojus. Leidžiamas triukšmo lygis yra toks triukšmas, kuris veikdamas trumpą arba ilgą laiką nesutrikdo sveikatos. Leidžiami akustinio triukšmo lygiai pagal Lietuvos higienos normą HN 33:2007 „Akustinis triukšmas. Triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose bei jų aplinkoje“ (Žin., 2007, Nr. 75-2990) pateikti antroje lentelėje.

2 lentelė. Leidžiami triukšmo lygiai

<i>Objekto pavadinimas</i>	<i>Garso lygis, dBA</i>	<i>Maksimalus garso lygis, dBA</i>	<i>Paros laikas, val.</i>
Gyvenamųjų pastatų miegamieji kambariai	45	55	6 – 18
	40	50	18 – 22
	35	45	22 – 6
Visuomeninės paskirties pastatų miegamieji kambariai ikimokyklinėse įstaigose ir internetinėse mokyklose, palatos ir operacinėse, kambariai sanatorijose	45	55	6 – 18
	40	50	18 – 22
	35	45	22 – 6
Gyvenamųjų namų ir visuomeninės paskirties pastatų aplinkoje	65	70	6 – 18
	60	65	18 – 22
	55	60	22 – 6

Taip pat vėjo elektrinės sukelia infragarso (nuo 1 Hz iki 20 Hz) ir žemo dažnio (nuo 20 Hz iki 200 Hz) garsus. Ausies jautrumas žemiems dažniams mažėja, todėl girdimas gali būti tik labai stiprus infragarsas. Savijautos sutrikimai gali atsirasti tik tada, kai žmonių buvimo vietose infragarsas viršija 120 dB lygį. Infragarso bangos veikia centrinę nervų ir virškinimo sistemą, sukelia galvos ir vidaus organų skausmus, trikdo kvėpavimo ritmą, gali pasireikšti svaigulys, vėmimas. Skiriamos keturios infragarso veikimo zonos pateiktos trečioje lentelėje.

3 lentelė. Infragarso veikimo zonos ir poveikis

<i>Infragarso veikimo zona</i>	<i>Infragarso stiprio lygis (dB)</i>	<i>Infragarso poveikis</i>
I (mirtinoji)	>185	Plyšta plaučių alveolės
II	140 - 172	Žmogus ištveria 2 min.
III	120 - 145	Ilgėja reakcijos laikas, žmogus sunkiai susikaupia
IV	< 120	Žmogus greičiau pavargsta, atsiranda jūros ligos požymių

Infragarso ir žemo dažnio garsų ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose (pagal Lietuvos higienos normą HN 30:2009, Žin., 2009, Nr.38-1466) pateikti ketvirtoje lentelėje.

4 lentelė. Infragarso ir žemo dažnio garsų ribiniai dydžiai

<i>Trečdalis oktavos dažnių juostos vidutinis dažnis, Hz</i>	<i>Infragarso ir žemo dažnio garso lygių ribiniai dydžiai, dB</i>
8	103
10	95
12,5	87
16	79
20	71
25	63
31,5	56
40	48
50	41
63	34
80	28
100	24
125	21
160	17
200	14

Nustatyta, kad kai kurie žemo dažnio garsai veikia neigiamai tam tikrus organus: 37 Hz dažnio garsas sukelia širdies, plaučių ir skrandžio sutrikimus, nuo 16 Hz dažnio sutrinka skrandžio veikla. Žemesni nei 16 Hz dažnio garsai sukelia nerimą, nuovargį, gali pakenkti regėjimui ir tapti rimtų sveikatos sutrikimų priežastimi. Ypač pavojingas 7 Hz dažnio infragarsas, kuris gali sutrikdyti širdies ar smegenų veiklą.

Prieš statant vėjo elektrinę būtina įvertinti turbinos keliamą triukšmo lygį įvairiuose vėjo greičiuose. Triukšmų matavimui naudojami preciziniai garso analizatoriai. Matuojant naudojamas A dažninės charakteristikos filtras, nes vėjo elektrinių keliami triukšmai yra nedidelio intensyvumo (< 80 dB), o šio filtro jautrio priklausomybė nuo dažnio mažo intensyvumo garsams yra didesnė nei C charakteristikos filtro. Esant ribotai vėjo elektrinės statymo vietai tiks tik mažo triukšmingumo vėjo turbinos.

2.4.2. Mirgėjimas ir atspindžiai

Galimi du vėjo elektrinių mirgėjimo tipai: šešėlių mirgėjimas ir šviesos atspindžiai. Šešėlių mirgėjimas atsiranda dėl vėjo elektrinės rotorius menčių sukimosi, o mirgėjimo intensyvumas priklauso nuo menčių sukimosi greičio. Šviesos atspindžiai atsiranda, kai rotorius mentės atspindi saulės spindulius.

Prieš statant vėjo elektrinę būtina atlikti galimą poveikio įvertinimą, kuriame nustatomas ne tik galimas rotorius triukšmingumas, bet ir mirgėjimas, vertinamas galimas neigiamas poveikis šalia gyvenančių žmonių gyvenamajai aplinkai, nustatoma apsaugos zona.

Norint sumažinti vėjo elektrinių mirgėjimą ir atspindžius, statymo vietovė parenkama taip, kad poveikis būtų kuo mažesnis arba montuojami mirgėjimo stabdymo mechanizmai. Vėjo elektrinių mirgėjimo mažinimo mechanizmo kompiuterinė programa veikia kartu su valdymo sistema. Šviesos jutikliai montuojami ant elektrinės stovo taip, kad būtų galima nustatyti saulės šviesos intensyvumą ir kritimo kampą. Kontrolės sistema sustabdo elektrinės darbą, kai jutiklių išmatuotos reikšmės viršija nurodytas reikšmes.

Kai saulės spinduliai krenta ant atspindinčio vėjo elektrinės paviršiaus galimi rotorius menčių atspindžiai, kurie išvengiami dengiant mentes neatspindinčiu paviršiumi. Atspindėtos šviesos kiekis priklauso nuo menčių paviršiaus ir šviesos kritimo kampo.

Atsižvelgiant į planuojamos statyti vėjo elektrinės technines charakteristikas, kurios sukimosi greitis pakankamai lėtas ir rotorius konstrukcija neleidžia prasiskverbti saulės spinduliams, šešėlių mirgėjimas nesukels problemų.

2.4.3. Elektromagnetinis spinduliavimas

Vėjo elektrinės, kaip ir kitos konstrukcijos, gali trikdyti elektromagnetinio ryšio signalus. Parinkus vėjo elektrinės statymo vietą, galima pašalinti radijo ir televizijos signalų potencialius trikdžius telekomunikacijų sistemose. Vėjo elektrinės turi būti sukonstruoti taip, kad tenkintų esminius elektromagnetinio suderinamumo reikalavimus:

- skleidžiami elektromagnetiniai trikdžiai neviršytų lygio, kuriam esant radijo ryšio ir telekomunikacijų galiniai įrenginiai ar kiti įrenginiai netrukdomai veiktų pagal paskirtį;
- atsparumas elektromagnetiniams trikdžiams, kurie gali atsirasti naudojant įrenginius pagal paskirtį, būtų pakankamas, kad jie netrukdomai veiktų pagal paskirtį be veikimo kokybės pablogėjimo.

Modernių vėjo elektrinių rotorius menčių gamybai naudojamos nemetalinės kompozicinės medžiagos, todėl įtaka elektromagnetinio ryšio trikdymui yra nežymi.

2.4.4. Poveikis paukščiams

Vėjo energetiką plėtojančių valstybių institucijos atlikto išsamius tyrimus, kaip vėjo elektrinės veikia paukščių gyvenimą. Svarbiausiu veiksmu laikytas paukščių susidūrimo su rotoriaus mentėmis dažnumas ir elektrinių įtaka paukščių ramybei ir maisto suradimui. Besisukančios rotoriaus mentės gali paveikti paukščius, išbaidydamos juos iš apgyventos vietos ar sužalodamos. Pagerinus vėjo elektrinių matomumą, sumažinus turbinos sukimosi greitį ir nesudarant sąlygų tupėjimui ir lizdų sukimui, sumažinamas pavojus migruojantiems paukščiams. Jungtinėje Karalystėje stebėjimo tyrimai parodė, kad vėjo elektrinių poveikiai nedideli, jei planavimo stadijoje buvo atsižvelgiama į lengvai pažeidžiamas paukščių apgyventas zonas. Elektrinių poveikis skirtingoms paukščių rūšims yra skirtingas, tačiau nedidelis. Ilgai buvo manoma, kad vėjo elektrinės turi poveikį perinčių paukščių gyvensenai, kadangi menčių sukeliama šešėliai gali būti palaikyti kaip plėšriųjų paukščių šešėliai. Tačiau išaiškėjo, kad vėjo elektrinės nedaro poveikio perinčių rūšių gyvensenai, nes jie išmoksta suprasti, kad sparnų šešėliai pavojaus nekelti. Nuodugniai išnagrinėjus galimą poveikį paukščiams nustatyta, kad 17-35 apsisukimų per minutę greičiu besisukančios vėjo elektrinės mentės nesukelia pavojaus praskrendantiems paukščiams [12].

2.4.5. Vizualinis poveikis

Vėjo elektrinės yra puikiai matomi objektai, todėl nepasitenkinimas dalinai priklauso nuo aplinkos, kur jos yra pastatytos. Šalyse, kur plėtojama mažoji vėjo energetika, yra įprasta atsižvelgti į vėjo elektrinių daromą vizualinį poveikį. Vizualinis poveikis priklauso nuo daugelio veiksnių: rotoriaus dydžio ir tipo, sukimosi greičio, spalvos, elektrinės išsidėstymo teritorijoje, aplinkos apšvietimo sąlygų, esamo regėjimo lauko ir kraštovaizdyje matomų elementų. Šiuos ir daugelį kitų veiksnių galima objektyviai įvertinti, tačiau kiekvieno jų įtaka skirsis, priklausomai nuo vietos, iš kurios bus stebima vėjo elektrinė.

2.4.6. Reljefo formos suardymas

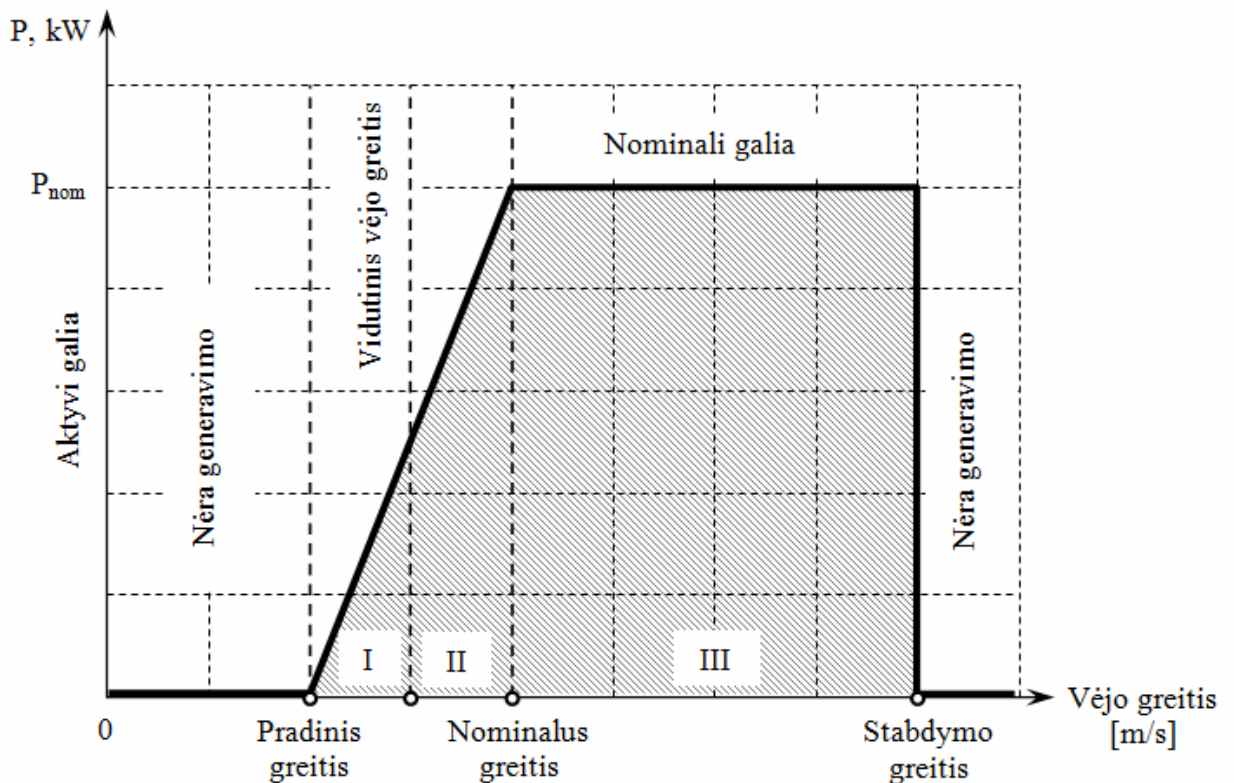
Yra atvejų, kada vėjo elektrinių statyba sukėlė dirvožemio eroziją. Šios problemos galima išvengti, statybos projektavimo pradžioje pakankamai dėmesio skiriant dirvožemio apsaugai ir erozijos reguliavimo priemonėms. Tai galima daryti vykdant bet kokio pobūdžio statybą lengvai erozijos paveikiamoje vietovėje. Priešerozinių priemonių sąrašas yra minimaliai mažo kelių skaičiaus statyba, kuo didesnis natūralių žemės kontūrų išlaikymas ir vėjo elektrines statant suardytos žemės atstatymas. Statant mažos galios vėjo elektrines šios problemos išvengiama.

2.5. Vėjo elektrinės galios charakteristikos

Atviros gyvenamos zonos gali turėti stiprius vėjo greičius ir žemą turbulentiškumą, tačiau zonose, kur yra daug pastatų, vidutiniai vėjo greičiai yra žemesni. Šiose vietose, turi būti parenkamos specialios vėjo turbinos.

Turbinos pradeda veikti esant tam tikriems vėjo greičiams, jei vėjo greitis bus žemesnis negu rotoriaus suveikimo greitis, tai turbina nesisuks. Atitinkamai pasirinkus rotoriaus tipą, įmanomas energijos gavimas net labai žemais vėjo greičiais. Vėjo elektrinės statomos kur yra pakankamas vėjo greitis ir mažas jo turbulentiškumas, kurį sukelia sūkuriai, vėjui aptekant įvairias kliūtis. Kai kurios turbinos turbulentišomis sąlygomis veikia prastai, tačiau atitinkamos konfigūracijos rotorai dirba pakankamai gerai. Staigus vėjo krypties kitimas taip pat sukelia papildomų problemų.

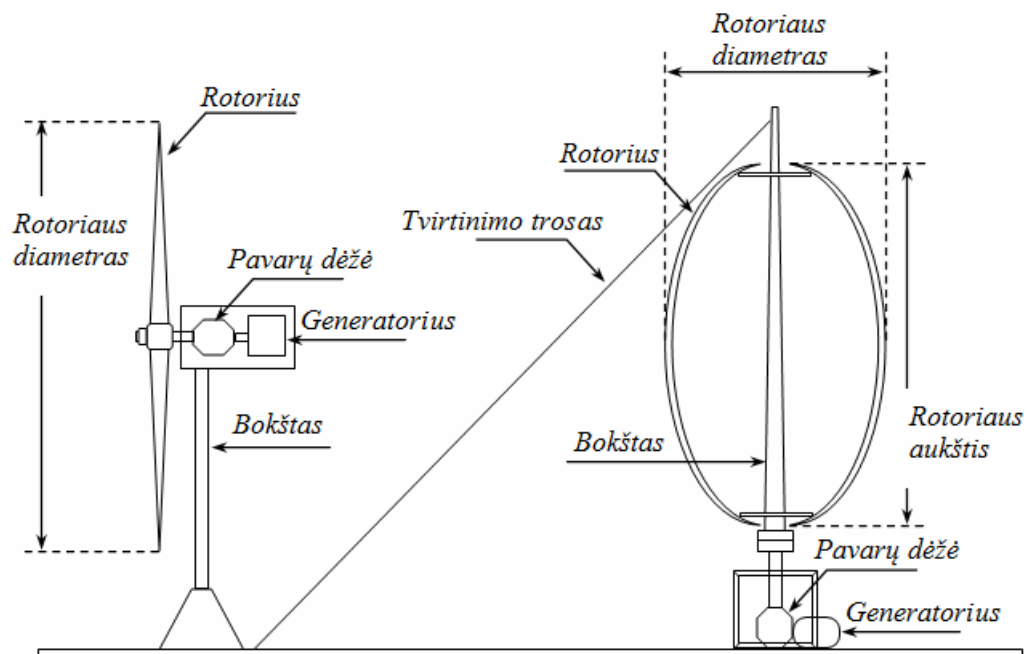
Skirtingi rotorai turi savitus specifinius greičius (4 pav.). Paleidimo greitis – tai yra greitis, kuriuo rotorius pradeda sukėti. Pradinis greitis - minimalus vėjo greitis, kuriuo vėjo elektrinė sukuria tinkamą vartoti galią. Nominalus greitis - minimalus vėjo greitis, kuriuo vėjo turbina sukuria savo nominalią galią. Stabdymas - labai stipraus vėjo greičiais daugumos vėjo elektrinių nutraukia galios generavimą ir sustoja. Normalus vėjo elektrinės veikimas paprastai atnaujinamas, kai vėjo greitis pasiekia saugų lygį.



4 pav. Idealizuota vėjo elektrinės galios kreivė

2.5.1 Vėjo elektrinės konstrukcija

Pagrindinės vėjo elektrinių dalys yra: rotorius, greičių dėžė, generatorius ir bokštas (5 pav.). Turbinos konstruojamos įvairios formos ir turi įvairių skaičių menčių. Plačiausiai paplitusios trijų menčių horizontalios ašies vėjo elektrinės.



5 pav. Horizontalios ašies ir vertikalios ašies vėjo elektrinių pavyzdžiai

Generatoriai, pagaminti naudojant neodimio magnetus, puikiai tinka nedidelės galios vėjo elektrinėms. Naudojant specialią statoriaus konstrukciją ir apvijų išdėstymą, rotoriaus sukimasis praktiškai priklauso tik nuo trinties guoliuose. Nuolatinių magnetų generatoriaus generuojama srovė labiausiai tinkama akumuliatorių krovimui ir elektriniam šildymui. Vėjo elektrinės rotoriaus mentės gaminamos iš kompozicinių medžiagų. Kiekviena mentis gaminama atskirai, o kraštas padengiamas specialia antikorozine medžiaga ir nudažomas. Bokštai daugiausia gaminami dviejų rūšių: vientisų sujungiamų plieno vamzdžių arba iš suvirintų plieno kampuočio detalių. Aukštis pasirenkamas pagal vietovę.

Vertikalios ašies nedidelės galios vėjo elektrinės konstrukcija panaši, tačiau turi trūkumų. Jos lėtaeigės, vėjo energijos kiekis, pratekantis per besisukančių menčių užimamą plotą panaudojamas mažiau nei horizontalios ašies vėjo elektrinėse. Pagrindiniai elektrinės elementai - greičių dėžė, generatorius gali būti sumontuoti ant elektrinės pamato, tai palengvina aptarnavimą. Prancūzų išradėjas D.Darrieus 1920 m. užpatentavo vertikalios ašies vėjo elektrinę. Vėjo energijos kiekis, pratekantis per darbinę menčių plotą, panaudojamas daugiau kaip 30 proc. Pastaraisiais metais pradėta plačiau domėtis šiomis elektrinėmis, atlikta daugybė tyrimų, konstrukcinių pakeitimų, kurie pagerina rotoriaus naudingumą.

2.5.2. Vėjo elektrinių rotorių tipai

Vėjo elektrinių rotorių tipai skirstomi pagal turbinos ašies orientaciją ir menčių konstrukciją (6 pav.). Šiuo metu daugiausiai naudojami trijų menčių rotoriai, rečiau dviejų menčių rotoriai, o vienos mentės rotoriai naudojami tik išskirtinėse didelio vėjingo sąlygose [11]. Savonius rotoriai, nepaisant labai paprastos konstrukcijos, turi svarbių trūkumų, dėl kurių ribojamas jų panaudojimas energetinėms reikmėms. Vienas svarbesnių – didelė jų masė, tenkanti galios vienetui. Siekiant pagaminti didesnės galios vėjo elektrinę, reikėtų didinti rotoriaus matmenis, bet tai smarkiai padidintų ir elektrinės masę [3].

Horizontalios ašies vėjo elektrinė	Vertikalios ašies vėjo elektrinė
→ Vienos mentės rotorius	→ Vientisas Savonius rotorius
→ Dviejų menčių rotorius	→ Praskirtas Savonius rotorius
→ Trijų menčių rotorius	→ Persuktas Savonius rotorius
→ Keturių menčių rotorius	→ Darrieus rotorius
→ Penkių menčių rotorius	→ Dviejų menčių H tipo rotorius
→ Šešių menčių rotorius	→ Trijų menčių H tipo rotorius
→ Daugiamentis rotorius	→ Penkių menčių H tipo rotorius
→ Spiralinis rotorius	→ Kombinuotas Darrieus ir Savonius rotorius
→ Sferinis rotorius	→ Aerodinaminis H tipo rotorius
	→ Skersinio srauto rotorius (cross-flow)

6 pav. Vėjo elektrinių rotorių tipai

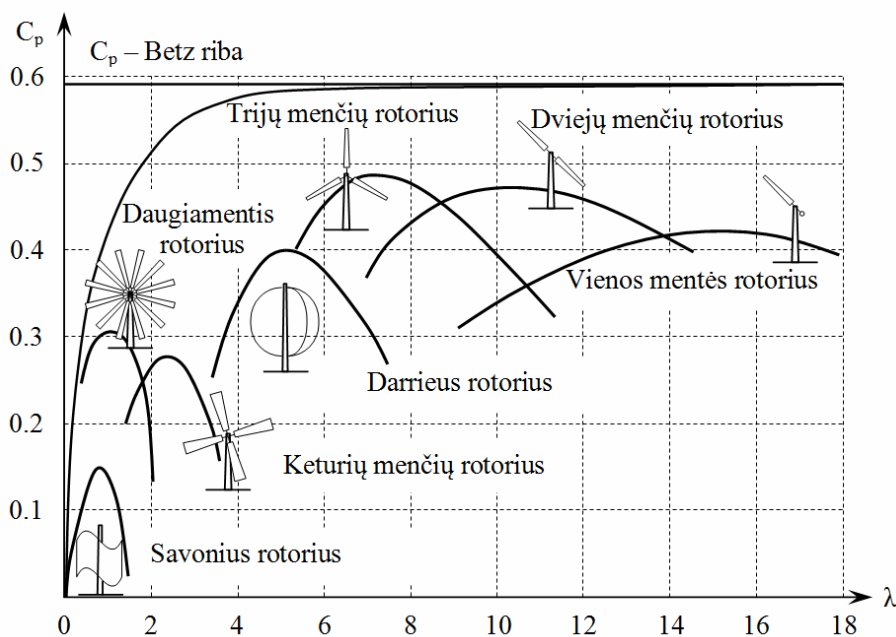
Įvairių tipų rotoriai geriausiai išnaudoja vėjo energiją besisukdami skirtingu greičiu. Tankus menčių išdėstymas ir didelis sukimosi greitis stabdys vėjo pratekėjimą ir neefektyviai išnaudos atitekančio srauto energiją. Tačiau jei mentės išdėstytos per retai ir rotorius sukasi per lėtai, tai didelė oro srauto dalis praeis pro rotoriaus turbinos sukimosi plokštumą ir mažai sąveikaudamas su mentėmis atiduos tik nedidelę dalį vėjo energijos.

Norint pasiekti maksimalų rotoriaus efektyvumą, rotoriaus sukimosi greitis turi atitikti vėjo greitį. Ryšį tarp vėjo greičio ir rotoriaus sukimosi greičio charakterizuoja rotoriaus greitaeigiškumas (λ), tai mentės galo (horizontalios ašies rotoriaus) ar mentės (vertikalios ašies rotoriaus) linijinio greičio santykis su vėjo greičiu.

Lyginant su horizontalios ašies vėjo elektrinėmis, vertikalios ašies vėjo elektrinių rotoriaus sukimosi greitis žymiai mažesnis, tai leidžia panaudoti netgi didelius vėjų greičius. Šios elektrinės pradeda esant mažiems vėjo greičiams ir triukšmo lygis neviršija 40 db. Elektrinės nereikia kelti aukštai, ji gerai dirba nelygaus reljefo vietovėse ir taip pat tarp pastatų.

2.5.3. Vėjo elektrinių galios koeficientas ir greitaeigiškumas

Rotoriaus išvystoma galia priklauso nuo rotoriaus tipo, menčių skaičiaus, formos, profilio, padėties vėjo sraute ir rotoriaus darbo ploto. Tačiau daugiamentiniai rotorai turi didesnę pradinį sukimo momentą esant mažam vėjo greičiui ir maksimalią galią jie pasiekia esant nedideliame sukimosi greičiui. Rotoriaus išvystoma galia yra mažesnė už vėjo srauto galią. Kokią vėjo srauto galios dalį rotorius paverčia mechanine galia, parodo vėjo energijos išnaudojimo arba dar vadinamas galios koeficientas. Teoriškai apskaičiuota, kad idealaus rotoriaus maksimalaus galios koeficiento reikšmė yra 0,593 (Betz riba). Tobuliausių šiuo metu gaminamų rotorijų, naudojamų horizontalios ašies vėjo elektrinėse, pasiekiami maksimali galios koeficiento (C_p) reikšmė yra 0,35 - 0,48. Vertikalios ašies vėjo elektrinių galios koeficientai mažesni, paprastai neviršijantys 0,20 - 0,35. Šių rotorijų privalumas yra tas, kad jie pradeda veikti esant mažam vėjo greičiui ir išvysto didelį sukimo momentą. Vertikalios ašies elektrinių nereikia orientuoti pagal vėjo kryptį – jie visada užima darbinę padėtį. Be to, tokia konstrukcija suteikia galimybę montuoti elektrinės agregatus bokšto papėdėje, todėl patogiau juos eksploatuoti. Tačiau dėl nuolat kintančio rotoriaus sukimo momento, kyla pulsuojančios apkrovos, todėl konstrukcijas reikia daryti atsparesnes.



7 pav. Vėjo elektrinių rotorijų galios koeficientų priklausomybė nuo greitaeigiškumo

Rotorius efektyviausiai veikia kai galios koeficientas yra didžiausias. Didžiausią reikšmę galios koeficientas pasiekia esant tik tam tikram optimaliam greitaeigiškumui (7 pav.). Siekiant palaikyti optimalų greitaeigiškumą vėjaračio sukimosi greitis keičiamas priklausomai nuo vėjo greičio. Pagrindinių vėjo elektrinių rotorijų tipų parametrų palyginimas pateiktas 5 lentelėje.

5 lentelė. Vėjo elektrinių rotorijų parametrų palyginimas

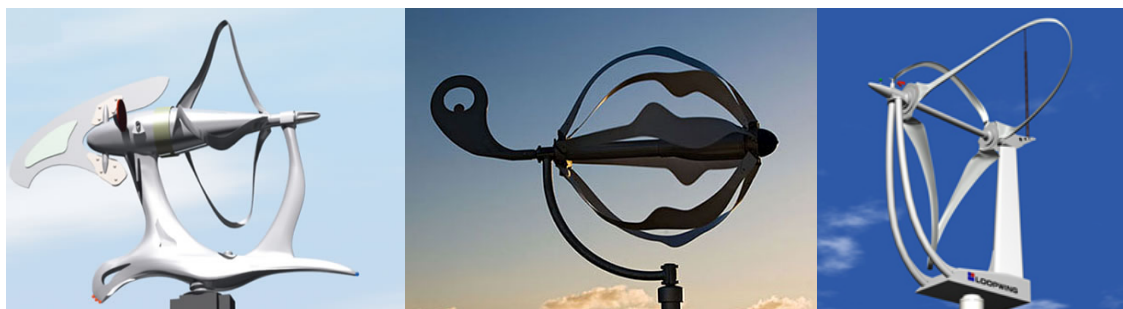
<i>Rotoriaus tipas</i>	<i>Greitis</i>	<i>Momentas</i>	<i>Gamyba</i>	C_p	λ
Horizontalios ašies rotoriai					
Burinis	Žemas	Vidutinis	Paprasta	0.05 – 0.15	1.5 – 2.0
Daugiamentis	Žemas	Aukštas	Vidutinė	0.15 – 0.30	1.0 – 1.5
Šešių menčių	Vidutinis	Žemas	Vidutinė	0.20 – 0.35	3.0 – 5.0
Vienos menties	Aukštas	Labai žemas	Tiksli	0.30 – 0.45	5.0 – 7.0
Dviejų menčių	Aukštas	Labai žemas	Tiksli	0.30 – 0.45	5.0 – 10.0
Trijų menčių	Aukštas	Žemas	Tiksli	0.30 – 0.45	14.0 – 16.0
Vertikalios ašies rotoriai					
Panemone	Žemas	Vidutinis	Paprasta	< 0.10	0.4 – 0.8
Savonius	Vidutinis	Vidutinis	Vidutinė	0.15	0.3 – 1.0
Darrieus	Vidutinis	Labai žemas	Tiksli	0.25 – 0.35	3.0 – 5.0
Aerodinaminis H-tipo	Vidutinis	Labai žemas	Tiksli	0.20 – 0.35	2.0 – 3.0
Skersinio srauto	Žemas	Aukštas	Vidutinė	0.30 – 0.45	0.2 – 0.3
Kombinuotas	Vidutinis	Vidutinis	Vidutinė	0.27 – 0.33	1.1 – 1.3
H-tipo	Vidutinis	Vidutinis	Vidutinė	0.25 – 0.30	1.4 – 1.5
Persuktas Savonius	Vidutinis	Vidutinis	Tiksli	0.15 – 0.20	0.6 – 0.8

Aerodinaminių vėjo elektrinių rotorijų konstrukcija skiriasi savo aukštu sudėtingumu nei tradicinių elektrinių. Tokia sudėtinga konstrukcija didina rotoriaus efektyvumą, dėl to šio tipo vėjo elektrinės tinkamos naudoti net ir miesto sąlygomis. Aerodinaminė vėjo elektrinė puikiai tinka atšiaurioms darbo sąlygoms. Specialiai suprojektuota vertikali ašies vėjo elektrinė tinkama naudojimui mieste ar kalvotose aplinkose. Šios vertikalios ašies vėjo elektrinės (8 pav.) turi labai žemą vibracijos lygį, labai žemą triukšmo lygį ir didelį efektyvumą.



8 pav. „Helix Wind“, „H Type“, „Gorlov“, „Natura Levo“ ir „Mag-Wind“, aerodinaminės vertikalios ašies vėjo turbinos

Šiuolaikinės aerodinaminės horizontalios ašies vėjo elektrinės (9 pav.) paprastai turi pakankamai aukštą efektyvumą, bet jų statymas yra labai brangus. Jas reikia nukreipti vėjo link naudojant papildomą kontrolės mechanizmą. Vertikalios ašies rotoriams nereikia tokios kontrolės sistemos – rotoriaus padėtis yra visada teisinga. Dėl jų reliatyvaus paprastumo, jų statybos kaštai yra daug mažesni, negu horizontalių vėjo elektrinių.



9 pav. „Looping“, „Wind-ball“ ir „Loop-Wing“ aerodinaminės horizontalios ašies vėjo elektrinės

Vertikalios ašies vėjo elektrinės yra išpuoselėta ir elegantiška alternatyva tradicinėms horizontalioms vėjo elektrinėms. Jos yra suprojektuotos taip, kad būtų pakankamai efektyvios (5 lentelė). Galios koeficiento reikšmė didesnė ($C_p \sim 0,4$) esant didesniai greitaeigiškumui ($\lambda \sim 3$). Vertikalios vėjo elektrinės gali būti panaudotos beveik bet kokioje aplinkoje: visuomeninėse vietose, centre ar ant pavienių namų. Dėl menčių projekcijos jos dirba kai vėjo srautai yra bet kokios krypties, todėl gali būti statomos žemesniuose aukščiuose negu horizontalios ašies elektrinės, o tai palengvina jų eksploataciją ir daro jas saugesnėmis. Palengvėja elektrinių įdiegimas, priežiūra ir aptarnavimas. Aerodinaminių vėjo elektrinių palyginimas pateiktas 6 lentelėje.

6 lentelė. Vėjo elektrinių palyginimas

<i>Turbinos tipas</i>	<i>Įsisukimas</i>	<i>Galios koeficientas</i>	<i>Greitaeigiškumas</i>	<i>Triukšmai</i>	<i>Veleno vibracijos</i>	<i>Bokšto vibracijos</i>
Propelerinis	<i>Papildoma įranga</i>	<i>Aukštas</i>	<i>Aukštas</i>	<i>Dideli</i>	<i>Neturi</i>	<i>Didelės</i>
Daugiamentis	<i>Savaiminis</i>	<i>Vidutinis</i>	<i>Žemas</i>	<i>Maži</i>	<i>Neturi</i>	<i>Didelės</i>
H tipo	<i>Papildoma įranga</i>	<i>Vidutinis</i>	<i>Vidutinis</i>	<i>Dideli</i>	<i>Didelės</i>	<i>Neturi</i>
Savonius	<i>Savaiminis</i>	<i>Žemas</i>	<i>Žemas</i>	<i>Neturi</i>	<i>Didelės</i>	<i>Neturi</i>
Aerodinaminės	<i>Savaiminis</i>	<i>Vidutinis</i>	<i>Vidutinis</i>	<i>Neturi</i>	<i>Neturi</i>	<i>Neturi</i>

Iš lentelėje pateiktų duomenų matosi, kad aerodinaminės vėjo elektrinės nereikalauja papildomos įrangos įsisukimui, galios koeficientas pakankamai aukštas ($C_p \sim 0,4$), greitaeigiškumas didesnis nei Savonius tipo turbinos, dirba be triukšmų ir neturi veleno bei pastatymo bokšto vibracijų. Papildoma aerodinaminės horizontalios vėjo elektrinės funkcija yra ta, kad ji pati save suka po 10 sekundžių, kas minutę. Ši automatinė funkcija leidžia elektrinei greičiau išibėgėti pradėjus pūsti vėjui bei nesudaro sąlygų kauptis ledui, esant žemai lauko temperatūrai. Turbina turi integruotą intelektualų baterijų kroviklį ir elektrinės apkrovos reguliatorių. Jokios papildomos apsaugos nereikalauja, nenutrūkstamai generuoja elektros energiją iki 50 m/s stiprumo vėjų.

2.6 Vėjo energijos ištekliai

Kylant į viršų, vis mažiau reiškiasi žemės paviršiaus kliūčių įtaka jo greičio pokyčiams. Keleto šimtų metrų aukštyje vėjas skrieja laisvai, netrukdomas. Vėjo greičių kategorijos ir tinkamumas vėjo jėgainėms pateiktos 7 lentelėje.

7 lentelė. Beaufort'o skalė

Kategorija	Greitis, m/s	Charakteristika	Veikimo efektas	Tinkamumas VE
0	0,0-0,4	štilis	dūmai kyla vertikaliai	neveikia
1	0,4-1,8	tylus	vėjarodis dar nerodo, bet dūmai kyla įstrižai	neveikia
2	1,8-3,6	lengvas	šlama medžių lapai	blogos
3	3,6-5,8	silpnas	medžių lapai svyruoja	patenkinamos kai kuriems tipams
4	5,8-8,5	vidutinis	svyruoja plonos medžių šakos	geros
5	8,5-11,0	gaivus	pradedama siūbuoti lapuočiai medžiai	labai geros
6	11,0-14	smarkus	įsisiūbuoja didelės medžių šakos	priimtinos mažoms VE
7	14-17	stiprus	siūbuoja visi medžiai	ribinės leistinos
8	17-21	labai stiprus	lūžta medžių šakos	neleistinos
9	21-25	štormas	nedideli sugriovimai	neleistinos
10	25-29	stiprus štormas	ryškūs sugriovimai	neleistinos
11	29-34	labai stiprus štormas	platūs sugriovimai	neleistinos
12	>34	uraganas	naikinantys sugriovimai	neleistinos

Miesto vėjo išteklių įvertinimais labai priklauso nuo statybos, pastatų architektūros, kaimynystės ir vietovės. Priklausomai nuo pastato rengimų ir formų, parametrai kaip vėjo kryptis ir greitis gali žymiai pasikeisti. Šis sunkumas uždraudžia empirinių vėjo modelių naudojimą, kurie ganėtinai yra paplitę miesto erdvėje.

Vienas iš sprendimo būdų yra vėjo duomenų kaupimas naudojant vėjo greičio matuoklius įvairiuose aukščiuose. Tačiau, šis procesas trunka mėnesius ir metus, reikalingos duomenų kaupimo bazės. Greitesnis, bet taip pat ir žymiai brangesnis metodas gali būti tikslaus fizinio modelio testavimas aerodinaminiam vamzdyje.

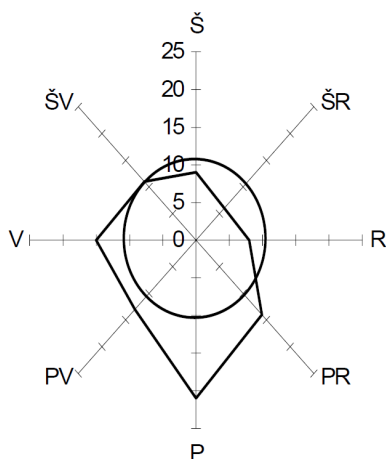
Praktinė ir efektyvi alternatyva anksčiau minėtiems metodams, vykdam tikslią analizę, yra kompiuterizuotas modelio naudojimas. Su išsamiu kompiuteriniu modeliu galima lengvai numatyti sudėtingą vėjo struktūrą aplink pastatus.

2.6.1 Vėjo kryptis ir greitis

Oro judėjimas Žemės paviršiaus atžvilgiu vadinamas vėju. Paprastai vėju vadinami horizontalūs oro judesiai, nors kai kada įvertinama ir vertikali šių judesių sudedamoji. Vėjas yra nusakomas greičio vektoriumi ir kaip kiekvienas vektorius turi dydį ir kryptį. Vėjo greitis - oro tūrio nueitas kelias Žemės paviršiaus atžvilgiu per laiko vienetą. Vėjo kryptis - taško iš kurio pučia vėjas azimutas. Vėjo greitis dažniausiai išreiškiamas metrais per sekundę.

Dažnai vėjo greitis vertinamas balais pagal Beaufort'o skalę (7 lentelė). Šioje skalėje vėjo greitis suskirstytas į 12 gradacijų. Praktikoje naudojamas išlygintas vėjo greitis, t.y. vidutinė greičio reikšmė per tam tikrą, paprastai labai neilgą (pvz.: 10 min), laiko tarpą, ir momentinis greitis, t.y. vėjo greitis tam tikru laiko momentu (matuojamas mažai inertiškais prietaisais). Momentinis greitis gali atspindėti trumpalaikius vėjo gūsius bei staigius vėjo susilpnėjimus, tačiau meteorologinėse stotyse dažniausiai yra matuojamas išlygintas vėjo greitis. Vidutinis vėjo greitis prie žemės paviršiaus apie 5 - 10 m/s. Stiprių audrų metu gali viršyti 30 m/s, o gūsiuose net 60 m/s.

Nusakyti vėjo kryptį galima arba nurodant horizonto iš kurio pučia vėjas tašką, arba nurodant kampą (azimutą), kurį sudaro vėjo kryptis su meridianu. Pirmu atveju yra nurodomas vienas iš 8, 16 arba 32 horizonto rumbų, antru atveju vėjo kryptis nusakoma laipsniais. Kaip ir vėjo greitis, vėjo kryptis gali būti išlyginta ir momentinė. Momentinė kryptis svyruoja apie tam tikrą vidutinę (išlygintą) kryptį. Siekiant apibūdinti vietovės vėjo režimą yra nustatomos vienos ar kitos vėjo krypties pasikartojimas per tam tikrą laiko tarpą. Pagal tai yra sudaroma diagrama, kurioje nuo koordinatinių sistemos pradžios horizonto rumbų kryptimi yra atidedamos atkarpos, kurių ilgis proporcingas tos krypties vėjo pasikartojimo dažniui. Atkarpų galai yra sujungiami linija, o štilio pasikartojimo dažnis atitinka apskritimo, brėžiamo apie koordinatinių pradžių, spindulio ilgį. Tokia diagrama vadinama vėjų rože (10 pav.).



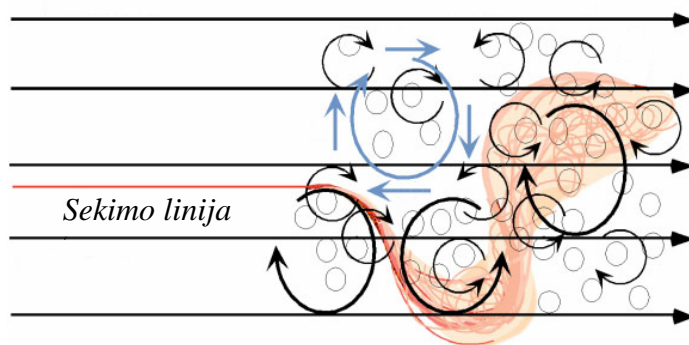
10 pav. Vilniaus vėjų rožė (pagal Vilniaus AMS 1965–1990 metų stebėjimų duomenis)

2.6.2 Vėjas ir turbulentiškumas

Oro judėjimas, kai atskiri oro tūriai juda lygiagrečiai aplinkiniams oro tūriams vadinamas laminariniu. Tačiau realioje atmosferoje oro judėjimas pasižymi turbulentiškumu, t.y. atskiri oro tūriai ore maišosi, judėdami ne lygiagrečiais keliais. Todėl ore atsiranda netvarkingai judantys įvairaus dydžio sūkuriai ir sraujymės. Atskirų oro tūrių, vadinamų turbulencijos elementais, judėjimas yra labai sudėtingas, lyginant su bendra oro pernaša. Jie gali judėti statmenai ar net prieš bendrą oro pernašos kryptį, o elementų dydis gali siekti dešimtis metrų. Galima daryti išvadą, kad kryptingos bendros oro pernašos fone egzistuoja daugybė chaotiškų turbulencijos elementų judesių, kurie sukelia momentinio vėjo greičio ir krypties pulsacijas.

Turbulentiškumas atsiranda dėl vėjo greičio skirtumų. Vėjo greičio skirtumas tarp gretimų oro tūrių vadinamas vėjo poslinkiu. Ypač stiprus vėjo poslinkis apatiniuose atmosferos sluoksniuose, kur jaučiamas trinties į žemės paviršių poveikis. Todėl trinties sluoksnyje ypač didelis turbulentiškumas, kuris gali formuotis ir termiškai vienalytėje oro masėje. Toks turbulentiškumas vadinamas diniminiu turbulentiškumu (11 pav.).

Be to, turbulencijos formavimuisi didelę reikšmę turi ir plūdrumo (Archimedo) jėga. Šiltesni ir mažiau tankūs oro tūriai kyla į viršų, o šaltesni ir retesni leidžiasi žemyn. Toks oro maišymasis vyksta tuo intensyviau, kuo greičiau oro temperatūra žemėja su aukščiu, t.y. kuo didesnis vertikalus temperatūros gradientas. Tokia turbulencija vadinama termine turbulencija. Realioje atmosferoje turbulentiškumą visada nulemia abu faktoriai ir galima kalbėti tik apie vieno kurio turbulencijos tipo vyravimą.

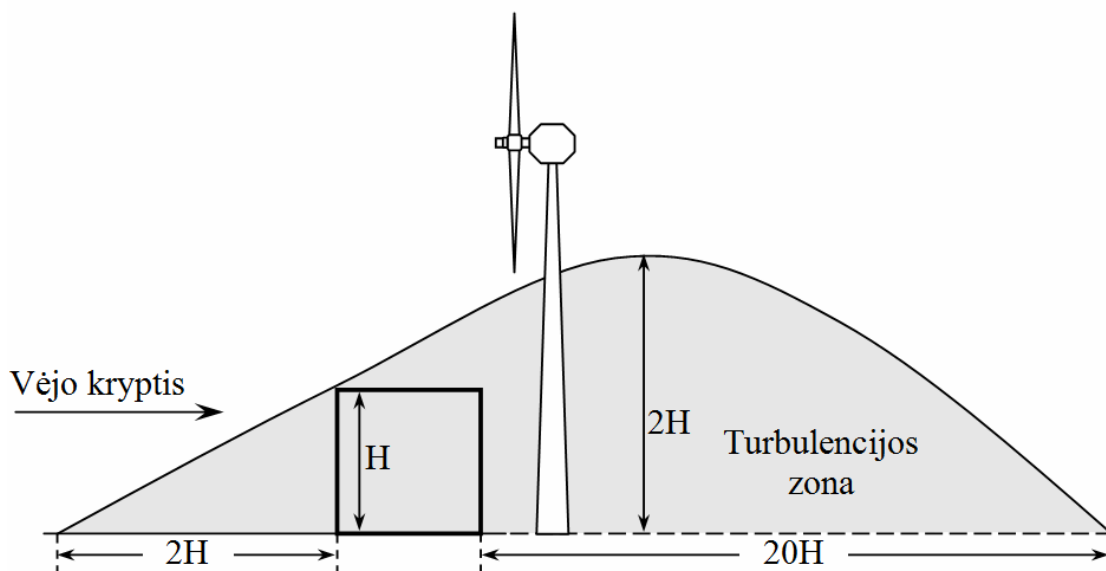


11 pav. Turbulencijos formavimasis

Dėl turbulencijos (11 pav.) atsiranda vėjo gūsių, kurių dėka vyksta vėjo krypties ir greičio pulsacija apie vidutinę reikšmę. Vėjas, kuriame jaučiamos stiprios tokio pobūdžio pulsacijos, vadinamas gūsingumu. Ypač stiprūs gūsių vadinami škvalais. Škvalas - staigus vėjo greičio padidėjimas 8 m/s ir daugiau per trumpą laiką (< 2 min.). Kuo didesnis turbulentiškumas tuo stipresnis vėjo gūsingumas.

2.6.3 Kliūčių poveikis vėjui

Dėl žemės paviršiaus nelygumų, oro sraute atsiranda trikdymai. Kliūčių dydis ir forma bei oro srauto stratifikacija lemia tai, kaip oro srautas apteka kliūtis: iš šono, per viršų ar apatiniame srauto sluoksnyje iš šono, o viršutiniame per viršų. Vėjo kryptis, greitis ir jo struktūra susidūrus su kliūtimis labai keičiasi: netoli kliūčių atsiranda sukūriai, stiprėja turbulencija. Tai priklauso nuo kliūčių pobūdžio, vėjo krypties ir greičio, atmosferos stovio. Aplenkiant kliūtis vėjas prieš jas susilpnėja, bet kliūtis šonuose bei virš jos vėjas greitėja, kadangi srūvio linijos tose vietose tankėja. Didelę įtaką turi atmosferos terminė stratifikacija: kai stratifikacija pastovi (temperatūra su aukščiu auga mažiau, nei sausaadiabatinis gradientas) vėjas stengiasi aplenkėti kliūtis tik iš šonų, kai stratifikacija nepastovi - formuojasi galingi aukštyneigiai srautai priešvėjinėje pusėje ir žemyneigiai pavėjinėje. Ypač sustiprėja vėjas oro srautui patekus į siaurėjantį orografinį slėnį (pvz.: tarp dviejų artėjančių kalnų grandinių).



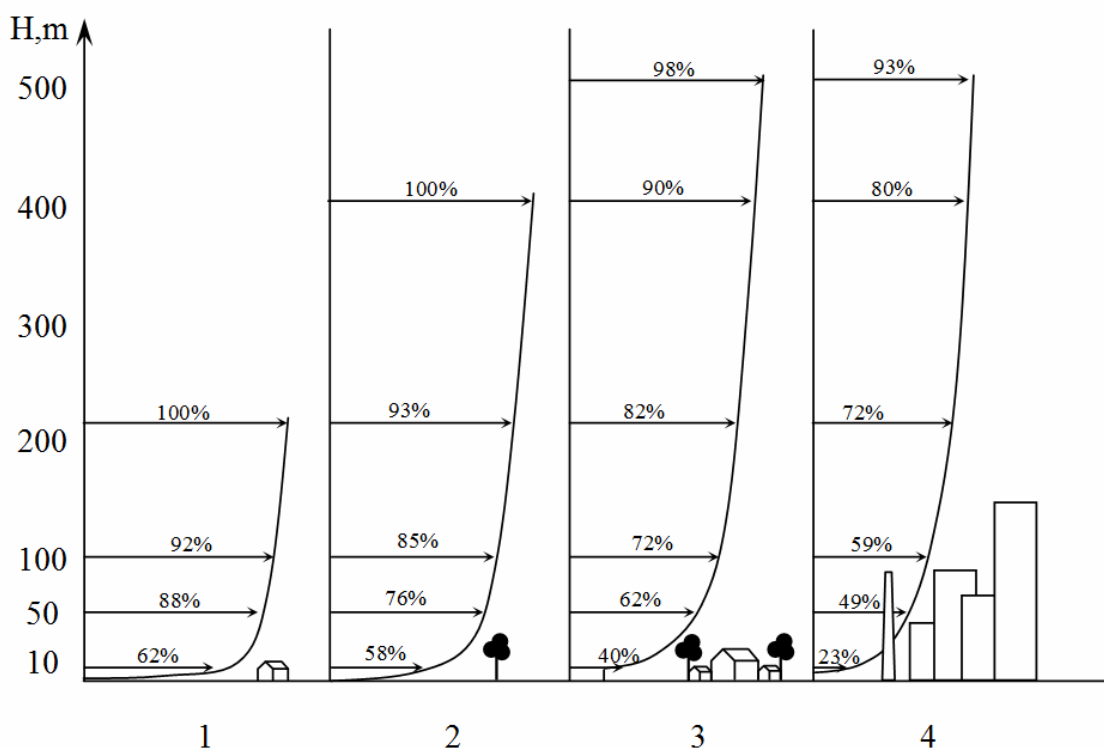
12 pav. Turbulentinio vėjo srauto zona, kai vėjo kliūtis – nedidelis pastatas

Vėjo greičio sumažėjimo dėl kliūtis efektas didėja didėjant kliūtis gabaritams (12 pav.). Turbulentinio vėjo srauto zona, kai vėjo kelyje iškyla nedidelė kliūtis, daug kartų viršija pačios kliūtis užimamą tūrį. Kliūčių poveikis vėjui pasireiškia 10-20 kartų didesniu atstumu, nei kliūtis aukštis. Kartais prieš kalnagūbrį, bei už jo formuojasi priešvėjiniai ir pavėjiniai sukūriai, turintys horizontalią ašį lygiagrečią gūbriui. Tada priežeminiame atmosferos sluoksnyje susiformuoja kartais net labai stiprus vėjas pučiantis nuo kliūtis priešvėjinėje gūbrio dalyje ar kliūtis link pavėjinėje dalyje. Miško masyvai susilpnina vėjo greitį prie žemės paviršiaus bei 100-500 metrų atstumu už jo, bet virš miško vėjo greitis ir gūsingumas stiprėja.

2.6.4 Trinties jėga

Judantis oras yra veikiamas trinties į Žemės paviršių jėgos. Trinties jėga suteikia oro judėjimui neigiamą pagreitį t.y. lėtina oro judėjimą, o taip pat keičia judėjimo kryptį. Kaip bet kurios dujos oras pasižymi klampumu. Klampumas - dviejų skystos arba dujinės aplinkos sluoksnių gebėjimas priešintis slydimui vienas kito atžvilgiu. Dėl oro klampumo, trinties jėgos poveikis, kuris yra didžiausias ties Žemės paviršiumi, taip pat yra jaučiamas ir įvairiuose aukščiuose. Kadangi oro klampumas yra mažas, apie 1000 m aukštyje trinties jėgos poveikis tampa labai nežymus kitų jėgų, veikiančių judantį orą, atžvilgiu. Lygis, kuriame praktiškai išnyksta trinties jėgos poveikis, vadinamas trinties lygiu.

Trinties jėga veikia todėl, kad tekant orui virš šiurkštaus žemės paviršiaus, dalelių, betarpiskai liečiančių žemės paviršių, greitis sumažėja. Oro tūriai su sumažėjusiu greičiu dėl turbulencijos patenka į aukštesnius atmosferos sluoksnius, o iš ten ateina didesniu greičiu judantis oras, kuris savo ruožtu lėtėja dėl lietimosi su Žemės paviršiumi. Todėl vėjo greičio sumažėjimas persiduoda į daugiau ar mažiau storą oro sluoksnį (nuo 200 m virš vandens paviršiaus iki 2000 m virš didelių miestų), kuris yra vadinamas trinties sluoksniu (13 pav.).

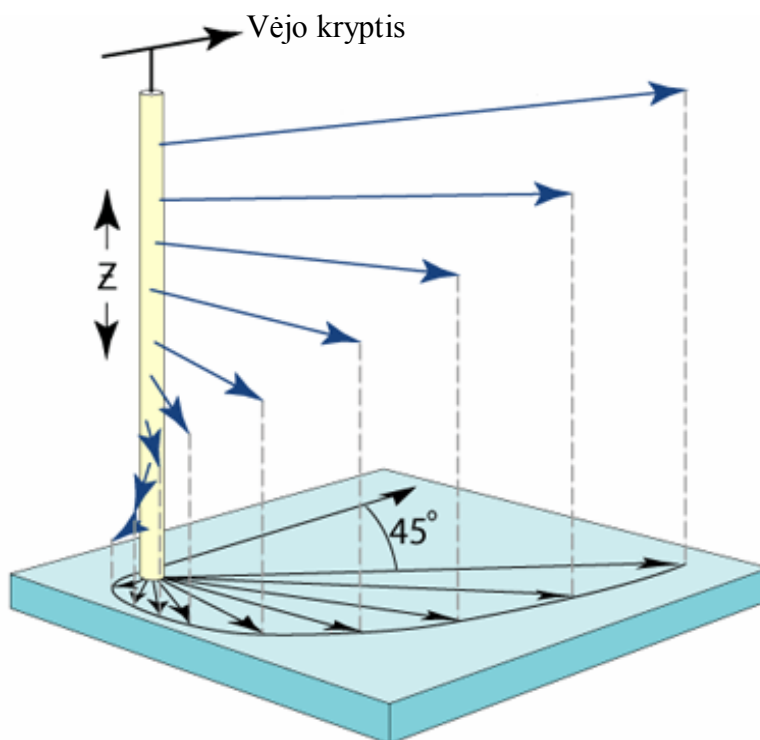


13 pav. Trinties sluoksnio priklausomybė nuo paklotinio paviršiaus pobūdžio

Esant nepastoviai stratifikacijai prie dinaminės turbulencijos prisideda ir terminė, kuri yra susijusi su aukštyneigiais oro srautais. Todėl padidėja sluoksnio, kuriame jaučiama trinties jėga, storis. Tačiau nepastovios stratifikacijos atveju trinties jėgos poveikis vėjo kryptčiai ir greičiui prie žemės paviršiaus sumažėja.

2.6.5 Vėjo paros eiga

Trinties sluoksnyje gana aiškiai pastebima vėjo paros eiga. Prie žemės paviršiaus, virš sausumos, maksimali vėjo greičio reikšmė stebima apie 14 val., o minimali naktį arba rytą. Apytiksliai nuo 500 m aukščio stebima atvirkščia paros eiga: maksimumas naktį, o minimumas dieną. Virš sausumos vėjo greičio paros amplitudė apytiksliai lygi pusei paros vidutinio vėjo greičio reikšmės. Virš jūros vėjo greičio paros eiga nėra žymi. Vėjo greičio paros eigos priežastis - oro turbulencijos paros eiga. Vykstant konvekcijai, kuri intensyviausia pirmoje dienos pusėje, didėja turbulentinė apykaita, kuri išlygina greičio skirtumus tarp pažemio ir aukštesnių sluoksnių vėjo. Todėl prie žemės paviršiaus vėjo greitis padidėja, o trinties sluoksnio viršutinėje dalyje - sumažėja. Naktį vertikalus maišymasis susilpnėja, todėl prie žemės paviršiaus vėjo greitis mažas, o didėjant aukščiui jis greitai auga.



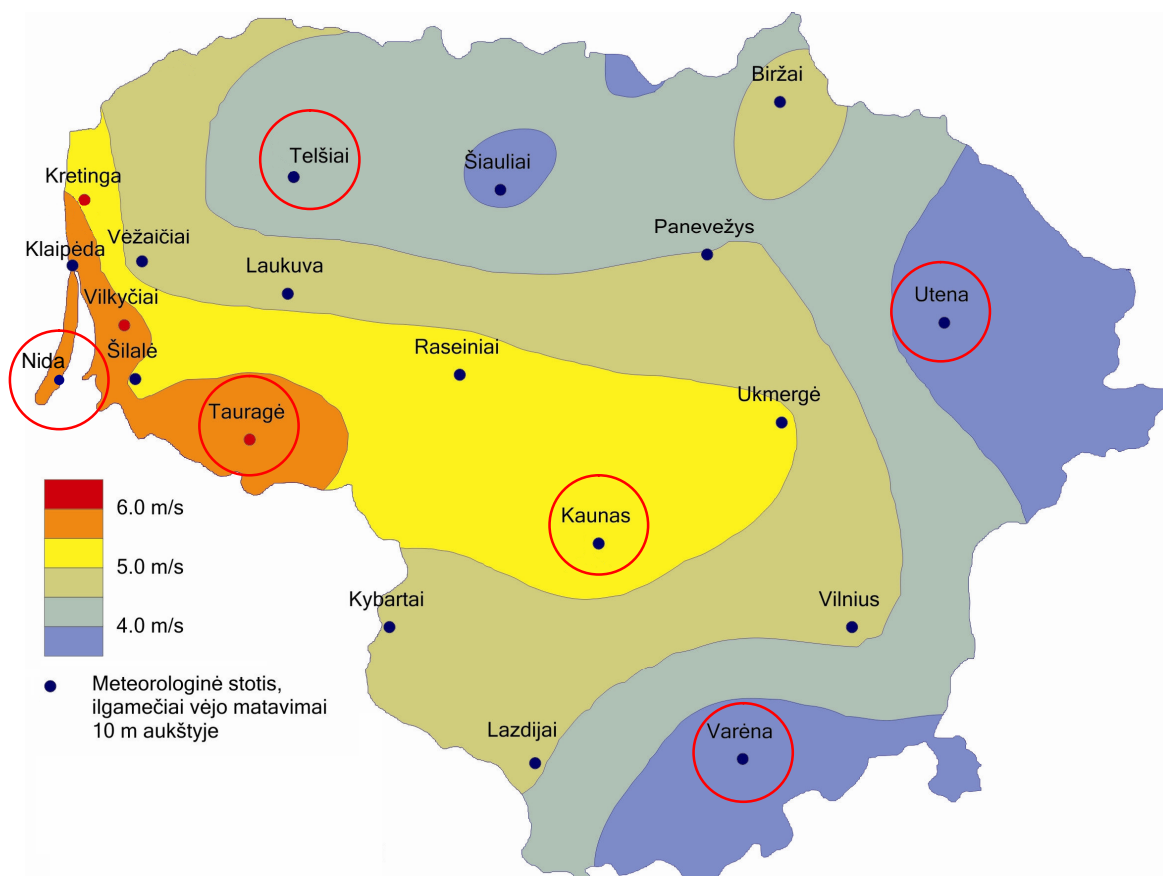
14 pav. Ekman spiralė

Vėjo kryptis taip pat turi paros eigą. Pirmoje dienos pusėje didėjant vėjo greičiui prie žemės paviršiaus, jo kryptis pasisuka į dešinę pagal laikrodžio rodyklę (artėja prie izobarų krypties), antroje dienos pusėje ir naktį kryptis pasisuka į kairę (14 pav.). Viršutinėje trinties sluoksnio dalyje vyksta atvirkštinis procesas: vakare ir naktį, vėjo kryptis pasisuka į dešinę, rytą ir dieną - į kairę. Vėjo krypties paros eigos priežastis ta pati: su vertikaliu oro judėjimu susijusi turbulencijos paros eiga.

III. Tyrimo temų ir metodų pristatymo dalis

3.1. Matavimo vietos parinkimas

Lietuvoje, įsisavinant vėjo energiją, atliktas vėjo energijos išteklių įvertinimas. Vienas svarbiausių parametru yra pasirinktos matavimo vietovės vidutinis metinis vėjo greitis, kurio dydis nustatomas atliekant daugiamečius vėjo parametru matavimus. Pirminiai vėjo energijos išteklių duomenys skaičiuoti remiantis meteorologinių stočių matavimais. Lietuvoje yra apie 25 matavimo stotys, paskirstytos po visą šalies teritoriją.



15 pav. Matavimo vietų parinkimas

Pirminiam mažos galios vėjo elektrinių įvertinimui pasirinktos vietovės žinant jų Weibull'o skirstinių parametrus 10 m aukštyje [5]. Pasirinktos šios vietovės: Nida, Kaunas, Utena, Telšiai, Tauragė ir Varėna (15 pav.).

Didelio vėjo potencialo zona yra artimas pajūrio ruožas (Klaipėdos regionas), taip pat didelis vėjingumas Lietuvoje fiksuojamas Kretingos, Skuodo, Palangos, Klaipėdos, Neringos, Šilutės ir Pagėgių rajonuose. Tyrimui pasirinktos vietovės yra didesnio ir mažesnio vėjingumo zonose.

3.1.1. Urbanistinės vietovės parinkimas

Norint tiksliau įvertinti vėjo elektrinę, pasirenkama matavimo vieta su skirtingomis natūraliomis ir gamtinėmis kliūtimis ir jų išdėstymu. Vėjo struktūra kinta priklausomai nuo aukščio virš žemės paviršiaus ir esamų kliūčių, todėl prieš įrengiant vėjo elektrines būtina atkreipti dėmesį į šiuos vėjo rodiklius:

- vidutinį mėnesio ir vidutinį metų greitį;
- maksimalų greitį;
- vėjo stiprumą ir jo krypties periodiškumą (vėjo rožė);
- turbulenciją;
- vėjo greičio kintamumą.

Vėjo greičio matavimai atlikti Šiaulių miesto meteorologinėse stotyse (16 pav.):

- 26524, kurios koordinatės: 55.9333 šiaurės platumos, 23.3173 rytų ilgumos, matavimo aukštis 106 m. virš jūros lygio.

Analizei ir skaičiavimams naudotas vienerių metų laikotarpis 2009.01.01 – 2009.12.31. Matavimo stoties parametrai buvo fiksuojami kas valandą, tačiau esant pokyčiams fiksavimo dažnis didėjo.



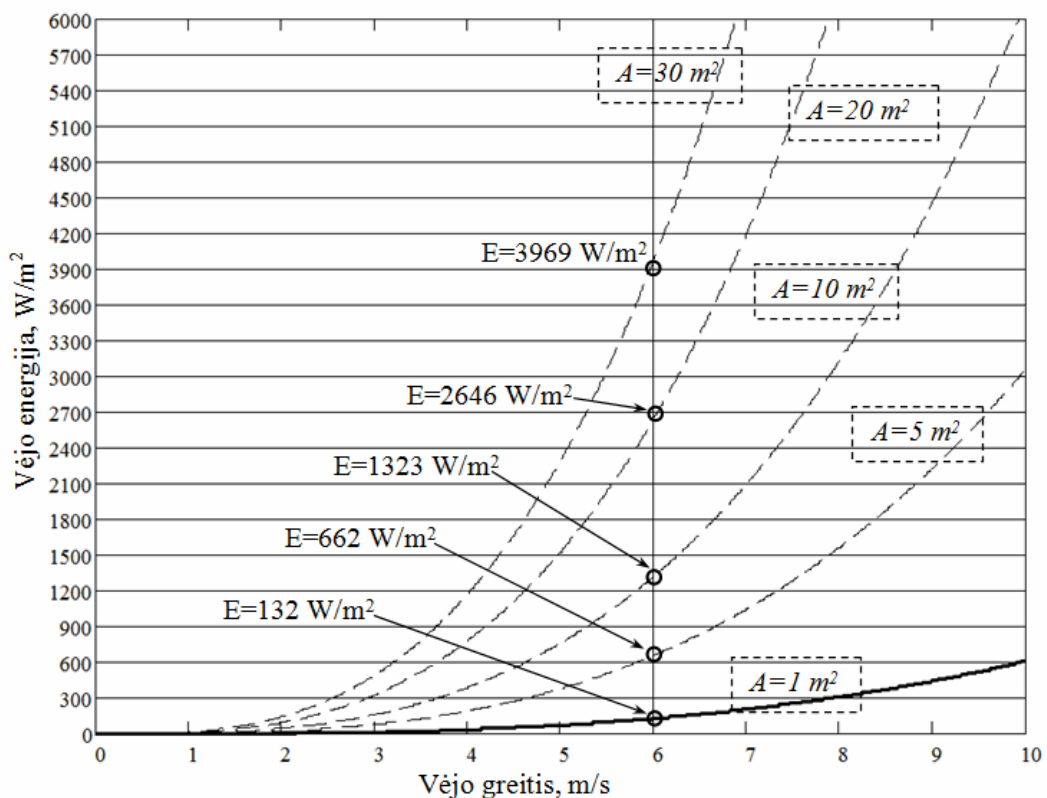
16 pav. Šiaulių miesto meteorologinė stotis

3.2. Vėjo energija

Priklausomai nuo vietovėje esamų kliūčių ir meteorologinių sąlygų, kinta vėjo greitis ir kryptis, todėl kinta ir energija $E(t)$. Vėjo energijos kiekis, tenkantis per 1 sek. 1 m² vėjo elektrinės rotorius plotui, statmenam vėjo srautui, apskaičiuojamas taip:

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

čia $E(t)$ – vėjo energija [W/m²]; v – vėjo greitis [m/s]; ρ – oro tankis [$\sim 1,225$ kg/m³], A – vėjo elektrinės rotorius plotas [1 m²].



17 pav. Vėjo greičio energijos priklausomybės skirtingiems rotorius plotams

Vėjo greičio energijos kiekis priklauso nuo rotorius ploto (17 pav.), tačiau vėjo elektrinės rotorius išvystoma galia mažesnė ir priklauso nuo rotorius tipo. Turint pasirinktos vėjo elektrinės galios kreivę ir tikimybinį metinį vėjo greičio pasiskirstymą norimoje vietovėje, galima apskaičiuoti, kiek elektros energijos galėtų pagaminti ši elektrinė. Optimaliam parinkimui turėtų būti skaičiuojami keli elektrinių variantai ir iš jų parenkama ta vėjo elektrinė, kurios galios kreivė tinka geriausiai.

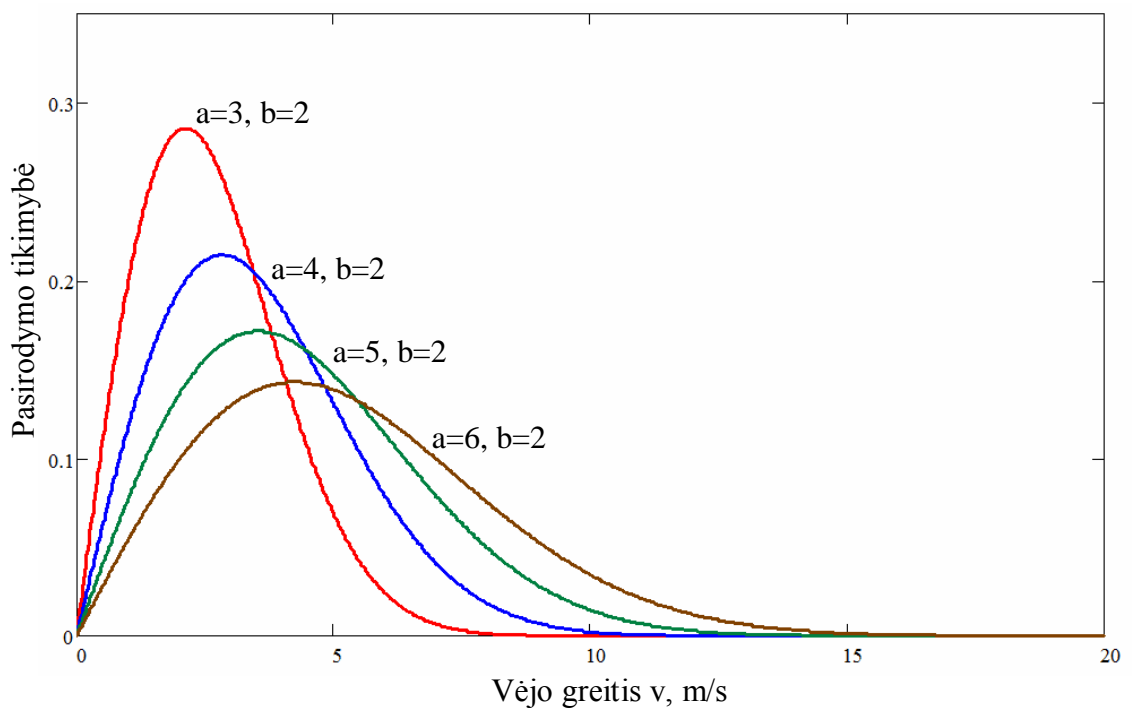
Didėjant žemės paviršiaus šiurkštumui smarkiai mažėja oro masių nešamos energijos kiekiai, taip pat mažėja vėjo elektrinių darbo efektyvumas. Skaičiuojant vidutinį metinį vėjo greitį yra labai svarbu įvertinti žemės paviršiaus šiurkštumą pasirinktoje vietovėje ir nustatyti šiurkštumo klasę.

3.3. Weibull'o skirstinio parametrai ir turbulentiškumas

Analizuojant vėjo greičius ir jų pasirodymo tikimybes matyti, kad vėjo greičio tankio funkcijos asimetrija yra teigiama ir kad ši funkcija turi ryškų maksimumą tam tikrame vėjo greičio intervale [6]. Rezultatai gaunami vėjo greičio ir krypties matavimo duomenis apdorojant matematinės statistikos būdu [5]. Tikimybinį vėjo greičio pasiskirstymą geriausiai atitinka Weibull'o skirstinys ir vėjo greičio tikimybės pasiskirstymo tankis gali būti išreikštas taip:

$$f(v) = \left(\frac{b}{a}\right) \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^b}; \quad (2)$$

čia $f(v)$ – vėjo greičio v pasiskirstymo funkcija; a – Weibull'o skirstinio skalės parametras; b – Weibull'o skirstinio formos parametras. Pavyzdys pateiktas 18 paveiksle.



18 pav. Vėjo greičio pasiskirstymo funkcijos skirtingiems parametrams

Pagrindinės duomenų padėties charakteristikos yra vidurkis, moda ir mediana. Vidutinis vėjo greitis - tai taškas, kuris vidutiniškai artimiausias visiems statistinės eilutės nariams. Yra skaičiuojamas tik kiekybinių duomenų vidurkis. Imties vidurkis (aritmetinis vidurkis) yra visų statistinės eilutės elementų suma, padalyta iš jų skaičiaus. Žinant Weibull'o skirstinio parametrus vidutinis vėjo greitis skaičiuojamas [7]:

$$v_{vid} = a \cdot \Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad (3)$$

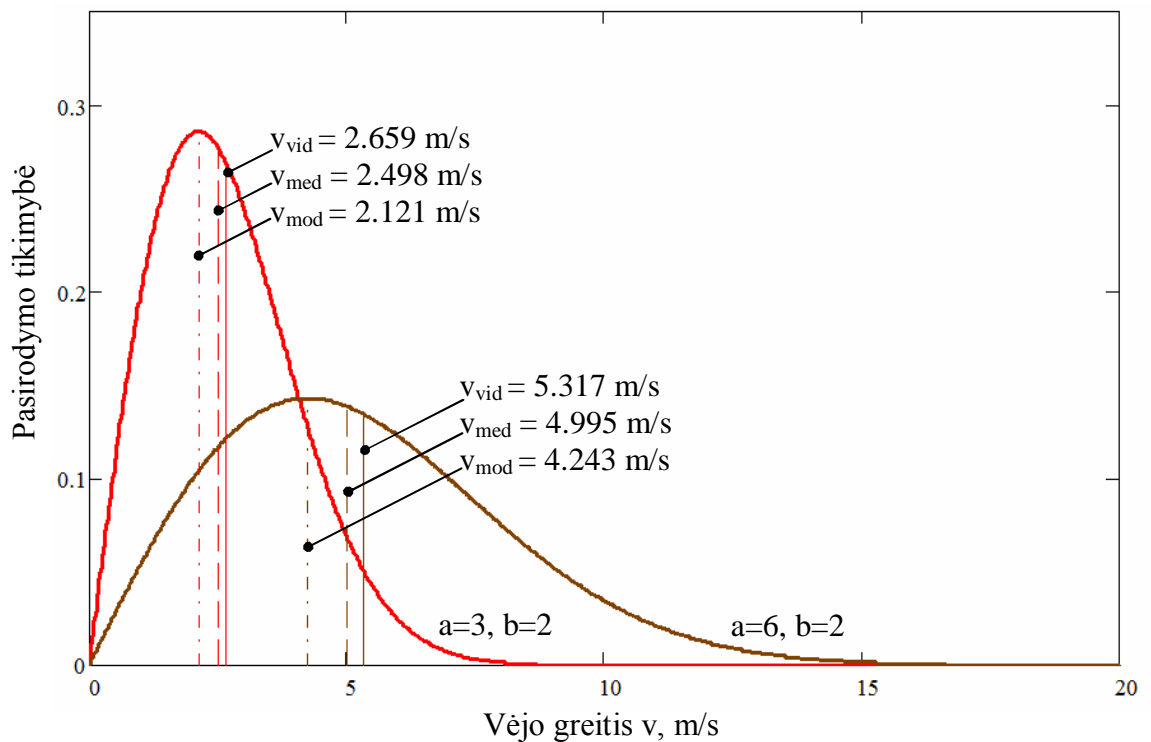
čia Γ – Eulerio gama funkcija, v_{vid} – vidutinis vėjo greitis [m/s].

Vienas svarbiausių parametru analizuojant vėjo elektrinės darbą yra vietovės vidutinis metų vėjo greitis. Mediana – tai požymio reikšmė, kuri dalija tikimybinį pasiskirstymą į dvi lygias dalis. Lygiai pusė populiacijos turi reikšmes, mažesnes ar lygias medianai, pusė populiacijos turi reikšmes, didesnes ar lygias medianai:

$$v_{med} = a \cdot (\ln(2))^{1/b}. \quad (4)$$

Moda - tai dažniausiai pasikartojanti požymio reikšmė imtyje. Moda ypač naudinga atvejais, kai vidurkis bei mediana nėra lengvai nustatomi. Pavyzdys pateiktas 19 paveiksle.

$$v_{mod} = a \cdot \left(\frac{b-1}{b}\right)^{1/b}. \quad (5)$$



19 pav. Vėjo greičio pasiskirstymo funkcijos skirtingiems parametrams

Dispersija – statistinė imties charakteristika, atspindinti labiausiai tikėtiną eilinio matavimo vertės nukrypimą nuo aritmetinio vidurkio. Dispersija charakterizuoja sklaidą kvadratiniais vienetais. Dispersija apskaičiuojama:

$$\sigma^2 = a^2 \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right]. \quad (6)$$

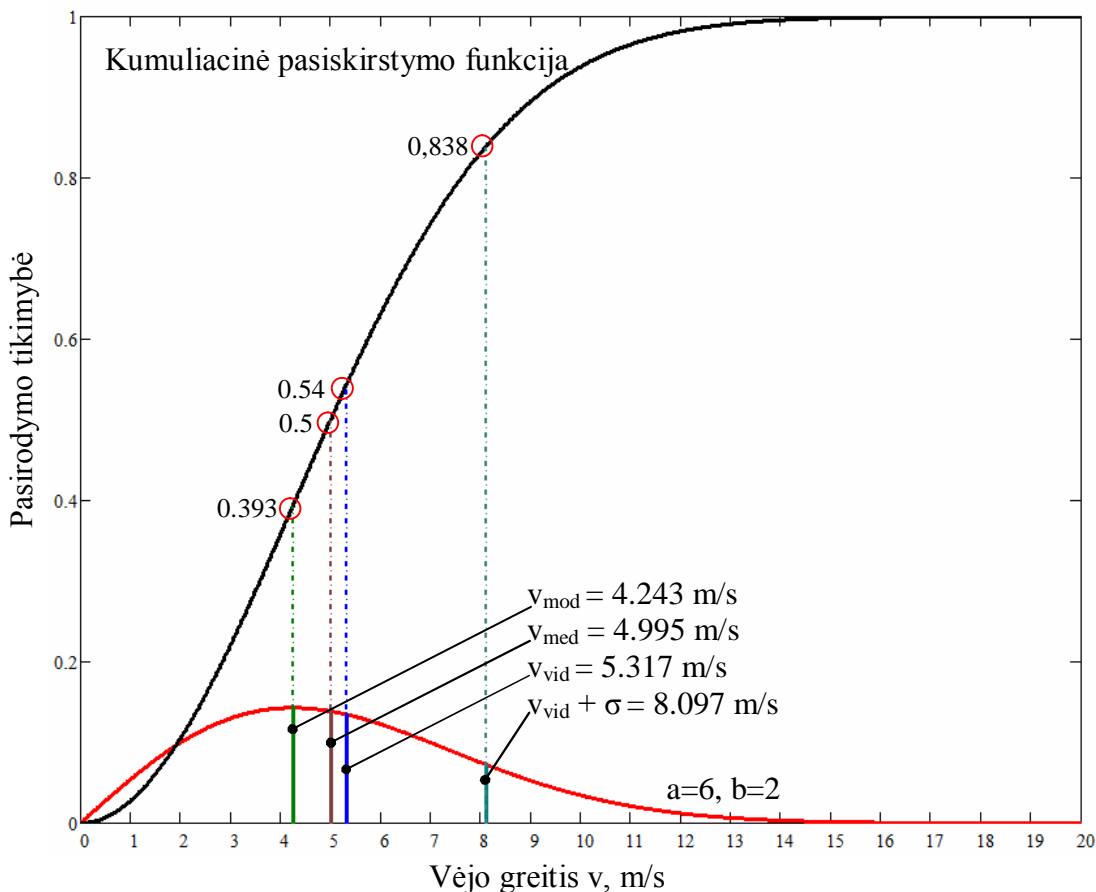
Norint, kad sklaida būtų charakterizuojama tokiais pat vienetais kaip ir matuojamas atsitiktinis dydis, naudojama kita charakteristika – vidutinis standartinis nuokrypis.

Vidutinis standartinis nuokrypis – dydis, nusakantis atsitiktinio dydžio įgyjamų reikšmių sklaidą apie vidurkį. Standartinio nuokrypio dimensija yra lygi atsitiktinio dydžio dimensijai, šiuo atveju m/s.

Standartinis vėjo greičio nuokrypis išreiškiamas:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (v_{vid} - v_i)^2}{k-1}}; \quad (7)$$

k – fiksuojamų reikšmių skaičius.



20 pav. Vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija

Kumuliacinė pasiskirstymo funkcija (20 pav.) skaičiuojama:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{a}\right)^b}. \quad (8)$$

Vėjo srauto turbulencijos lygis išreiškiamas [2]:

$$Tu = \frac{\sigma}{v_{vid}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Turbulencija mažame aukštyje susidaro, pučiant vėjui iš už kliūčių. Kuo stipresnis vėjas, tuo toliau už kliūtis jausis turbulencijos spaudimas ir blaškymas, ir kuo kliūtis aukštesnė – tuo didesniame aukštyje ims jaustis turbulencija. Turbulencijos efektai jaučiasi dvidešimt kartų didesniame atstume, nei esantis kliūtis aukštis vėjui – tai reiškia, kad esant stipriam vėjui, 10 metrų aukščio kliūtis turbulencija bus jaučiama iki 200 m atstumu pavėjui nuo kliūtis.

3.4. Paviršiaus šiurkštumo įvertinimas

Vėjo parametrai meteorologijos stotyse, matuoti 10m. aukštyje. Didėjant aukščiui ir priklausomai nuo vietovės atvirumo laipsnio vėjo greitis didėja. Vėjo elektrinės galia priklauso nuo jos statymo aukščio, todėl aukštis nuo žemės paviršiaus, kuriam yra pateikti Weibull'o skirstinio parametrai, gali nesutapti su statomos vėjo elektrinės aukščiu. Todėl reikia atlikti vėjo greičio tikimybės tankio funkcijos parametrų perskaičiavimą reikiamam aukščiui. Iš Weibull'o skirstinio žinome, kad vėjo greitis V_{i1} aukštyje h_1 pasirodo su tam tikra tikimybe p_i , tai aukštyje h_2 su ta pačia tikimybe p_i vėjo greitį V_{i2} galima perskaičiuoti pagal formulę [8]:

$$V_{i2} = V_{i1} \cdot \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\beta \quad (10)$$

Koeficientas β priklauso nuo žemės paviršiaus šiurkštumo arba nuo aukščio, kuriame teorinis vėjo greitis lygus nuliui. Koeficiento reikšmės randamos iš aštuntos lentelės [10].

8 lentelė. Paviršiaus šiurkštumo klasifikacija

<i>Paviršiaus tipas</i>	<i>Paviršiaus šiurkštumo klasė</i>	<i>Paviršiaus nulinis lygis</i>	<i>β</i>
Vandens paviršius	0	0,0002	0,01
Visiškai atvira vietovė su lygiu paviršiumi	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

Pagrindinis šio metodo trūkumas tas, kad šiurkštumas neįvertinamas pagal vėjo kryptį, nes skirtingomis kryptimis šiurkštumas gali būti labai mažas arba labai didelis, kur vėjo pasirodymo tikimybė yra didžiausia.

Dėl žemės paviršiaus šiurkštumo 5–10 m aukštyje vėjo greitis yra pakankamai mažas, nepastovus ir didelio turbulentiškumo. Pasirinkus vietovės šiurkštumo klasę, bei statomos vėjo elektrinės aukštį, įmanoma maksimaliai priartėti prie realių vidutinio metinio vėjo greičio reikšmių.

3.5. Vėjo elektrinių generuojamos galios skaičiavimas

Weibull'o parametrai skaičiuojami vietovėms pagal vėjo greičių kitimo pasiskirstymą atlikus vėjo matavimus toje vietovėje. Pagal surinktus duomenis sudaromi metiniai vėjo greičių pasiskirstymo grafikai.

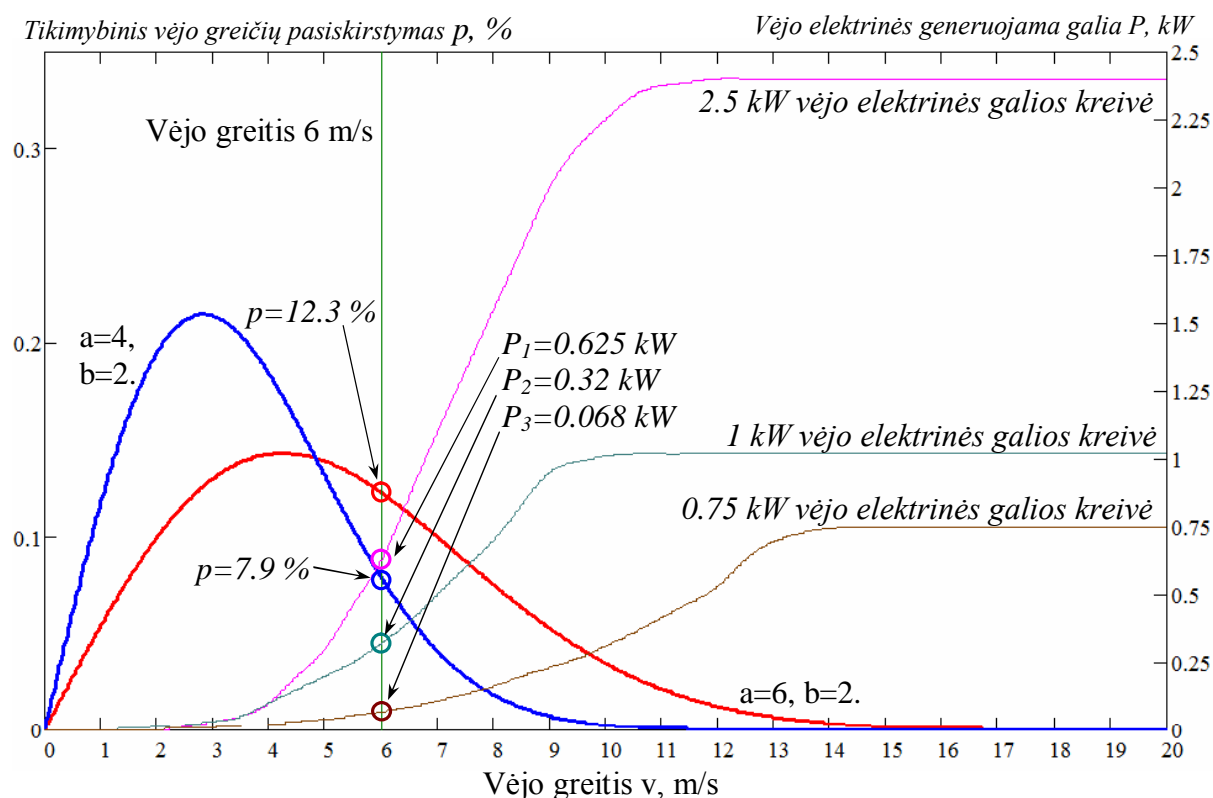
Elektrinių pagaminamos elektros energijos kiekis skaičiuojamas pagal formulę [9]:

$$W = H_i \cdot P_i \quad (11)$$

čia: H_i – valandų pasiskirstymas pagal vėjo greitį;

P_i – vėjo elektrinės galios pagal galios kreivę;

Susumavus visus energijos kiekius W_i , gaunamas tikėtinas vėjo elektrinės pagaminamos elektros energijos kiekis per metus. Likusioms vėjo elektrinėms skaičiavimai atliekami pagal šį principą.



21 pav. Vėjo elektrinių galių kreivės ir vėjo greičių tikimybinis pasiskirstymas

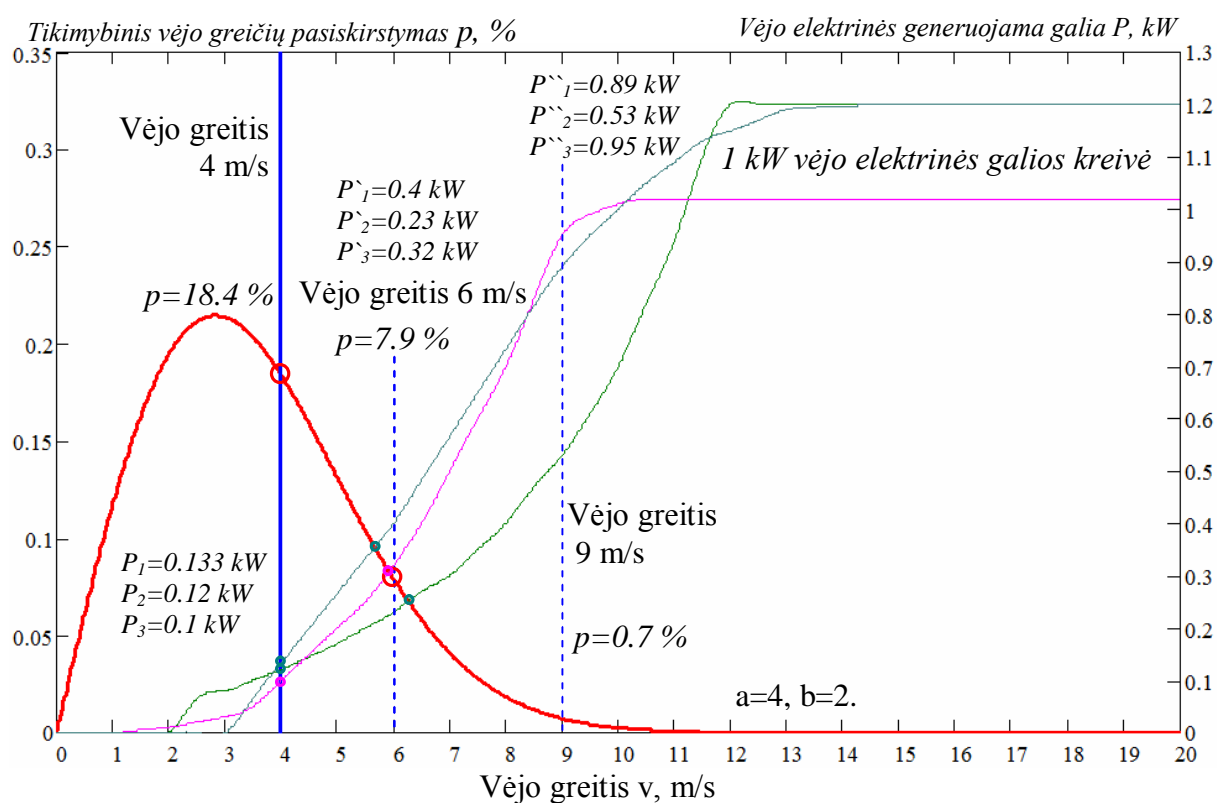
Kiekvienoje galingumo klasėje gaminama labai daug panašios galios ir įvairių tipų vėjo elektrinių. Kiekviena skiriasi techniniais rodikliais. Dalis elektrinių projektuojamos mažesniems vidutiniams vėjo greičiams, dalis didesniems. 21 paveiksle pateiktos trijų klasių (iki 1 kW (750 W), 1 kW ir 2.5 kW) vėjo elektrinių galių kreivės skirtingoms vietovėms. Turint vėjo elektrinių galių kreives ir pasirinktų vietovių tikimybinis metinius vėjo greičių pasiskirstymus, nustatoma optimaliausia vėjo elektrinė. Svarbu elektrines suskirstyti pagal galingumus ir kiekvienoje grupėje išanalizuoti skirtingų rotorijų tipų elektrinės.

3.6. Vėjo elektrinių galios charakteristikų vertinimas

Lietuvos teritorijoje vidutinis vėjo greitis pakankamai mažas, vos 3-4,5 m/s, todėl tikslinga statyti tik nedidelės galios vėjo elektrines. Vėjo elektrinių galimybes charakterizuoja jų galios kreivės, parodančios gaunamą elektrinės galią priklausomai nuo vėjo greičio.

Vertinant elektrinių galios charakteristikas, analizuojamas pradinis vėjo greitis kai elektrinė sukuria tinkamą vartoti galią, nes dažniausiai jos pradeda veikti tik 4 m/s. Mažų vidutinių metinių vėjo greičių vietovėse turėtų būti įrengtos vėjo elektrines, kurių pradinis vėjo greitis mažesnis už vidutinį metinį vėjo greitį, nes priešingu atveju elektrinė retai dirbtų.

Galios kreivėse svarbu analizuoti ir vėjo greitį, kuriam esant elektrinė pasiekia vardinę galią. Šis vėjo greitis turėtų būti kuo mažesnis.



22 pav. 1 kW vėjo elektrinių galių kreivės ir galių vertės skirtingiems vėjo greičiams

Kiekvienos vėjo elektrinės galios kreivė skirtinga ir generuojama galia skirtingiems vėjo greičiui skiriasi (22 pav.). Vietovėse su vyraujančiais mažais vėjo greičiais svarbu išanalizuoti galios generavimą mažų vėjo greičių intervale, nes šiame intervale vėjo galia nors ir yra nedidelė, tačiau šių vėjo greičių pasirodymo tikimybė yra didelė, todėl renkant vėjo elektrinę svarbu, kad ne tik įsijungimo greitis būtų kuo mažesnis, bet ir generuojamos galios kilimas būtų spartesnis. Kaip parodyta 22 paveiksle 2-ios vėjo elektrinės generuojama galia esant 3 m/s vėjo greičiui didžiausia, o esant 9 m/s vėjo greičiui - mažiausia. Tačiau didesnių vėjo greičių pasirodymo tikimybė yra labai maža - 9 m/s pasirodymo tikimybė yra tik 0.7 %.

VI. Tyrimo rezultatų aprašymo dalis

4.1. Vietovių vėjo greičių išteklių įvertinimas

Pasirinktoje vietovėje vėjo greičio ir krypties skaičiavimams didelę įtaką turi įvairaus aukščio gyvenamieji pastatai, be to pačios miesto zonos yra labai skirtingos. Miesto parkai ir krašto rajonai gali turėti stiprius vėjo greičius ir žemą turbulentiškumą: šiose vietose, tos pačios turbinos, kurios yra naudojamos pavienėse gyvenvietėse gali puikiai veikti. Tačiau kitose miesto zonose, kur yra daug pastatų, vidutiniai vėjo greičiai yra žemesni. Norint optimaliai išnaudoti vėjo energetinius resursus, svarbu tinkamai pasirinkti vėjo elektrinės modelį, galią, pastatymo vietą ir aukštį, išanalizuoti turbinos parametrus, atlikti generuojamos galios skaičiavimus, kurie apspręstų pasirinkto modelio tinkamumą.

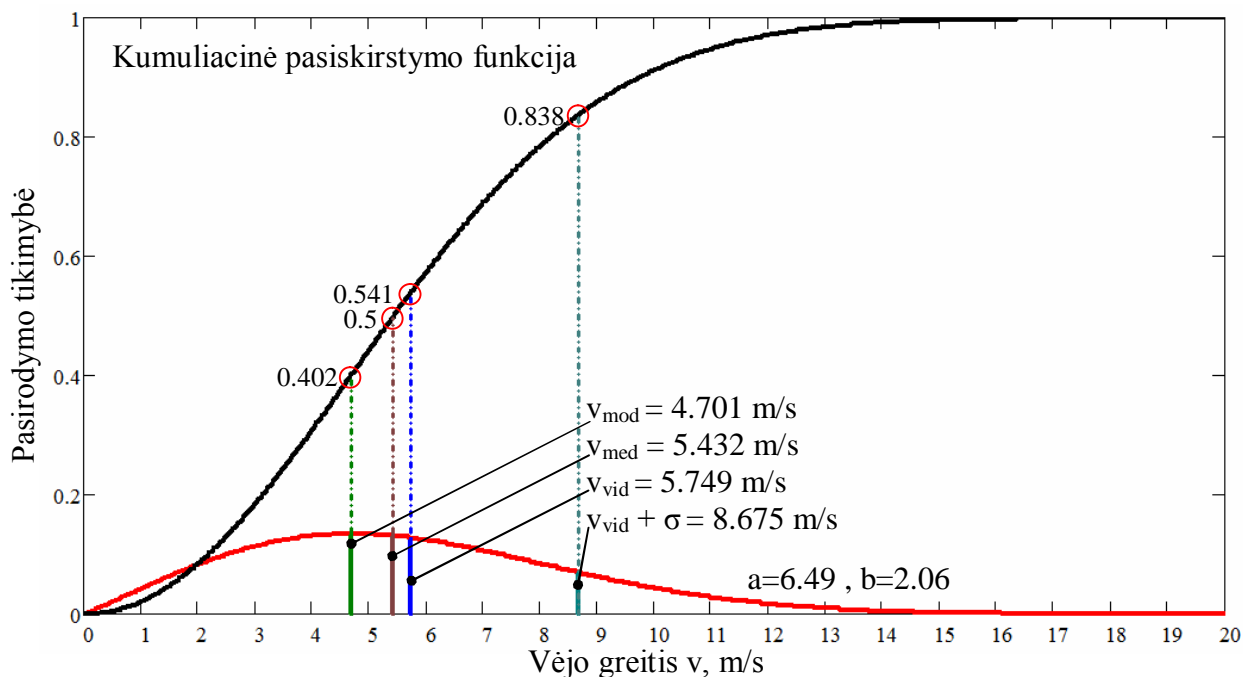
Vėjo elektrinių turbinos pradeda dirbti esant tam tikram vėjo greičiui, jei vėjo greitis bus žemesnis negu rotoriaus suveikimo greitis, tai turbina nesisuks, todėl labai svarbu parinkti atitinkamą rotorių, kad būtų įmanomas energijos gavimas net labai žemais vėjo greičiais. Turbulentiškumas yra kita svarbi problema. Horizontalios ašies vėjo elektrinės turbulentinėmis sąlygomis dirba prastai, tuo metu vertikalios ašies vėjo elektrinės turbulentinėmis sąlygomis veikia pakankamai efektyviai ir vėjo krypties kitimas nesukelia papildomų problemų. Turint vietovės vėjo greičio parametrus ir vėjo elektrinių galios kreives, nesunku prognozuoti pagaminamos energijos kiekį.

Pirminiam mažos galios vėjo elektrinių įvertinimui atlikti pasirinktų vietovių išteklių įvertinimas žinant jų Weibull'o skirstinių parametrus 10 m aukštyje.

Tikslesniam vėjo elektrinės generuojamos galios skaičiavimui reikalinga nustatyti Weibull'o skirstinio parametrus kiekvienam mėnesiui dėl tikslesnių tikėtinų pagaminamos elektros energijos kiekių. 2009 m. Šiauliuose buvo atlikti vėjo greičio ir krypties matavimai. Pagal gautus matavimo duomenis reikalinga apskaičiuoti atitinkančio statistinio skirstinio parametrus. Atlikti tyrimai rodo, kad miestų vėjo energijos išteklių pasiskirstymas išanalizuotas nepakankamai ir mažos galios vėjo elektrinių statytojams nepakanka informacijos norint suplanuoti būsimas statymo vietas. Norint apskaičiuoti pasirinktos vėjo elektrinės tikėtinąjį metinį energetinį produktyvumą, reikia turėti pasirinktos vietovės Weibull'o skirstinio parametrus ir pasirinktos vėjo elektrinės galios kreivę. Weibull'o parametrų vertės priklauso nuo vietovės geografinės padėties, žemės paviršiaus šiurkštumo toje vietovėje ir nuo aukščio virš žemės paviršiaus. Analizuojant gautus duomenis buvo sudaromi atskiri kiekvieno mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikai, taip pat ir bendras metinis vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas. Vykdam apsimacijas pagal Weibull'o skirstinį buvo gauti šio skirstinio parametrai a ir b .

4.1.1. Nidos vėjo greičių išteklių įvertinimas

Nidos vėjo greičių skaičiavimai pateikti 23 paveiksle ir 9 lentelėje.



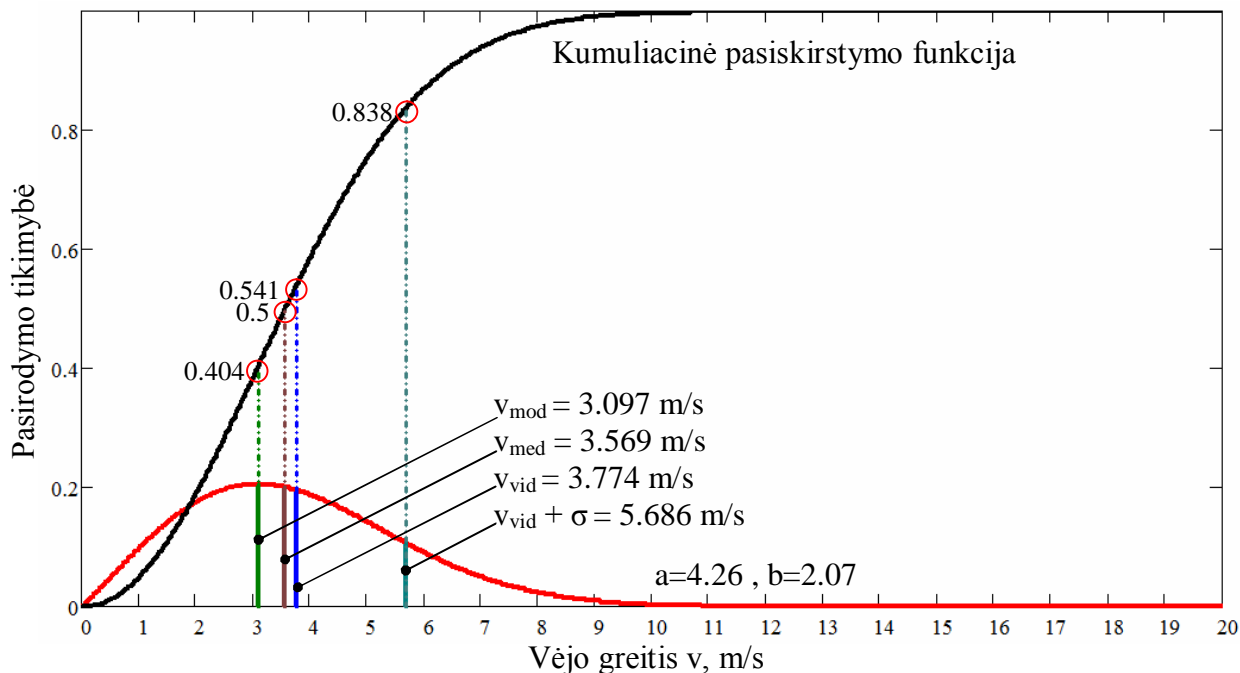
23 pav. Nidos vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija

9 lentelė. Nidos miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis

Vėjo greitis, m/s	Tikimybinis vėjo greičių pasiskirstymas, %	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{mod} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{vid} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki $V_{vid} + \sigma$, H/m
0	0	0	0	0	0
1	4.28	375	375	375	375
2	8.34	731	731	731	731
3	11.42	1001	1001	1001	1001
4	13.14	1151	1151	1151	1151
5	13.42	1176	-	1176	1176
6	12.47	1093	-	-	1093
7	10.69	936	-	-	936
8	8.51	745	-	-	745
9	6.32	553	-	-	-
10	4.39	385	-	-	-
11	2.86	251	-	-	-
12	1.75	154	-	-	-
13	1.01	89	-	-	-
14	0.55	48	-	-	-
15	0.28	25	-	-	-
16	0.14	12	-	-	-
17	0.06	5	-	-	-
18	0.03	2	-	-	-
19	0.01	1	-	-	-
20	0	0	-	-	-
Suma:	99.67	8733	3257	4433	7207
Valandinis pasiskirstymas, %		100.00	37.30	50.76	82.53

4.1.2. Kauno vėjo greičių išteklių įvertinimas

Kauno vėjo greičių skaičiavimai pateikti 24 paveiksle ir 10 lentelėje.



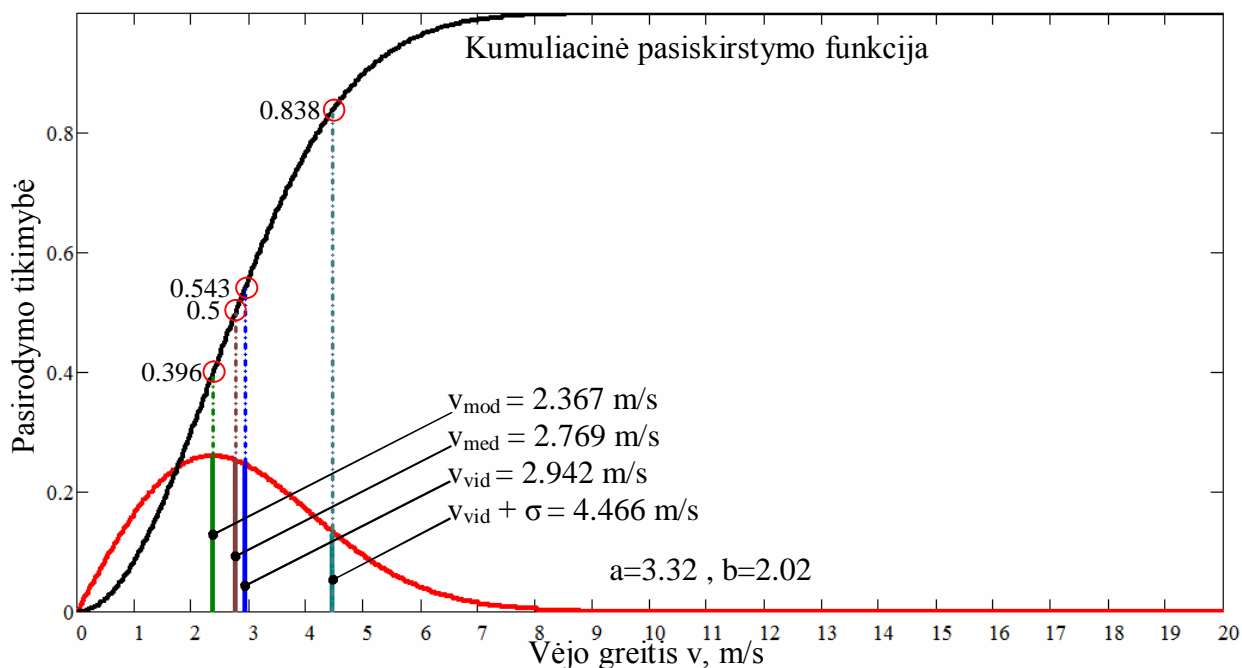
24 pav. Kauno vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija

10 lentelė. Kauno miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis

Vėjo greitis, m/s	Tikimybinis vėjo greičių pasiskirstymas, %	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{mod} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{vid} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki $V_{vid} + \sigma$, H/m
0	0	0	0	0	0
1	9.81	859	859	859	859
2	17.56	1538	1538	1538	1538
3	20.58	1803	1803	1803	1803
4	18.88	1654	-	-	1654
5	14.32	1254	-	-	1254
6	9.19	805	-	-	-
7	5.05	442	-	-	-
8	2.39	210	-	-	-
9	0.98	86	-	-	-
10	0.35	31	-	-	-
11	0.11	9	-	-	-
12	0.03	3	-	-	-
13	0.01	1	-	-	-
14	0	0	-	-	-
15	0	0	-	-	-
16	0	0	-	-	-
17	0	0	-	-	-
18	0	0	-	-	-
19	0	0	-	-	-
20	0	0	-	-	-
Suma:	99.26	8695	4200	4200	7108
Valandinis pasiskirstymas, %		100.00	48.30	48.30	81.75

4.1.3. Utenos vėjo greičių išteklių įvertinimas

Utenos vėjo greičių skaičiavimai pateikti 25 paveiksle ir 11 lentelėje.



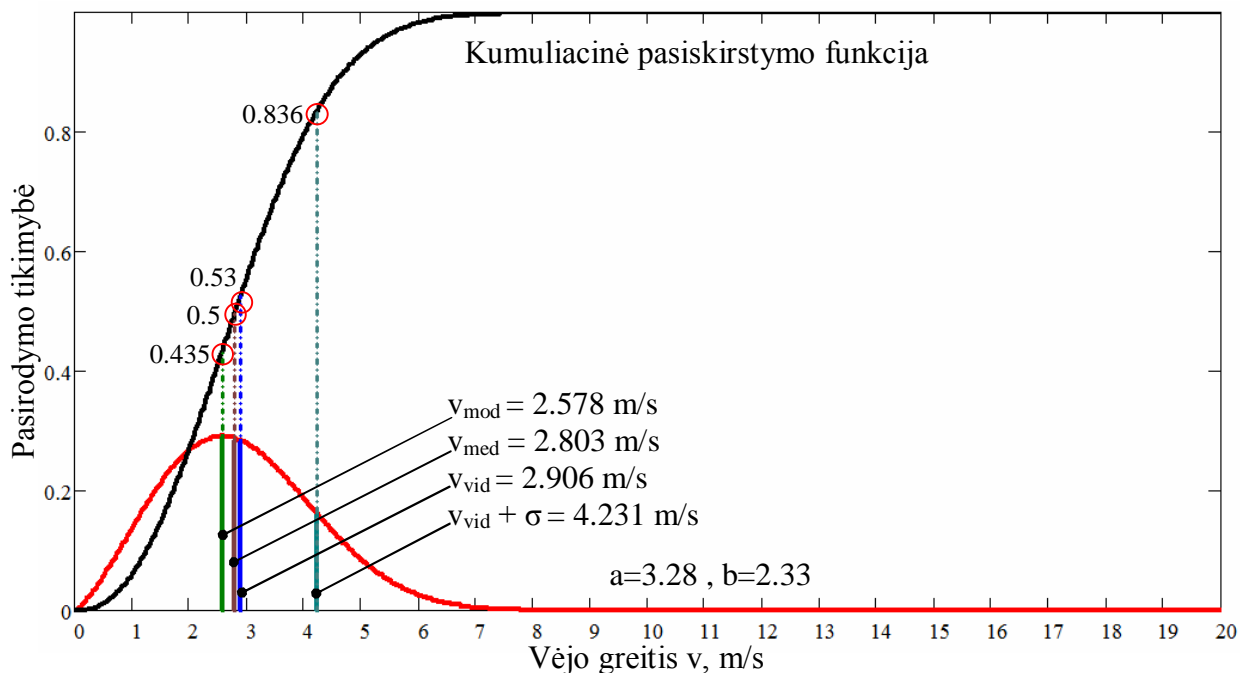
25 pav. Utenos vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija

11 lentelė. Utenos miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis

Vėjo greitis, m/s	Tikimybinis vėjo greičių pasiskirstymas, %	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{mod} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{vid} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki $V_{vid} + \sigma$, H/m
0	0	0	0	0	0
1	16.38	1434	1434	1434	1434
2	25.33	2219	2219	2219	2219
3	24.29	2128	-	-	2128
4	17.14	1501	-	-	1501
5	9.39	822	-	-	-
6	4.08	358	-	-	-
7	1.43	125	-	-	-
8	0.4	35	-	-	-
9	0.09	8	-	-	-
10	0.02	2	-	-	-
11	0	0	-	-	-
12	0	0	-	-	-
13	0	0	-	-	-
14	0	0	-	-	-
15	0	0	-	-	-
16	0	0	-	-	-
17	0	0	-	-	-
18	0	0	-	-	-
19	0	0	-	-	-
20	0	0	-	-	-
Suma:	98.55	8632	3653	3653	7282
Valandinis pasiskirstymas, %		100.00	42.32	42.32	84.36

4.1.4. Telšių vėjo greičių išteklių įvertinimas

Telšių vėjo greičių skaičiavimai pateikti 26 paveiksle ir 12 lentelėje.



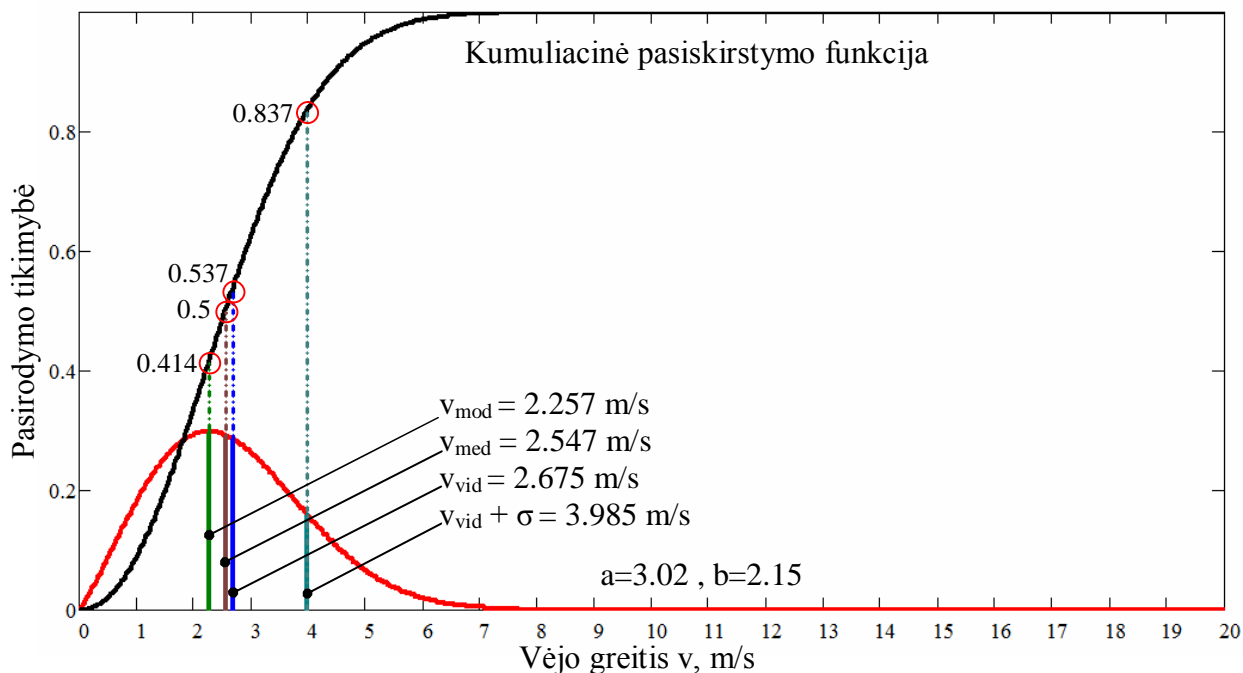
26 pav. Telšių vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija

12 lentelė. Telšių miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis

Vėjo greitis, m/s	Tikimybinis vėjo greičių pasiskirstymas, %	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{mod} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{vid} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki $V_{vid} + \sigma$, H/m
0	0	0	0	0	0
1	13.74	1204	1204	1204	1204
2	26.83	2350	2350	2350	2350
3	28	2453	-	-	2453
4	18.9	1656	-	-	1656
5	8.61	755	-	-	-
6	2.67	234	-	-	-
7	0.56	49	-	-	-
8	0.08	7	-	-	-
9	0.01	1	-	-	-
10	0	0	-	-	-
11	0	0	-	-	-
12	0	0	-	-	-
13	0	0	-	-	-
14	0	0	-	-	-
15	0	0	-	-	-
16	0	0	-	-	-
17	0	0	-	-	-
18	0	0	-	-	-
19	0	0	-	-	-
20	0	0	-	-	-
Suma:	99.4	8709	3554	3554	7663
Valandinis pasiskirstymas, %		100.00	40.81	40.81	87.99

4.1.5. Tauragės vėjo greičių išteklių įvertinimas

Tauragės vėjo greičių skaičiavimai pateikti 27 paveiksle ir 13 lentelėje.



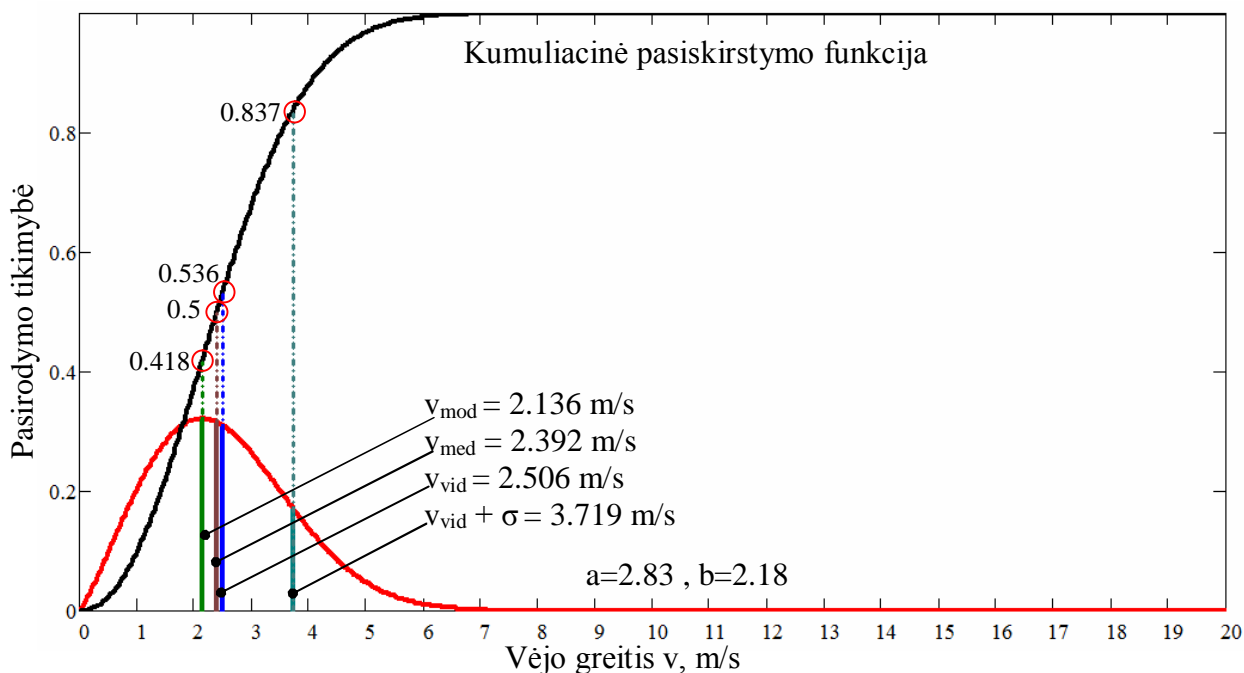
27 pav. Tauragės vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija

13 lentelė. Tauragės miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis

Vėjo greitis, m/s	Tikimybinis vėjo greičių pasiskirstymas, %	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{mod} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{vid} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki $V_{vid} + \sigma$, H/m
0	0	0	0	0	0
1	18.2	1594	1594	1594	1594
2	29.35	2571	2571	2571	2571
3	26.36	2309	-	-	2309
4	15.78	1382	-	-	-
5	6.61	579	-	-	-
6	1.97	173	-	-	-
7	0.42	37	-	-	-
8	0.06	6	-	-	-
9	0.01	1	-	-	-
10	0	0	-	-	-
11	0	0	-	-	-
12	0	0	-	-	-
13	0	0	-	-	-
14	0	0	-	-	-
15	0	0	-	-	-
16	0	0	-	-	-
17	0	0	-	-	-
18	0	0	-	-	-
19	0	0	-	-	-
20	0	0	-	-	-
Suma:	98.76	8652	4165	4165	6474
Valandinis pasiskirstymas, %		100.00	48.14	48.14	74.83

4.1.6. Varėnos vėjo greičių išteklių įvertinimas

Varėnos vėjo greičių skaičiavimai pateikti 28 paveiksle ir 14 lentelėje.



28 pav. Varėnos vėjo greičio pasiskirstymo funkcija ir kumuliacinė pasiskirstymo funkcija

14 lentelė. Varėnos miesto skaičiavimų rezultatai: vėjo greičių pasiskirstymai valandomis

Vėjo greitis, m/s	Tikimybinis vėjo greičių pasiskirstymas, %	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{mod} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{vid} , H/m	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki $V_{vid} + \sigma$, H/m
0	0	0	0	0	0
1	20.35	1783	1783	1783	1783
2	31.99	2802	2802	2802	2802
3	26.51	2322	-	-	2322
4	13.82	1211	-	-	-
5	4.75	416	-	-	-
6	1.09	95	-	-	-
7	0.17	15	-	-	-
8	0.02	2	-	-	-
9	0	0	-	-	-
10	0	0	-	-	-
11	0	0	-	-	-
12	0	0	-	-	-
13	0	0	-	-	-
14	0	0	-	-	-
15	0	0	-	-	-
16	0	0	-	-	-
17	0	0	-	-	-
18	0	0	-	-	-
19	0	0	-	-	-
20	0	0	-	-	-
Suma:	98.7	8646	4585	4585	6907
Valandinis pasiskirstymas, %		100.00	53.03	53.03	79.89

4.1.7. Vėjo greičių išteklių palyginimas

Pasirinktų vietovių atitinkamų vėjo greičių verčių rezultatai pateikti 15 lentelėje.

15 lentelė. Pasirinktų vietovių skaičiavimo rezultatai

Vietovė	v_{mod} , m/s	v_{vid} , m/s	$v_{vid} + \sigma$, m/s
Nida	4,701	5,749	8,675
<i>Valandinis pasiskirstymas, %</i>	<i>37.30</i>	<i>50.76</i>	<i>82.53</i>
Kaunas	3,097	3,774	5,686
<i>Valandinis pasiskirstymas, %</i>	<i>48.30</i>	<i>48.30</i>	<i>81.75</i>
Utena	2,367	2,942	4,466
<i>Valandinis pasiskirstymas, %</i>	<i>48.30</i>	<i>48.30</i>	<i>81.75</i>
Telšiai	2,578	2,906	4,231
<i>Valandinis pasiskirstymas, %</i>	<i>40.81</i>	<i>40.81</i>	<i>87.99</i>
Tauragė	2,257	2,675	3,985
<i>Valandinis pasiskirstymas, %</i>	<i>48.14</i>	<i>48.14</i>	<i>74.83</i>
Varėna	2,136	2,506	3,719
<i>Valandinis pasiskirstymas, %</i>	<i>53.03</i>	<i>53.03</i>	<i>79.89</i>

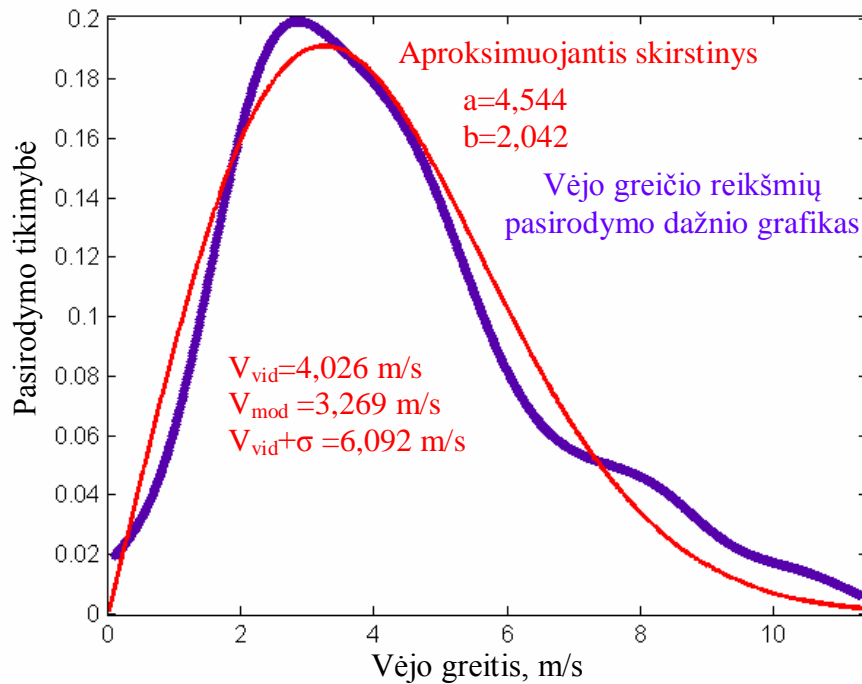
Atlikti tyrimai rodo, kad vėjo greičiai matavimo vietovėse yra pakankamai maži, todėl prieš renkant vėjo elektrinės tipą, būtina išanalizuoti jos veikimą mažų vėjo greičių vietovėje. Nidos vidutinis vėjo greitis didžiausias - 5,749 m/s, o dažniausiai pasitaikančio vėjo greičio reikmė - 4,701 m/s. Pasirinktose vietovėse vėjo greičio skaičiavimams didelę įtaką turi statiniai (gyvenamieji namai, viešosios paskirties pastatai ir kt.), žemės paviršiaus reljefas ir želdiniai (aukšta žolė, krūmai, pavieniai medžiai). Reikia įvertinti, kad atitrūkęs vėjo srautas nuo aptekamos kliūties formuoja sūkurius. Šios vėjo greičio pulsacijos neigiamai veiks vėjo elektrines bei sumažins tarnavimo laiką, turbulentinis vėjo srautas nevienodai aptekės rotorius mentes bei sumažins vėjo elektrinės pagaminamos energijos kiekį. Be to sūkuriniai vėjo gūšiai gali nepataisomai sugadinti vėjo elektrinės įrengimus.

Atsižvelgiant į sukauptus vėjo srauto tyrimo duomenis galima įvertinti energijos kiekį tenkantį rotorius mentėms, projektuojamos vėjo elektrinės darbo trukmę, pagamintos energijos kiekį, jos ekonominį pagrindimą bei atsipirkimą, o taip pat elektrinės darbo elementų tarnavimo laikotarpį.

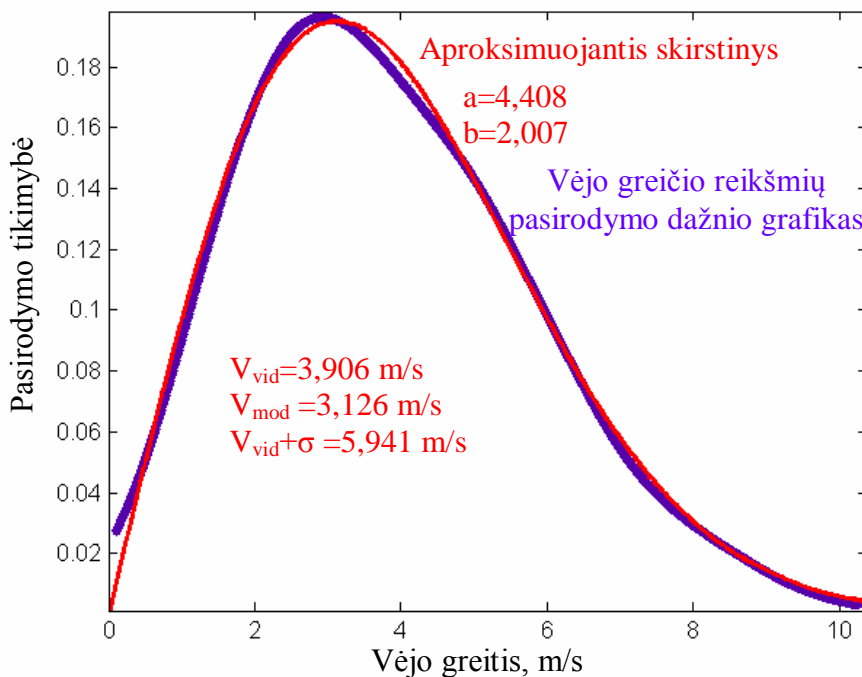
Norint dar tiksliau apskaičiuoti, kiek elektros energijos pagamintų pasirinkta vėjo elektrinė pasirinktoje vietoje, galima naudoti specialias kompiuterines programas. Viena iš geriausių programų yra WindPRO-2, kuri skirta planuoti ir projektuoti vėjo elektrines bei jų parkus [18a]. Šioje programoje skaičiavimuose įvertinamas vietovės reljefas, kliūtys vėjui įvairiomis kryptimis ir kiti faktoriai.

4.2. Šiaulių vėjo greičių išteklių įvertinimas

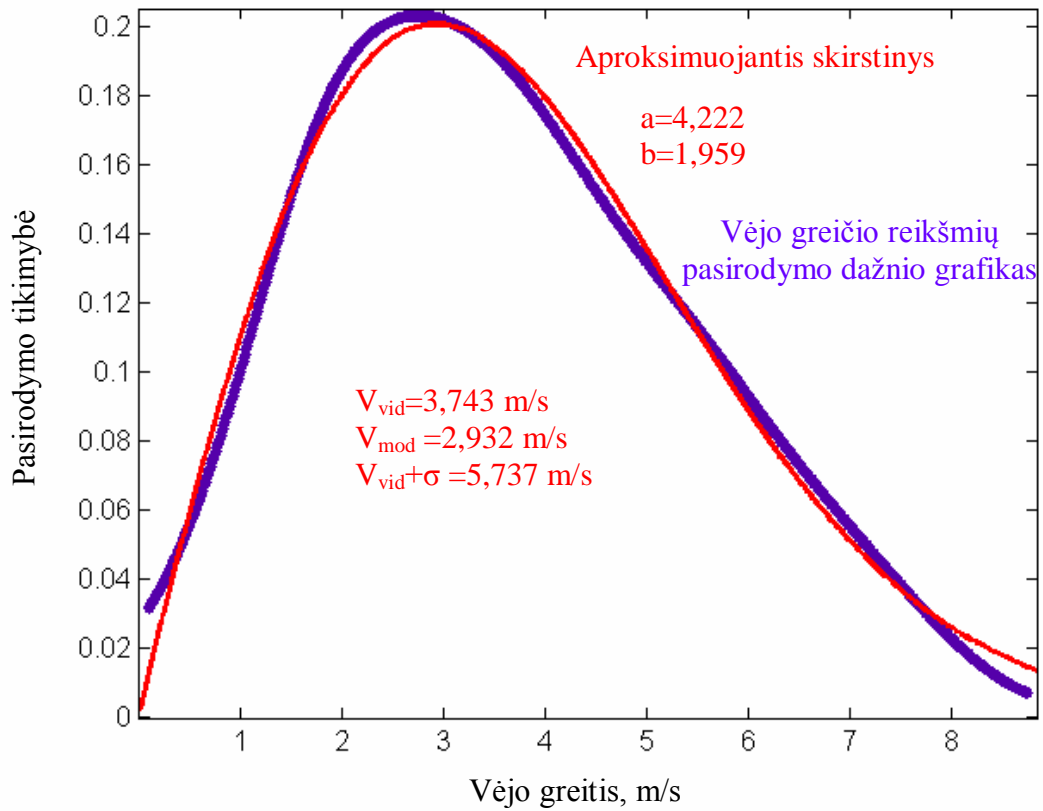
Analizuojant gautus vėjo greičių duomenis, sudaryti atskiri kiekvieno mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikai ir bendras metinis vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas. Vykdamt apksimacijas pagal Weibull'o skirstinį buvo gauti šio skirstinio parametrai. Gauti rezultatai pateikti 29 - 41 paveiksluose.



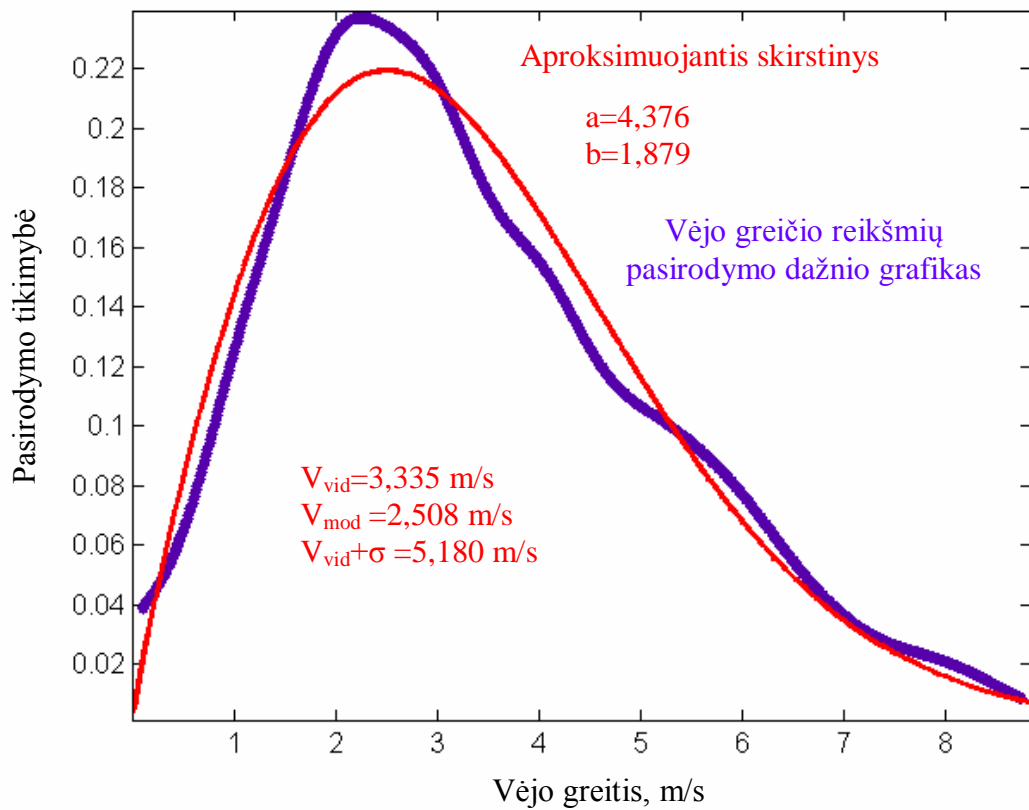
29 pav. Sausio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir apksimacija



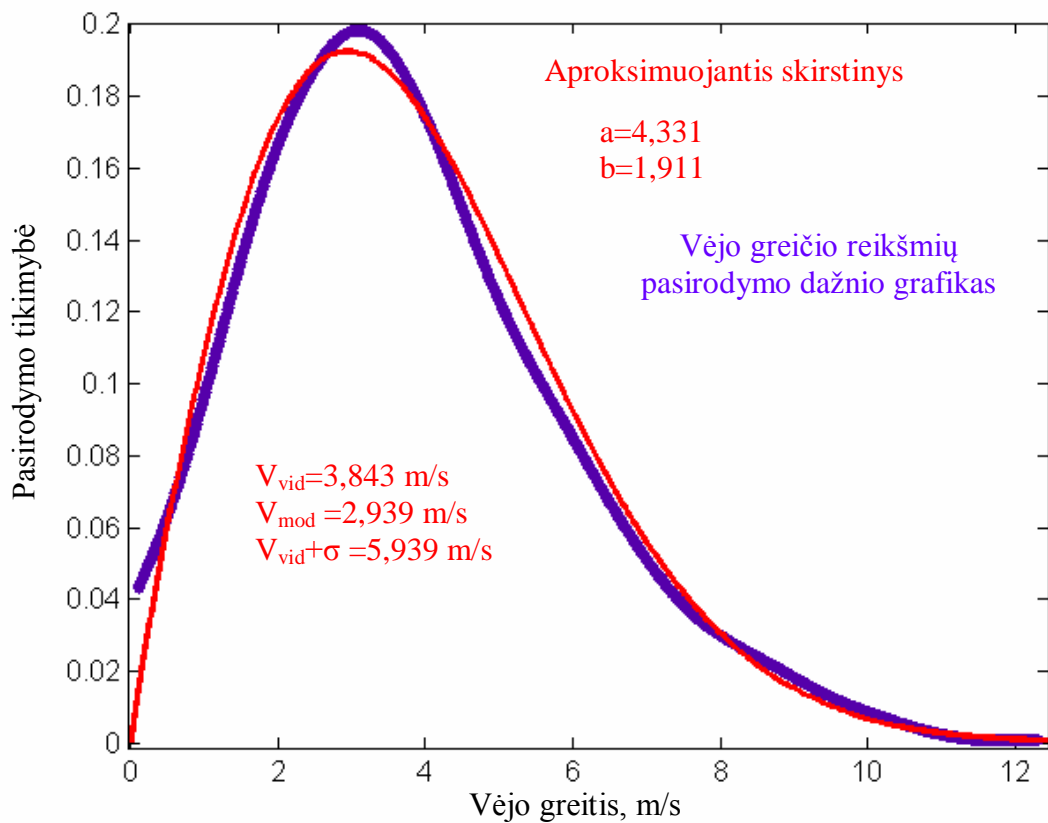
30 pav. Vasario mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir apksimacija



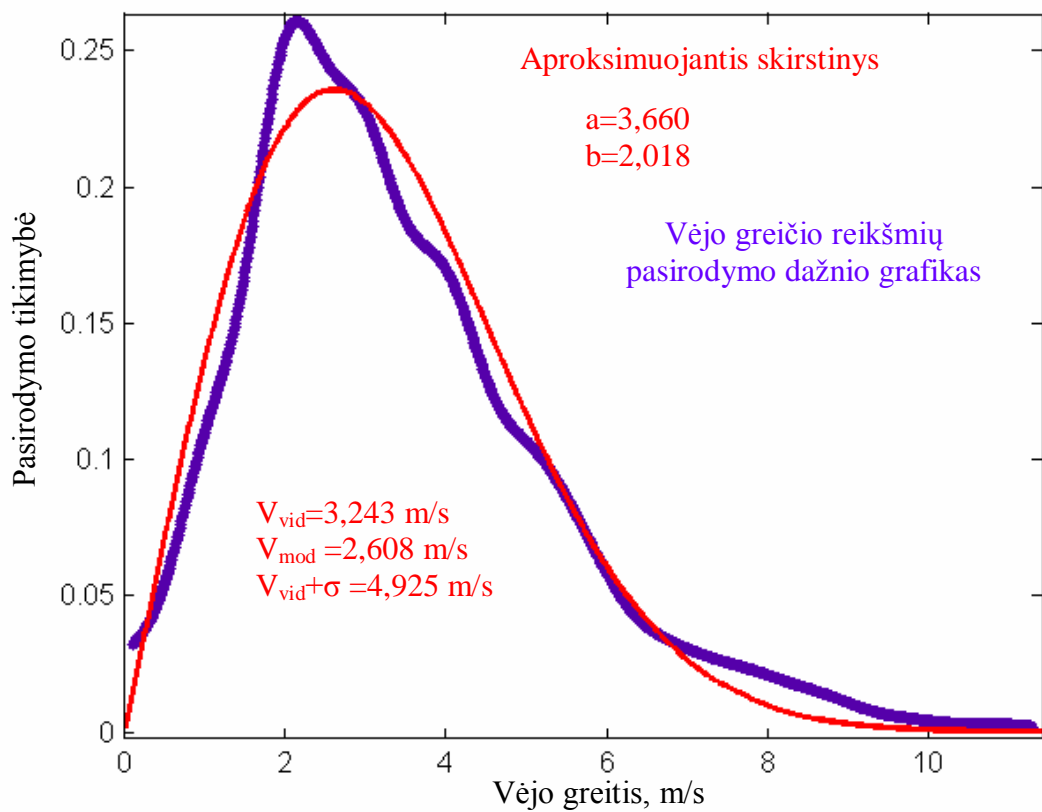
31 pav. Kovo mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



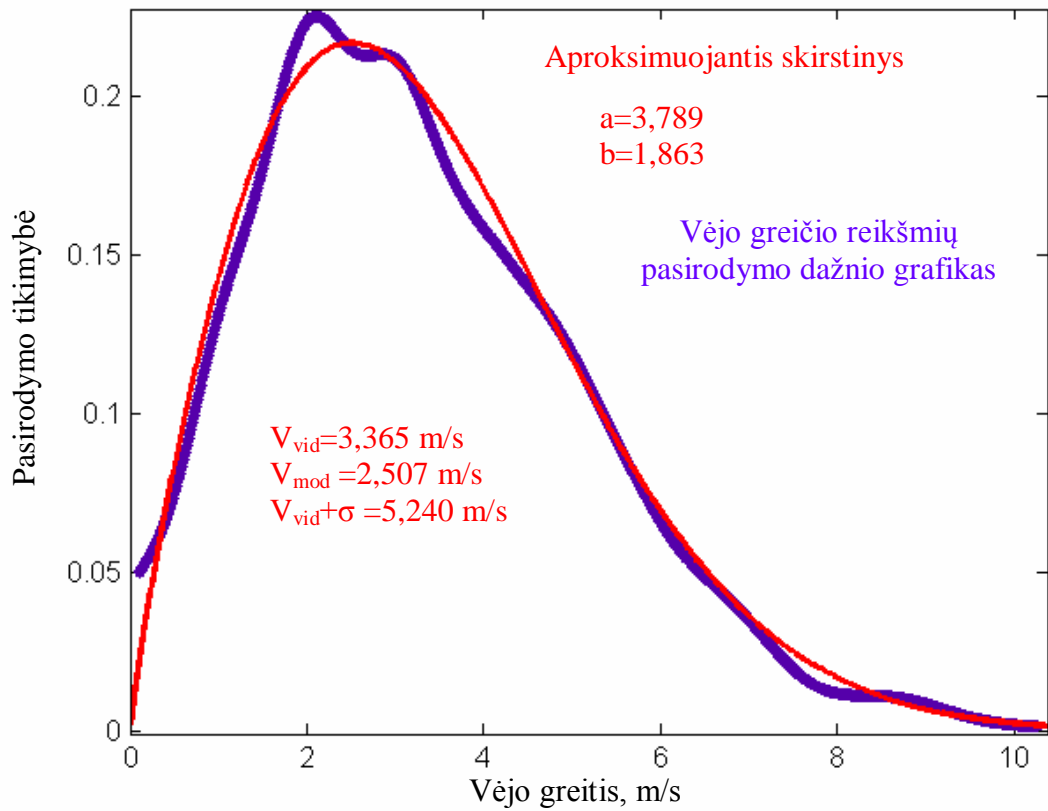
32 pav. Balandžio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



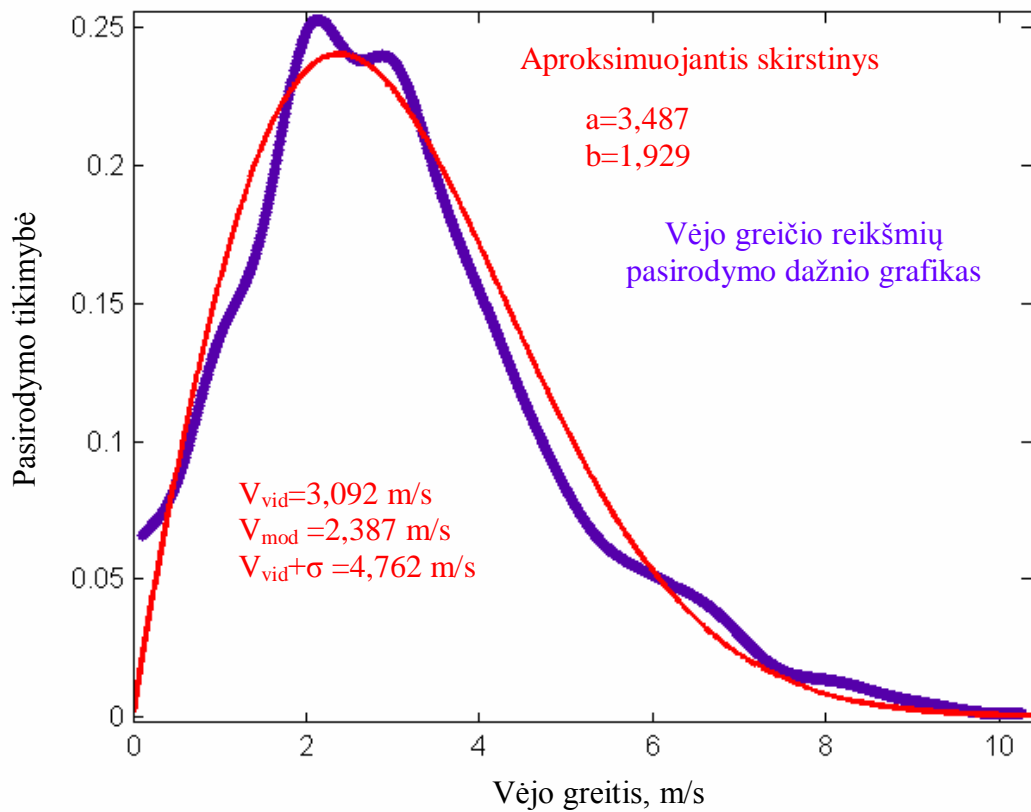
33 pav. Gegužės mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



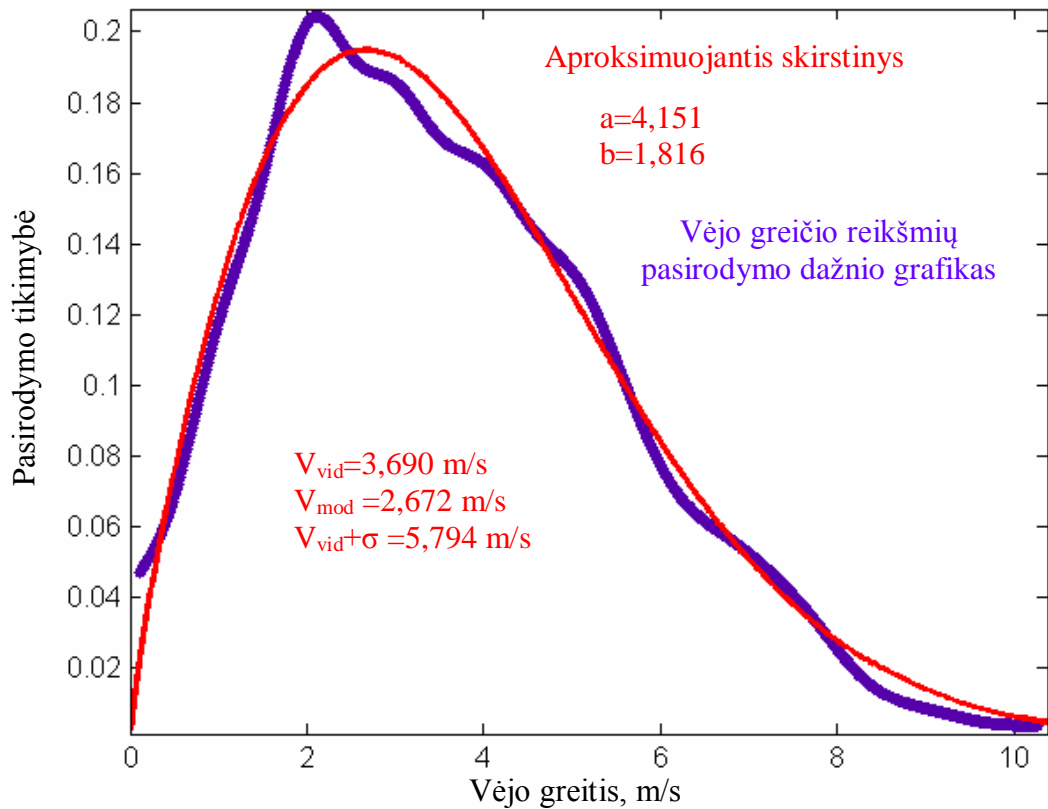
34 pav. Birželio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



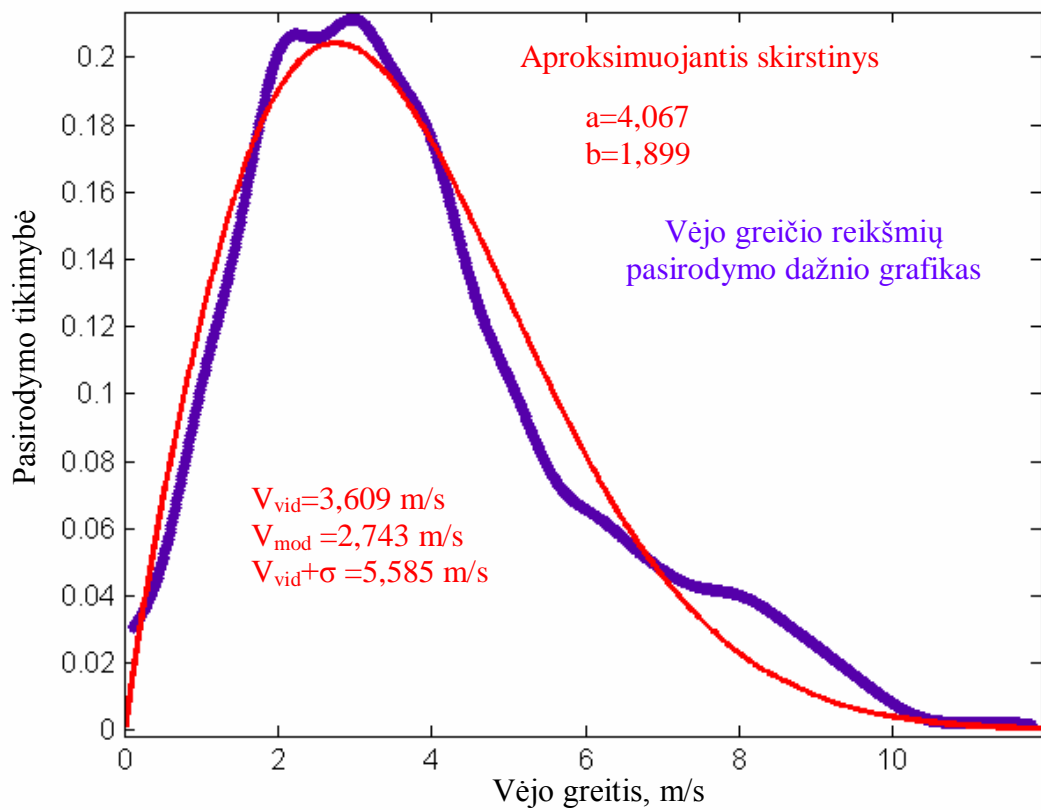
35 pav. Liepos mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



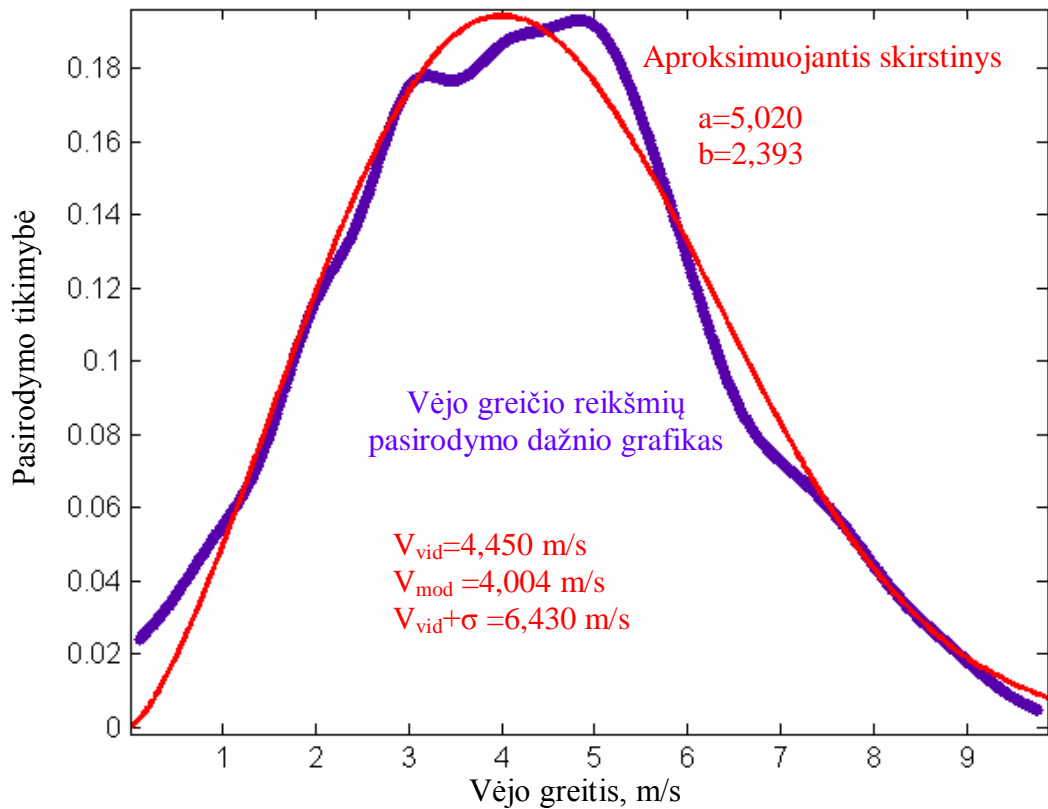
36 pav. Rugsjūčio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



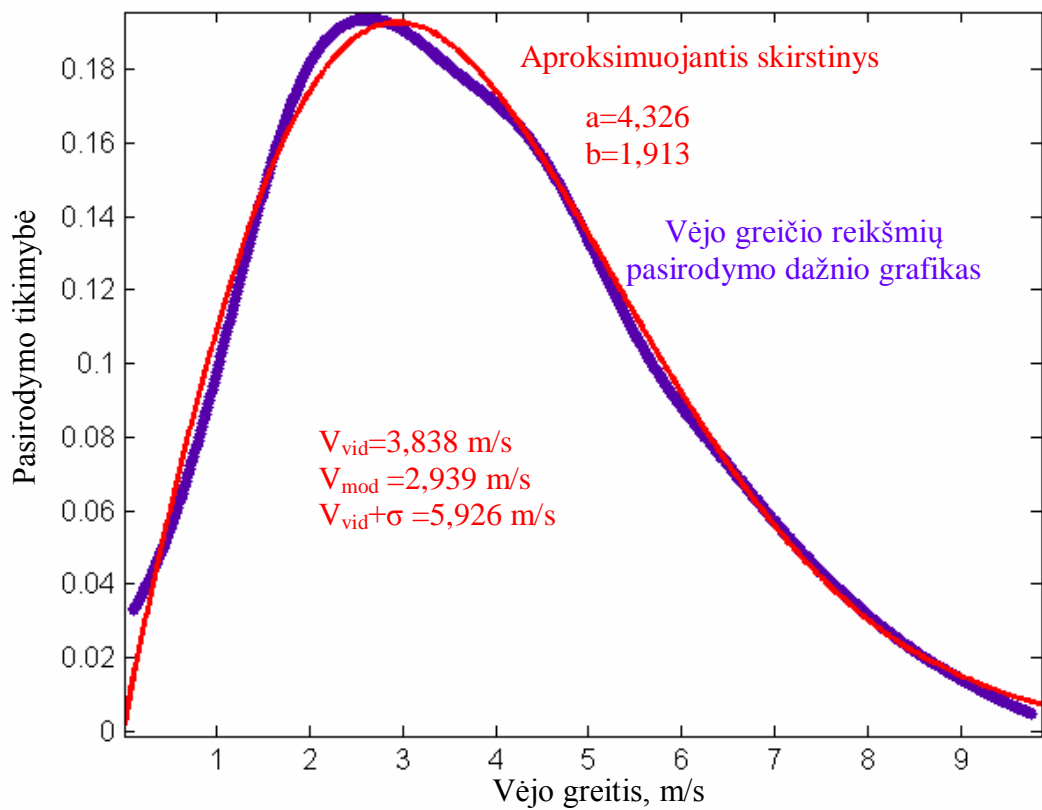
37 pav. Rugsėjo mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



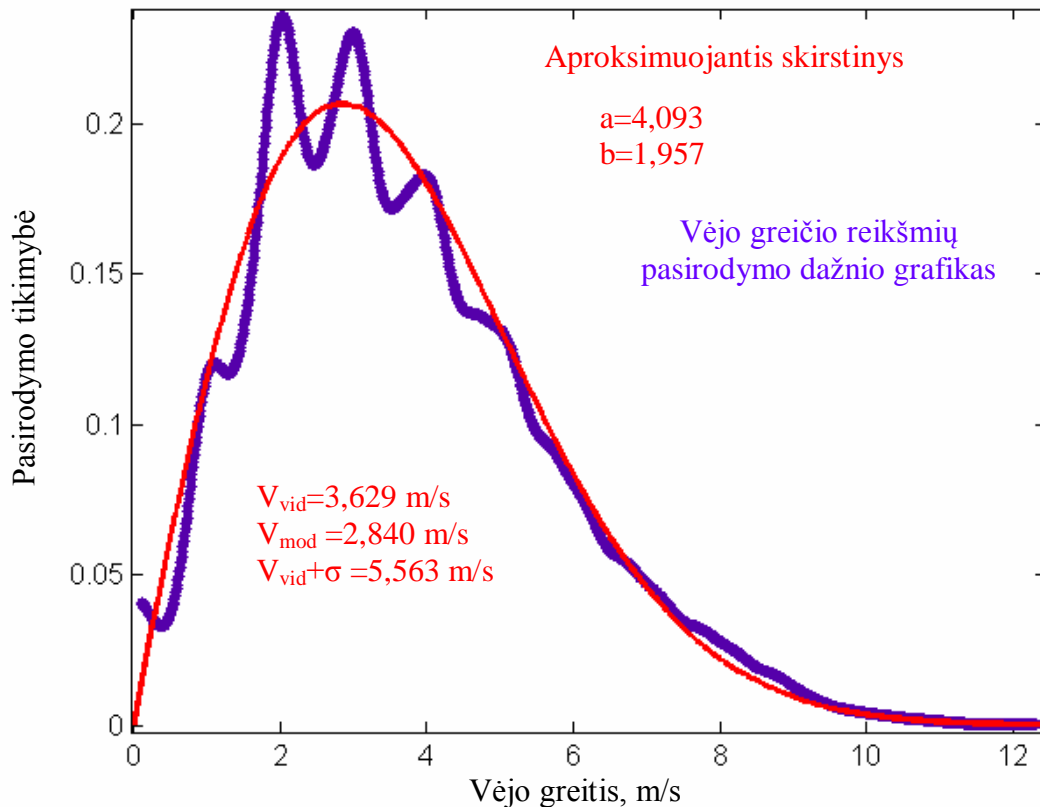
38 pav. Spalio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



39 pav. Lapkričio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija



40 pav. Gruodžio mėnesio vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija

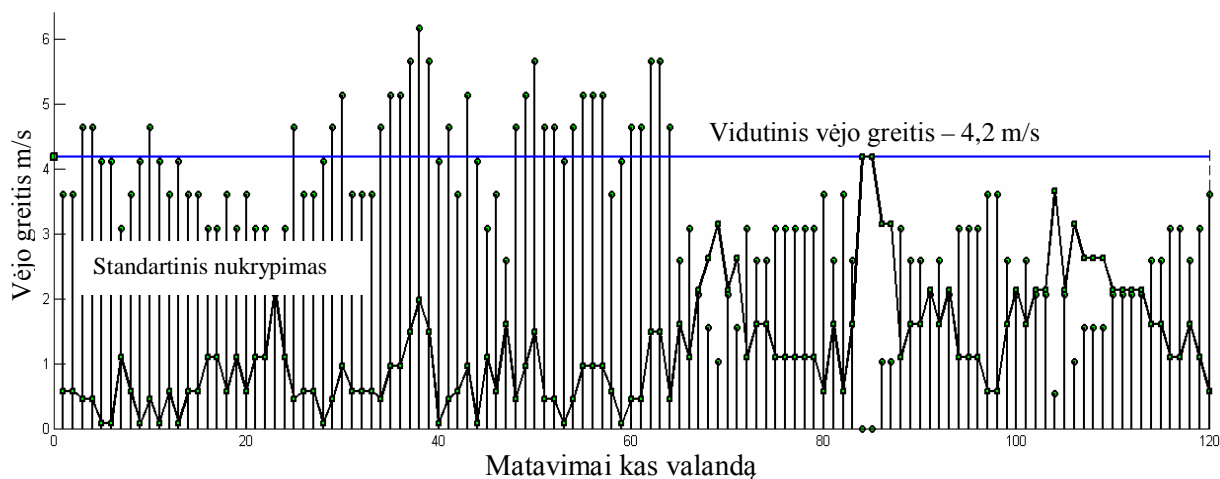


41 pav. Metinis vėjo greičio reikšmių pasirodymo dažnio grafikas ir aproksimacija

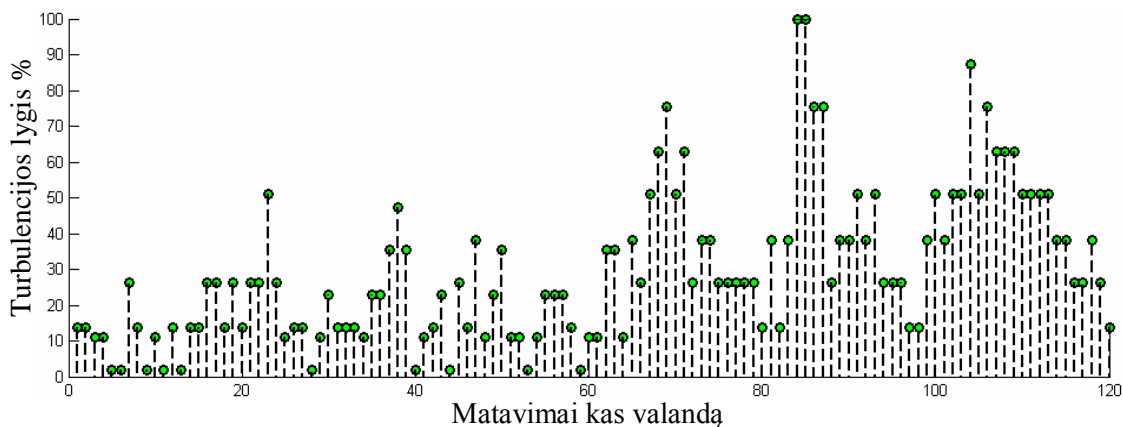
16 lentelė. Šiaulių miesto skaičiavimo rezultatai

Laikotarpis	a parametras	b parametras	V_{vid} , m/s	V_{mod} , m/s	$V_{vid} + \sigma$, m/s
Sausis	4,544	2,042	4,026	3,269	6,092
Vasaris	4,408	2,007	3,906	3,126	5,941
Kovas	4,222	1,959	3,743	2,932	5,737
Balandis	4,376	1,879	3,335	2,508	5,180
Gegužė	4,331	1,911	3,843	2,939	5,936
Birželis	3,660	2,018	3,243	2,608	4,925
Liepa	3,789	1,863	3,365	2,507	5,240
Rugpjūtis	3,487	1,929	3,092	2,387	4,762
Rugsėjis	4,151	1,816	3,690	2,672	5,794
Spalis	4,067	1,899	3,609	2,743	5,585
Lapkritis	5,020	2,393	4,450	4,004	6,430
Gruodis	4,326	1,913	3,838	2,939	5,926
Metinis	4,093	1,957	3,629	2,840	5,563

Šiaulių miesto matavimo rezultatai (16 lentelė) rodo, kad didžiausias vidutinis vėjo greitis buvo lapkričio mėnesį - 4.450 m/s, o mažiausias rugpjūčio mėnesį - 3,092 m/s. Analizuojant dažniausiai pasirodančius vėjo greičius, reikšmių dydžiai mažesni - lapkričio mėnesį - 4.004 m/s, rugpjūčio mėnesį - 2,387 m/s. Metinis vidutinis vėjo greitis - 3,629 m/s.



42 pav. Sausio mėnesio penkių parų vėjo greičiai



43 pav. Sausio mėnesio penkių parų vėjo srauto turbulencijos lygis

Mieste vėjo pulsacijos pakankamai didelės. Susidariusios pulsacijos neigiamai veikia vėjo elektrinių darbą, tačiau tai ne kliūtis vertikalios ašies vėjo elektrinėms. Analizuojant sausio mėnesio penkių parų parodymus (42 pav.) matyti, kad vidutinis vėjo greitis yra 4,2 m/s. Tuo metu užfiksuotas maksimalus vėjo greitis – 6,2 m/s. Esant didelei turbulencijai (43 pav.) kinta vėjo kinetinė energija, o tai mažina vėjo elektrinės efektyvumą.

4.3. Pirminis mažos galios vėjo elektrinių įvertinimas

Pasirenkant vėjo elektrinės tipą būtina įvertinti pagrindinius parametrus:

- elektrinės pradinį vėjo greitį, kai elektrinė sukuria tinkamą vartoti galią,
- elektrinės nominalų vėjo greitį, kai elektrinė pasiekia vardinę galią,
- elektrinės stabdymo vėjo greitį,
- elektrinės rotorius plotą,
- vėjo elektrinės galios kreivę,
- vėjo elektrinės greitaeigiškumo kreivę.

Elektrinės pradinis vėjo greitis labai svarbus, nes šiuolaikinėms elektrinėms dažniausiai pradeda veikti tik 3 – 4 m/s, kai vietovės vidutinis vėjo greitis mažesnis už 3 m/s. Mažiams greičiams vėjo galia yra nedidelė, tačiau tokių vėjo greičių pasirodymo tikimybė yra didelė, todėl pasirenkant vėjo elektrinę svarbu, kad įsijungimo greitis būtų mažesnis, tokiu atveju gaunamas papildomas elektros energijos kiekis.

Kokiam vidutiniam vėjo greičiui suprojektuota vėjo elektrinė parodo vėjo greitis, kai elektrinė pasiekia vardinę galią. Vietovėse, kur vidutiniai metiniai vėjo greičiai yra mažesni, tikslinga įrengti vėjo elektrines su labai mažais nominaliais vėjo greičiais, nes priešingu atveju elektrinė retai dirbtų visa galia.

Svarbus elektrinės stabdymo vėjo greitis, kurį viršijus elektrinė mechaniškai gadinama, todėl esant šiam greičiui elektrinės darbas stabdomas. Šiuolaikinių elektrinių stabdymo vėjo greitis yra ~ 25 m/s, tačiau kai kurių tipų mažos galios vėjo elektrinių stabdymo vėjo greitis yra 60 m/s.

Galios kreivė charakterizuoja vėjo elektrinės darbą - elektrinę galią, priklausomą nuo vėjo greičio. Galios kreivė parodo pradinį vėjo greitį, nominalų vėjo greitį ir stabdymo vėjo greitį.

Turint vėjo elektrinių galių kreives ir pasirinktų vietovių tikimybinis metinius vėjo greičių pasiskirstymus, apskaičiuojamas elektrinės elektros energijos kiekis. Optimaliam vėjo elektrinės pasirinkimui vėjo elektrinės suskirstytos pagal galingumus (1 kW, 3 kW ir 5 kW) ir kiekvienoje grupėje analizuojamos skirtingų rotorius tipų elektrinės. Vėjo elektrinė parenkama ta, kurios galios kreivė geriausiai tinka.

Pirminiam vėjo elektrinių įvertinimui pasirinktos elektrinės suskirstytos į pasirinktas grupes, išanalizuotos pagrindinės charakteristikos: pradinis vėjo greitis, nominalus vėjo greitis, stabdymo vėjo greitis, rotorius tipas ir rotorius plotas. Maksimalios ir minimalios elektrinių reikšmės pateiktos atskirai. Nubraižytos elektrinių galių kreivės. Rezultatai pateikti 17-19 lentelėse ir 44-46 paveiksluose.

4.3.1. 1 kW vėjo elektrinių įvertinimas

17 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių parametrai

Nr.	Vėjo elektrinės pavadinimas	Pradinis vėjo greitis, m/s	Nominalus vėjo greitis, m/s	Stabdymo vėjo greitis, m/s	Turbinos tipas	Elektrinės rotoriaus plotas, m ²
1	UGE 1 kW	4	12	25	H-VAVE, 5 menčių	3,60
2	MY-N-ERGY	3	9	Nėra	HAVE, 3 menčių	7,55
3	Venti 1,5	2,5	12,5	30	HAVE, 3 menčių	1,77
4	Fortis Passaat	4	16	Nėra	HAVE, 3 menčių	7,07
5	DS1500	3	12	15	VAVE, hibridinis	8,12
6	Eastwind 1 kW	3	9	50	HAVE, 3 menčių	7,07
7	STATOEOLIEN GSE 4	2	13	60	VAVE, 16 menčių	6,00
8	Siliken Wind SW 2.1	3	11	14	HAVE, 3 menčių	3,46
9	SWIFT	3,5	14	22	HAVE, 5 menčių	3,14
10	Energy Ball V200	3	19	26	HAVE, aero	3,08
11	Falcon 1,2 kW	2,7	13	50	H-VAVE, 5 menčių	3,56
12	SOMA 1000	3,5	10	50	HAVE, 2 menčių	5,73
13	Whisper 200	3,1	11,6	55	HAVE, 3 menčių	5,73
14	UGE 1K 2nd	3	12	30	VAVE, 3 menčių	3,24
15	ECO-1000W	3	10	25	HAVE, 3 menčių	6,16
16	WM-1000	3	10	25	HAVE, 3 menčių	6,16
17	Reflex 1 kW	3	9	25	HAVE, 3 menčių	7,55
18	JFVC-1000W	3	10	25	H-VAVE, 5 menčių	4,13
19	Whisper 100	3,4	12,5	55	HAVE, 3 menčių	3,46
20	Windspire EXTREME	3,8	12	71,5	VAVE, 3 menčių	4,80
21	Windspire STANDARD	3,8	10,7	47	VAVE, 3 menčių	7,32
22	AEOLUS 1 kW	4	12	20	HAVE, 3 menčių	5,70
23	WindTronics Honeywell	0,5	11,5	Nėra	HAVE, 20 menčių	2,55
24	CleanEnergy Windro H1	2	12	25	HAVE, 3 menčių	3,14
25	CleanEnergy Windro V1	2	12	25	H-VAVE	5,04
26	CleanEnergy Windro V1-T	2	12	25	H-VAVE	5,04
27	CleanEnergy Windro V3-T	2	12	25	H-VAVE	5,04
28	Ropatec Easy	3	14	Nėra	H-VAVE, 3 menčių	2,07
29	WME-1000	3	10,8	13	HAVE, 3 menčių	5,73
30	Windsid WS-4B	2	18	Nėra	VAVE, Savonius	4,00
31	Senwei Wind SW-1000	3	9	20	HAVE, 3 menčių	7,07
32	AEOLOS-V 1000W	1,5	10	Nėra	H-VAVE, 3 menčių	5,60
33	BWC XL.1	3	12	54	HAVE, 3 menčių	4,91
34	FL1KW	3	9	Nėra	HAVE, 3 menčių	7,55
35	Jetstream II SP 1000 W	3,5	8	Nėra	HAVE, 3 menčių	6,16
36	Kestrel e300i	2,5	10,5	Nėra	HAVE, 3 menčių	7,07
37	NHEOWIND 3D 50	2,5	13	30	HAVE-a, 3 menčių	8,04
38	Ropatec WRE.007	2	14	Nėra	VAVE, hibridinis	2,25
39	Raum Energy 1,5 kW	3,3	11	17	HAVE, 3 menčių	6,61
40	Talon 2	2,5	9,1	25,5	HAVE, 3 menčių	12,57

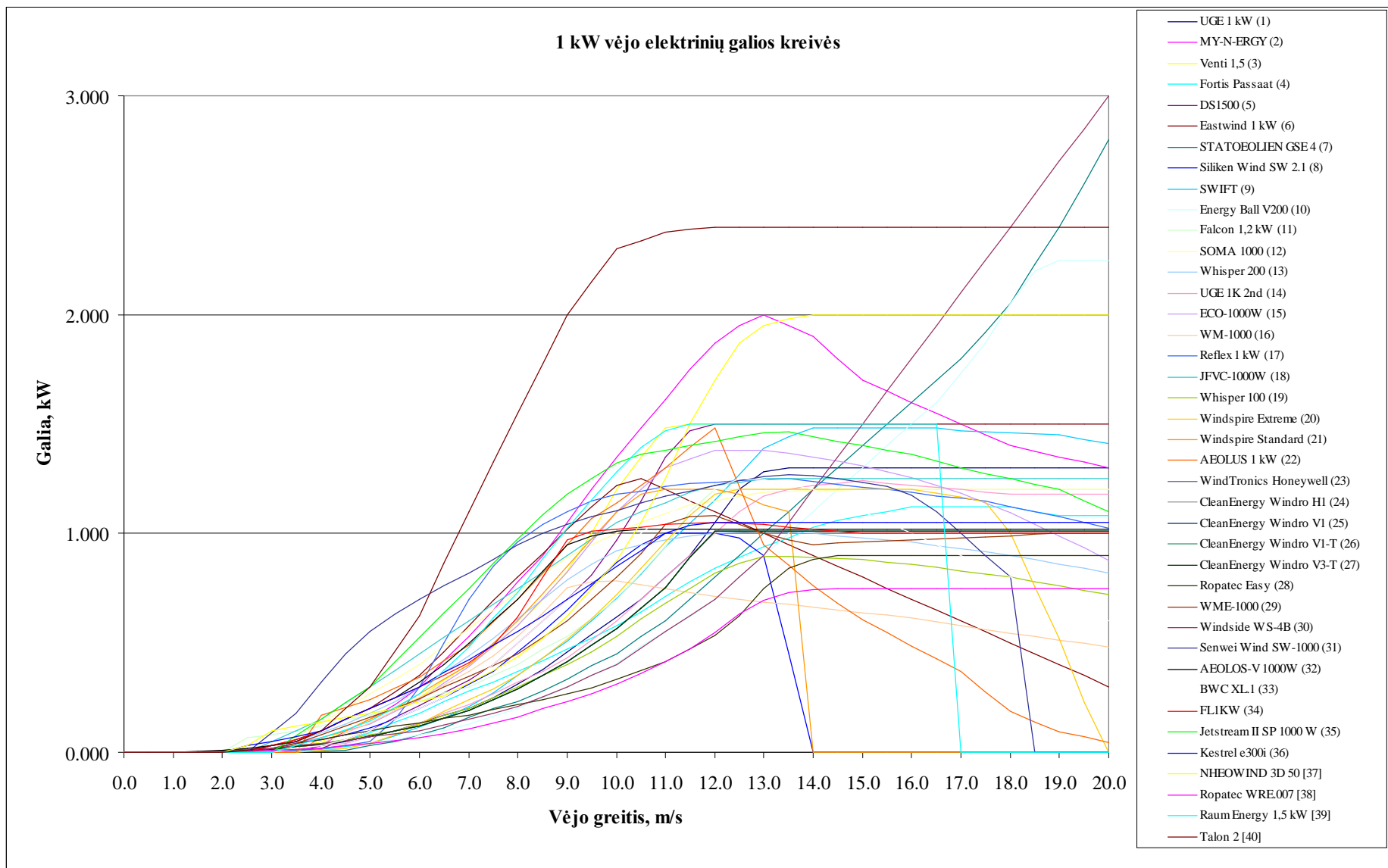
Mažiausias pradinis vėjo greitis - 0,5 m/s.

Didžiausias pradinis vėjo greitis - 4 m/s.

Mažiausias nominalus vėjo greitis - 8 m/s.

Didžiausias nominalus vėjo greitis - 19 m/s.

Minimalus stabdymo vėjo greitis - 13 m/s.



44 pav. 1 kW vėjo elektrinių galių kreivės

4.3.1. 3 kW vėjo elektrinių įvertinimas

18 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių parametrai

Nr.	Vėjo elektrinės pavadinimas	Pradinis vėjo greitis, m/s	Nominalus vėjo greitis, m/s	Stabdymo vėjo greitis, m/s	Turbinos tipas	Elektrinės rotoriaus plotas, m ²
1	OHM P3000-AB	4	12	25	H-VAVE, 5 menčių	10,80
2	Whisper 500	3,4	12	Nėra	HAVE, 2 menčių	15,90
3	Cleanfield energy V3.5	3	12	45	H-VAVE, 3 menčių	8,25
4	WM-2000	3	11	25	HAVE, 3 menčių	8,04
5	Raum 4000i	3,2	11	25	HAVE, 5 menčių	12,60
6	ReDriven 3 kW	2	10	18	HAVE, 3 menčių	10,75
7	Ropatec WRE.032	3	14	Nėra	H-VAVE, 5 menčių	6,60
8	Ropatec WRE.030	2	14	Nėra	VAVE, hibridinis	7,26
9	WES 5 Tulipo	3	9	20	HAVE, 3 menčių	19,64
10	Hummer-3KW	3	9	20	HAVE, 3 menčių	16,62
11	Falcon 3.4kW	2,7	13	50	H-VAVE, 5 menčių	10,80
12	UGE-4K 2nd	4	12	30	VAVE, 3 menčių	13,20
13	Skystream 3.7	3,5	13	25	HAVE, 3 menčių	10,87
14	HiEnergy DS3000	3	12	15	VAVE, hibridinis	16,80
15	Turby	4	14	14	VAVE, 3 menčių	5,30
16	Enviro-Energies 2.5 kW	1,8	15,5	54,5	VAVE-S, 3 menčių	4,64
17	Kestrel e400i	2,8	13	Nėra	HAVE, 3 menčių	12,57
18	Enviko 3 kW	2	12	45	HAVE, 3 menčių	32,17
19	Pawicon - 2500	2,8	11	19	HAVE, 3 menčių	9,62
20	Eolica Turbel 3 kW	1,5	15	Nėra	HAVE, 20 menčių	11,04
21	Eastwind 2KW	3	9	25	HAVE, 3 menčių	12,57
22	Eastwind 3KW	3	9	25	HAVE, 3 menčių	18,10
23	Westwind 3 kW	3,5	14	17	HAVE, 3 menčių	10,75
24	Reflex 2KW	3	9	25	HAVE, 3 menčių	10,18
25	Reflex 3KW	3	10	25	HAVE, 3 menčių	18,10
26	AEOLUS 2kW	4	12	20	HAVE, 3 menčių	8,00
27	AEOLUS 3 kW	4	12	18	HAVE, 3 menčių	15,90
28	FD3.7-2000 2KW	2	15	20	HAVE, 3 menčių	10,75
29	FD4.0-3000 3kW	2	14	20	HAVE, 3 menčių	12,57
30	Solar Inova SI-EE-H-3KW	2,5	10	45	HAVE, 3 menčių	12,57
31	Antaris 3.5 kW	4	13	14	HAVE, 3 menčių	7,07
32	ECO-3000W	3	11	25	HAVE, 3 menčių	12,57
33	Proven WT2500	2,5	12	70	HAVE, 3 menčių	9,62
34	CleanEnergy Windro H3	2	12	25	HAVE, 3 menčių	10,18
35	CleanEnergy Windro V3	2	12	25	H-VAVE	15,36
36	CleanEnergy Windro H3-LS	2	8	25	HAVE, 3 menčių	33,18
37	Camira Energy C5	3	11	20	HAVE, 3 menčių	25,52
38	Siliken Wind SW 3.4	3,5	11,5	17	HAVE, 3 menčių	9,13
39	Urban Energy 3kW	4	12	25	H-VAVE, 5 menčių	10,80
40	Fortis Montana	3	12	Nėra	HAVE, 3 menčių	19,64

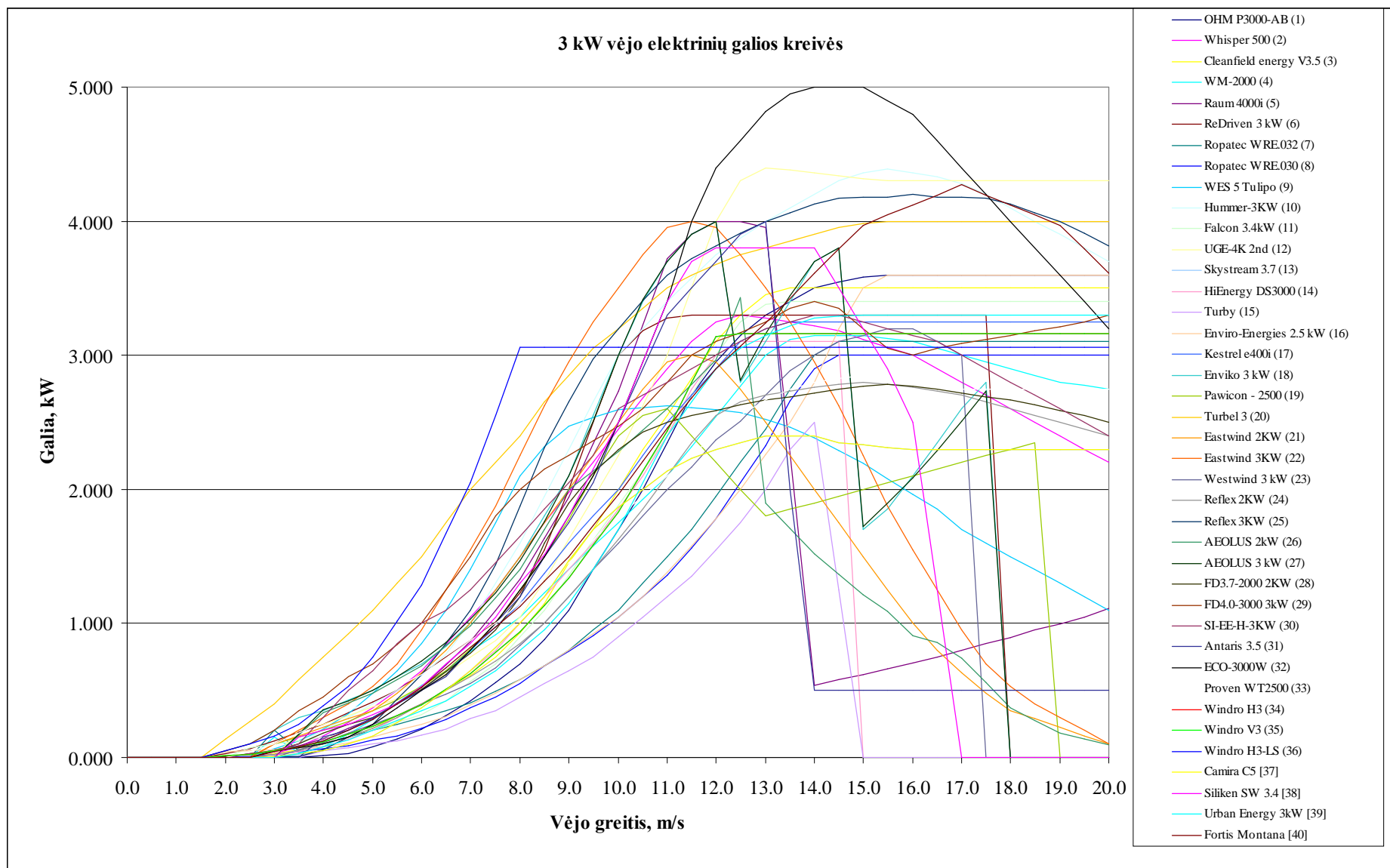
Mažiausias pradinis vėjo greitis - 1,5 m/s.

Didžiausias pradinis vėjo greitis - 4 m/s.

Mažiausias nominalus vėjo greitis - 8 m/s.

Didžiausias nominalus vėjo greitis - 15,5 m/s.

Minimalus stabdymo vėjo greitis - 14 m/s.



45 pav. 3 kW vėjo elektrinių galių kreivės

4.3.1. 5 kW vėjo elektrinių įvertinimas

19 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių parametrai

Nr.	Vėjo elektrinės pavadinimas	Pradinis vėjo greitis, m/s	Nominalus vėjo greitis, m/s	Stabdymo vėjo greitis, m/s	Turbinos tipas	Elektrinės rotoriaus plotas, m ²
1	WH-3000	4	11	25	HAVE, 3 menčių	7,07
2	OHM P5000-AB	4	12	25	H-VAVE, 5 menčių	18,40
3	ROPATEC WRE.060	2	14	Nėra	VAVE, hibridinis	14,52
4	SUNPEAK WM-5000	3	10	25	HAVE, 3 menčių	19,64
5	AEOLUS 5 kW	4	12	18	HAVE, 3 menčių	32,17
6	K&W-PG-WT-5000	3	10	18	HAVE, 3 menčių	19,64
7	VC-5kW	3	10	25	HAVE, 3 menčių	19,64
8	Endurance S-250	4	14	24	HAVE, 3 menčių	23,76
9	Endurance S-343	4,1	11	24	HAVE, 3 menčių	31,87
10	USA Solar T-5 kW	3	11	30	H-VAVE, 9 menčių	6,41
11	KhandooWH-5 kW	3	10	18	HAVE, 3 menčių	19,64
12	WEI6K	4	9	25	HAVE, 3 menčių	38,48
13	Wind Energy 5 kW	3	12	25	HAVE, 3 menčių	28,27
14	Reflex 5 kW	3	10	25	HAVE, 3 menčių	32,17
15	SPW-5kW	2	10	25	HAVE, 3 menčių	28,27
16	ReDriven 5 kW	2	10	18	HAVE, 3 menčių	32,17
17	HUA YING HY5-AD5.6	3	11	25	HAVE, 3 menčių	24,63
18	JFVC-5000W	3	11	30	H-VAVE, 9 menčių	6,41
19	Enviro-Energies 5 kW	1,8	14,5	54,5	VAVE-S, 3 menčių	10,40
20	Aerpggenesis 5 kW	3	10,5	50	HAVE, 2 menčių	19,64
21	WindEnergy FD5-5/10	3	10	17,5	HAVE, 3 menčių	19,64
22	Eco-5000W	3	14	25	HAVE, 3 menčių	19,64
23	Westwind 5kW	3	14	16,5	HAVE, 3 menčių	20,43
24	ERD Wind Ports 5 kW	2,5	14,5	25	VAVE, daugiamentis	15,21
25	EVANCE ISKRA R9000	3	12	60	HAVE, 3 menčių	23,76
26	WEPOWER Falcon 5.5	2,7	13	49,6	H-VAVE, 5 menčių	18,40
27	CleanEnergy Windro H5	2	12	25	HAVE, 3 menčių	16,62
28	CleanEnergy Windro V5	2	12	25	H-VAVE	24,48
29	CleanEnergy Windro H5-LS	2	8	25	HAVE, 3 menčių	55,2
30	Eastwind 5 kW	3	10	17,5	HAVE, 3 menčių	19,64
31	Proven Energy WT6000	2,5	12	Nėra	HAVE, 3 menčių	23,76
32	FD6.4-5000	3	11	20	HAVE, 3 menčių	26,42
33	Siliken Wind SW 4.1	3,5	11,5	16	HAVE, 3 menčių	13,01
34	Akis Enerji Senwei 5 kW	4	10	30	HAVE, 3 menčių	19,64
35	Ropatec Maxi	3	15	Nėra	H-VAVE, 3 menčių	11,75
36	Eoltec Shirocco 6 kW	2,7	11,5	Nėra	HAVE, 2 menčių	24,63
37	Jetstream III SP 5.5 kW	3	12	23	HAVE, 3 menčių	19,64
38	Easy Wind	3	10,6	Nėra	HAVE, 4 menčių	28,27
39	Eolica Turbel 6 kW	1,5	15	Nėra	HAVE, 20 menčių	15,21
40	Nova Wind 6 AC-240	3	10,6	Nėra	HAVE, 4 menčių	28,27

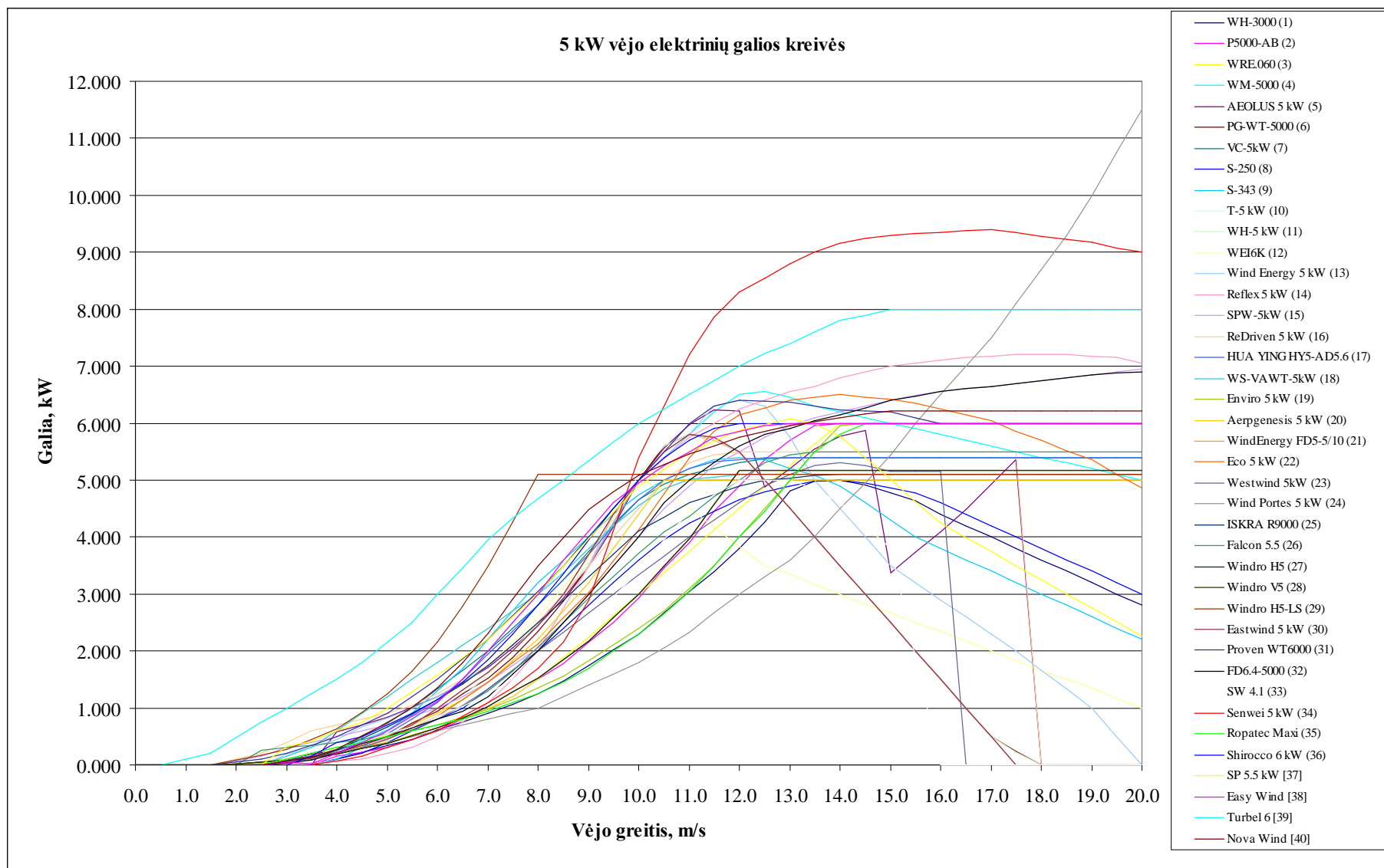
Mažiausias pradinis vėjo greitis - 1,5 m/s.

Didžiausias pradinis vėjo greitis - 4,1 m/s.

Mažiausias nominalus vėjo greitis - 8 m/s.

Didžiausias nominalus vėjo greitis - 15 m/s.

Minimalus stabdymo vėjo greitis - 17 m/s.

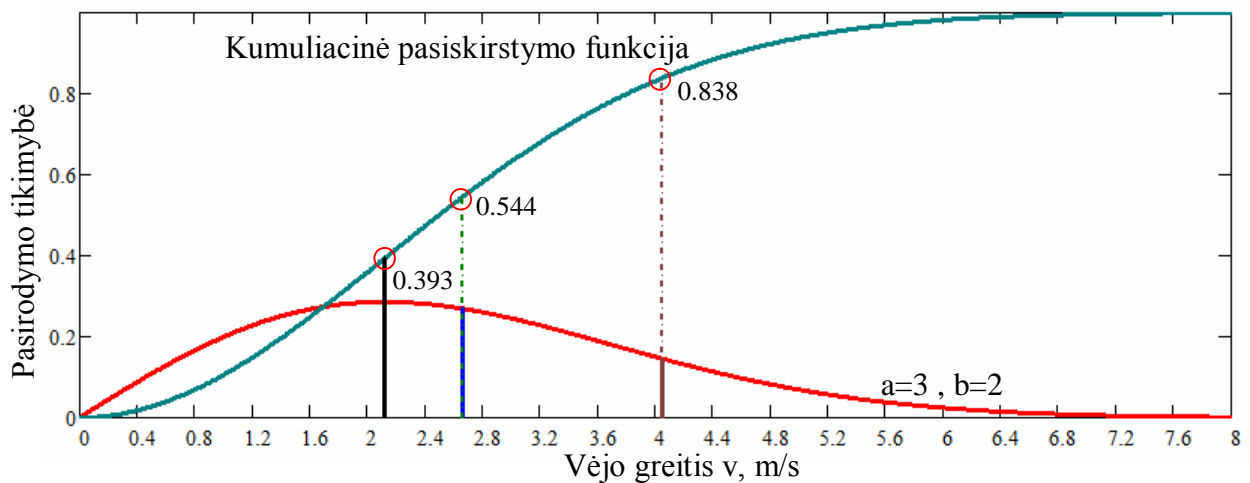


46 pav. 5 kW vėjo elektrinių galios kreivės

4.4. Vėjo elektrinių tyrimo rezultatai

Analizuojant mažos galios vėjo elektrines būtina atkreipti į elektrinės generuojamą galią esant mažiems vėjo greičiams, nes šių vėjo greičių pasirodymo tikimybė yra pakankamai didelė, todėl atskirai skaičiuojami vėjo greičių pasiskirstymai valandomis šioms situacijoms (iki tam tikrų verčių):

- 1 Situacija – pilnas vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/m (100% imties);
- 2 Situacija – vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{mod} , H/m (~ 40% imties);
- 3 Situacija – vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki V_{vid} , H/m (~ 55% imties);
- 4 Situacija – vėjo greičių pasiskirstymas valandomis iki $V_{\text{vid}}+\sigma$, H/m (~ 84% imties);.



47 pav. Mažų vėjo greičių zonų pasiskirstymo funkcija

47 paveiksle pateiktos pagrindinės mažų vėjo greičių zonų vertinimo situacijos. Analizuojant pasirinktas vietas, rezultatai rodo, kad šių situacijų verčių kumuliaciniai dydžiai panašūs. Skirtingos konstrukcijos vėjo elektrinių rotoriai geriausiai išnaudoja vėjo energiją besisukdami savitu greičiu, todėl analizuojant būtina įvertinti labiausiai paplitusias konstrukcijas. Šiame tyrime nagrinėjamos šių rotorių tipų vėjo elektrinės: HAVE - horizontalios ašies vėjo elektrinė, VAVE (H-VAVE - H tipo rotorius) - vertikalios ašies vėjo elektrinė, VAVE-S - vertikalios ašies Savonius tipo elektrinė, Hibridinė - tai Darrieus ir Savonius kombinuota vėjo elektrinė. Mažos galios vėjo elektrinių įvertinimui lyginami metiniai pagaminamos energijos kiekiai pasirinktose vietovėse (Nida, Kaunas, Utena, Telšiai, Tauragė ir Varėna). Taip pat skaičiuojama ir analizuojama energijos produkcija iki apibrėžtų vėjo greičio verčių (viso keturios situacijos). Lyginamos mažos galios vėjo elektrinės skirtingose galios klasėse. Kiekvienos vietovės suminiai vėjo elektrinių energijos kiekiai W_i pateikti 20-25 lentelėse.

20 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių (1-20) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.

Vėjo elektrinės	Nida				Kaunas				Utena				Telšiai				Tauragė				Varėna			
	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija
1	1777	35	123	686	475	0	0	144	195	0	0	45	150	0	0	50	118	0	0	0	84	0	0	0
2	3756	40	216	1621	1041	9	9	247	391	0	0	56	278	0	0	62	217	0	0	12	148	0	0	12
3	3120	68	244	1324	917	18	18	289	388	0	0	96	304	0	0	107	241	0	0	23	177	0	0	23
4	1860	46	152	886	594	0	0	179	251	0	0	60	193	0	0	66	152	0	0	0	108	0	0	0
5	2635	28	146	1062	700	9	9	167	266	0	0	41	192	0	0	45	150	0	0	12	104	0	0	12
6	3571	145	380	1902	1317	54	54	470	615	0	0	214	507	0	0	239	411	0	0	69	318	0	0	70
7	1302	9	45	453	288	7	7	53	101	2	2	16	69	2	2	18	55	3	3	9	39	3	3	10
8	2259	99	228	1080	782	54	54	291	378	0	0	154	322	0	0	173	265	0	0	69	213	0	0	70
9	1872	15	63	646	410	0	0	73	138	0	0	20	93	0	0	22	72	0	0	0	48	0	0	0
10	1186	15	62	420	282	5	5	72	109	0	0	21	81	0	0	24	64	0	0	7	46	0	0	7
11	2450	218	418	1248	1038	144	144	556	630	0	0	350	595	0	0	395	503	0	0	185	429	0	0	186
12	3524	153	466	1979	1402	0	0	554	667	0	0	200	548	0	0	220	433	0	0	0	320	0	0	0
13	2909	134	345	1540	1102	54	54	429	539	0	0	199	455	0	0	223	371	0	0	69	290	0	0	70
14	1755	40	122	714	486	9	9	146	205	0	0	56	160	0	0	62	127	0	0	12	94	0	0	12
15	2970	95	248	1307	916	36	36	307	411	0	0	140	335	0	0	157	272	0	0	46	209	0	0	46
16	2366	57	216	1229	829	18	18	255	355	0	0	83	275	0	0	92	219	0	0	23	159	0	0	23
17	3565	28	87	1785	1004	9	9	105	321	0	0	41	195	0	0	45	153	0	0	12	98	0	0	12
18	3791	223	575	2188	1625	90	90	714	850	0	0	332	738	0	0	371	602	0	0	115	476	0	0	116
19	1576	46	140	693	483	0	0	166	212	0	0	60	169	0	0	66	134	0	0	0	98	0	0	0
20	1886	9	56	684	428	0	0	63	139	0	0	12	89	0	0	13	68	0	0	0	43	0	0	0

21 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių (21-40) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.

<i>Vėjo elektrinės</i>	<i>Nida</i>				<i>Kaunas</i>				<i>Utena</i>				<i>Telšiai</i>				<i>Tauragė</i>				<i>Varėna</i>			
	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>
21	2845	76	252	1365	937	0	0	297	398	0	0	99	309	0	0	109	243	0	0	0	175	0	0	0
22	3494	193	476	1831	1353	0	0	579	668	0	0	252	570	0	0	278	454	0	0	0	345	0	0	0
23	2686	210	418	1390	1116	157	157	561	672	73	73	366	620	74	74	404	538	84	84	222	469	92	92	231
24	1645	59	142	671	488	33	33	181	235	9	9	95	199	9	9	106	166	10	10	45	134	11	11	46
25	1645	59	142	671	488	33	33	181	235	9	9	95	199	9	9	106	166	10	10	45	134	11	11	46
26	1645	59	142	671	488	33	33	181	235	9	9	95	199	9	9	106	166	10	10	45	134	11	11	46
27	1645	59	142	671	488	33	33	181	235	9	9	95	199	9	9	106	166	10	10	45	134	11	11	46
28	1288	89	207	677	530	36	36	261	295	0	0	133	266	0	0	148	218	0	0	46	177	0	0	46
29	2471	112	300	1226	903	36	36	369	447	0	0	163	380	0	0	182	308	0	0	46	239	0	0	46
30	1342	73	156	562	442	51	51	205	247	22	22	125	224	24	24	139	192	26	26	72	164	28	28	74
31	5052	458	1105	3346	2646	162	162	1381	1521	0	0	672	1378	0	0	751	1127	0	0	208	906	0	0	209
32	3240	152	388	1727	1238	69	69	486	612	22	22	236	519	24	24	263	428	26	26	95	341	28	28	98
33	2447	35	152	1043	685	0	0	175	264	0	0	45	192	0	0	50	150	0	0	0	103	0	0	0
34	3092	145	380	1554	1152	54	54	470	568	0	0	214	486	0	0	239	395	0	0	69	310	0	0	70
35	4514	173	525	2528	1744	0	0	624	800	0	0	225	643	0	0	248	507	0	0	0	370	0	0	0
36	2854	165	400	1536	1151	90	90	506	608	0	0	257	535	0	0	288	441	0	0	115	356	0	0	116
37	2963	261	473	1345	1153	180	180	638	715	0	0	423	686	0	0	477	583	0	0	231	504	0	0	232
38	941	32	78	374	272	18	18	99	130	4	4	51	109	5	5	57	91	5	5	24	73	6	6	24
39	3448	75	242	1530	1014	0	0	286	407	0	0	98	307	0	0	108	242	0	0	0	172	0	0	0
40	6759	145	498	3366	2185	54	54	596	897	0	0	214	679	0	0	239	541	0	0	69	395	0	0	70

22 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių (1-20) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.

Vėjo elektrinės	Nida				Kaunas				Utena				Telšiai				Tauragė				Varėna			
	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija
1	4182	14	108	1252	802	0	0	120	248	0	0	18	156	0	0	20	120	0	0	0	75	0	0	0
2	7309	214	649	3460	2370	54	54	783	1045	0	0	304	834	0	0	339	667	0	0	69	498	0	0	70
3	5427	145	404	2105	1505	54	54	495	662	0	0	214	537	0	0	239	434	0	0	69	331	0	0	70
4	5471	107	436	2547	1717	27	27	510	725	0	0	152	554	0	0	169	437	0	0	35	313	0	0	35
5	7010	218	559	2927	2080	101	101	698	932	0	0	331	766	0	0	371	624	0	0	129	487	0	0	130
6	7526	435	924	3343	2663	272	272	1207	1448	67	67	708	1305	71	71	791	1102	77	77	366	925	84	84	374
7	3558	135	370	1514	1121	36	36	452	545	0	0	193	461	0	0	215	372	0	0	46	287	0	0	46
8	3188	101	254	1250	895	48	48	319	417	18	18	158	348	19	19	176	288	21	21	67	229	22	22	69
9	8534	310	874	4678	3143	123	123	1072	1432	0	0	460	1162	0	0	515	939	0	0	157	718	0	0	158
10	8156	280	751	3546	2528	90	90	923	1159	0	0	407	961	0	0	454	778	0	0	115	601	0	0	116
11	5219	273	508	2062	1587	180	180	679	834	0	0	438	755	0	0	494	637	0	0	231	538	0	0	232
12	6721	288	729	2792	2115	0	0	884	1021	0	0	375	867	0	0	414	690	0	0	0	522	0	0	0
13	4857	58	246	2004	1291	0	0	283	471	0	0	75	330	0	0	83	257	0	0	0	174	0	0	0
14	5191	112	347	2138	1450	36	36	419	601	0	0	163	466	0	0	182	373	0	0	46	276	0	0	46
15	2512	58	175	968	669	0	0	208	277	0	0	75	216	0	0	83	170	0	0	0	124	0	0	0
16	3390	181	358	1428	1107	170	170	490	627	89	89	337	569	94	94	374	501	103	103	241	441	112	112	251
17	6009	188	541	2693	1896	90	90	665	869	0	0	287	714	0	0	321	580	0	0	115	448	0	0	116
18	8441	640	1227	4046	3286	438	438	1643	1924	111	111	1062	1791	118	118	1188	1533	129	129	590	1321	140	140	605
19	6247	330	742	3011	2256	180	180	950	1154	0	0	513	1015	0	0	577	841	0	0	231	685	0	0	232
20	12917	1366	2659	7959	6543	937	937	3556	4092	311	311	2288	3851	329	329	2552	3308	360	360	1284	2864	392	392	1321

23 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių (21-40) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.

<i>Vėjo elektrinės</i>	<i>Nida</i>				<i>Kaunas</i>				<i>Utena</i>				<i>Telšiai</i>				<i>Tauragė</i>				<i>Varėna</i>			
	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>	<i>1 Situacija</i>	<i>2 Situacija</i>	<i>3 Situacija</i>	<i>4 Situacija</i>
21	7148	359	771	3513	2543	180	180	991	1262	0	0	551	1091	0	0	618	901	0	0	231	728	0	0	232
22	10347	445	1068	5234	3677	180	180	1341	1742	0	0	663	1459	0	0	742	1191	0	0	231	934	0	0	232
23	4656	127	421	1993	1416	0	0	495	625	0	0	165	498	0	0	182	393	0	0	0	285	0	0	0
24	4734	135	394	2026	1426	36	36	477	634	0	0	193	511	0	0	215	409	0	0	46	308	0	0	46
25	8405	77	371	3475	2181	14	14	427	765	0	0	107	522	0	0	119	408	0	0	18	274	0	0	19
26	7041	387	951	3661	2714	0	0	1158	1337	0	0	504	1139	0	0	556	908	0	0	0	689	0	0	0
27	8245	406	999	3844	2881	0	0	1216	1405	0	0	530	1196	0	0	585	953	0	0	0	724	0	0	0
28	6254	265	617	2799	2054	106	106	779	987	22	22	399	839	24	24	444	690	26	26	141	549	28	28	144
29	9534	755	1578	5565	4255	438	438	2060	2426	111	111	1212	2206	118	118	1353	1860	129	129	590	1562	140	140	605
30	8537	395	1160	4652	3400	90	90	1401	1685	0	0	557	1419	0	0	619	1138	0	0	115	867	0	0	116
31	6446	173	525	2715	1905	0	0	624	812	0	0	225	641	0	0	248	506	0	0	0	368	0	0	0
32	7060	165	459	2686	1869	90	90	569	804	0	0	257	644	0	0	288	524	0	0	115	403	0	0	116
33	6157	411	916	3265	2501	180	180	1166	1358	0	0	618	1214	0	0	692	1001	0	0	231	812	0	0	232
34	5299	196	465	2185	1593	113	113	594	771	33	33	315	656	35	35	352	547	39	39	154	444	42	42	158
35	5299	196	465	2185	1593	113	113	594	771	33	33	315	656	35	35	352	547	39	39	154	444	42	42	158
36	11777	636	1513	7116	4913	364	364	1931	2491	107	107	1023	2130	113	113	1140	1775	123	123	495	1441	134	134	508
37	4867	68	256	2014	1309	18	18	301	492	0	0	96	355	0	0	107	280	0	0	23	197	0	0	23
38	6977	230	606	2950	2086	0	0	732	924	0	0	300	749	0	0	331	594	0	0	0	441	0	0	0
39	4728	92	327	1802	1252	0	0	383	517	0	0	120	398	0	0	132	312	0	0	0	223	0	0	0
40	5977	178	507	2685	1864	72	72	622	840	0	0	265	680	0	0	297	549	0	0	92	419	0	0	93

24 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių (1-20) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.

Vėjo elektrinės	Nida				Kaunas				Utena				Telšiai				Tauragė				Varėna			
	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija
1	7042	121	526	2967	2023	0	0	606	834	0	0	158	632	0	0	174	493	0	0	0	345	0	0	0
2	8351	173	525	3235	2196	0	0	624	887	0	0	225	677	0	0	248	533	0	0	0	381	0	0	0
3	8630	336	807	3571	2643	175	175	1024	1293	44	44	530	1107	47	47	591	919	51	51	236	742	56	56	242
4	14160	338	1067	6431	4298	90	90	1281	1800	0	0	482	1397	0	0	537	1115	0	0	115	822	0	0	116
5	13621	677	1664	6407	4798	0	0	2026	2341	0	0	883	1993	0	0	974	1588	0	0	0	1206	0	0	0
6	12012	388	976	5197	3685	180	180	1221	1651	0	0	588	1354	0	0	659	1104	0	0	231	861	0	0	232
7	13578	338	1220	6635	4523	90	90	1444	1963	0	0	482	1536	0	0	537	1220	0	0	115	893	0	0	116
8	9800	115	585	4198	2730	0	0	667	1032	0	0	150	737	0	0	166	572	0	0	0	387	0	0	0
9	13739	115	821	6685	4168	0	0	918	1537	0	0	150	1057	0	0	166	815	0	0	0	534	0	0	0
10	15525	841	2252	8701	6441	270	270	2768	3295	0	0	1220	2831	0	0	1362	2292	0	0	346	1787	0	0	348
11	12201	388	976	5320	3714	180	180	1221	1647	0	0	588	1347	0	0	659	1099	0	0	231	857	0	0	232
12	12043	345	1051	5828	3978	0	0	1249	1686	0	0	450	1315	0	0	497	1036	0	0	0	749	0	0	0
13	13654	698	1674	6486	4907	325	325	2110	2515	0	0	1058	2201	0	0	1187	1809	0	0	416	1453	0	0	418
14	10896	101	336	3403	2244	27	27	402	733	0	0	144	500	0	0	161	397	0	0	35	277	0	0	35
15	12123	927	1750	5728	4678	649	649	2353	2763	155	155	1544	2579	165	165	1728	2211	180	180	873	1910	196	196	893
16	14034	1279	2337	7204	5976	875	875	3161	3654	222	222	2124	3454	235	235	2375	2969	257	257	1181	2581	280	280	1209
17	13109	399	1046	6160	4166	180	180	1300	1830	0	0	603	1467	0	0	676	1192	0	0	231	915	0	0	232
18	15525	841	2252	8701	6441	270	270	2768	3295	0	0	1220	2831	0	0	1362	2292	0	0	346	1787	0	0	348
19	8067	460	1048	3736	2891	211	211	1334	1558	44	44	707	1390	47	47	789	1154	51	51	282	943	56	56	288
20	11435	445	1057	5037	3633	180	180	1329	1705	0	0	663	1435	0	0	742	1172	0	0	231	923	0	0	232

25 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių (21-40) kiekvienos vietovės suminiai energijos kiekiai $W_i, kWh/m$.

Vėjo elektrinės	Nida				Kaunas				Utena				Telšiai				Tauragė				Varėna			
	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija	1 Situacija	2 Situacija	3 Situacija	4 Situacija
21	12281	333	921	5356	3717	144	144	1135	1597	0	0	500	1272	0	0	561	1030	0	0	185	784	0	0	186
22	11442	300	829	4714	3264	126	126	1021	1415	0	0	449	1133	0	0	503	917	0	0	162	700	0	0	163
23	9814	280	833	4445	3051	90	90	1010	1344	0	0	407	1078	0	0	454	866	0	0	115	654	0	0	116
24	6231	280	751	2900	2179	90	90	923	1100	0	0	407	944	0	0	454	764	0	0	115	596	0	0	116
25	12135	348	1141	5899	4064	108	108	1368	1810	0	0	503	1446	0	0	561	1157	0	0	139	863	0	0	139
26	11006	761	1407	5093	4012	541	541	1892	2261	0	0	1239	2094	0	0	1398	1774	0	0	693	1514	0	0	697
27	8653	315	754	3562	2592	175	175	960	1245	44	44	501	1056	47	47	560	878	51	51	236	709	56	56	242
28	8653	315	754	3562	2592	175	175	960	1245	44	44	501	1056	47	47	560	878	51	51	236	709	56	56	242
29	19746	1062	2527	11961	8242	608	608	3226	4170	178	178	1708	3561	188	188	1904	2968	206	206	827	2407	224	224	849
30	12281	333	921	5356	3717	144	144	1135	1597	0	0	500	1272	0	0	561	1030	0	0	185	784	0	0	186
31	15610	812	1870	7842	5792	438	438	2393	2988	111	111	1287	2600	118	118	1436	2166	129	129	590	1766	140	140	605
32	10775	270	858	4346	3074	72	72	1030	1335	0	0	385	1070	0	0	429	856	0	0	92	641	0	0	93
33	9872	445	1092	4532	3361	180	180	1366	1666	0	0	663	1433	0	0	742	1171	0	0	231	927	0	0	232
34	11795	81	433	3386	2333	0	0	492	797	0	0	105	552	0	0	116	428	0	0	0	286	0	0	0
35	7820	445	1033	3619	2811	180	180	1304	1505	0	0	663	1340	0	0	742	1100	0	0	231	887	0	0	232
36	13914	460	1283	6358	4441	0	0	1539	1958	0	0	600	1574	0	0	662	1246	0	0	0	918	0	0	0
37	15608	1024	2200	8226	6288	600	600	2847	3418	0	0	1609	3068	0	0	1810	2554	0	0	769	2105	0	0	773
38	13863	280	986	6317	4168	90	90	1173	1698	0	0	407	1292	0	0	454	1029	0	0	115	750	0	0	116
39	25459	3115	5643	16097	13677	2627	2627	7804	9141	1209	1209	5588	8742	1248	1248	6185	7719	1393	1393	3702	6910	1523	1523	3845
40	15298	381	1251	7497	4960	126	126	1501	2103	0	0	554	1636	0	0	619	1308	0	0	162	967	0	0	163

4.4.1. 1 kW vėjo elektrinių generuojamos galios palyginimas

Analizuojant elektrinių pagaminamos energijos kiekius (kiekvienos vietovės skirtingos situacijos) parenkamos naudingiausios vėjo elektrinės. Rezultatai pateikti 26 lentelėje.

26 lentelė. 1 kW vėjo elektrinių analizės rezultatai

Vietovė	Situacijos	Energijos kiekis, kWh/m / Vėjo elektrinė	Rotoriaus tipas	Rotoriaus plotas
Nida	1	6759 / Talon 2	HAVE, 3 menčių	12,57
	2	458 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
	3	1105 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
	4	3366 / Talon 2	HAVE, 3 menčių	12,57
Kaunas	1	2646 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
	2	180 / NHEOWIND 3D 50	HAVE-a, 3 menčių	8,04
	3	180 / NHEOWIND 3D 50	HAVE-a, 3 menčių	8,04
	4	1381 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
Utena	1	1521 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
	2	73 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	3	73 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	4	672 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
Telšiai	1	1378 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
	2	74 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	3	74 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	4	751 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
Tauragė	1	1127 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
	2	84 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	3	84 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	4	231 / NHEOWIND 3D 50	HAVE-a, 3 menčių	8,04
Varėna	1	906 / SW-1000	HAVE, 3 menčių	7,07
	2	84 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	3	84 / Honeywell	HAVE, 20 menčių	2,55
	4	232 / NHEOWIND 3D 50	HAVE-a, 3 menčių	8,04

Naudingiausia 3 menčių horizontalios ašies "Senwei Wind SW-1000" vėjo elektrinė. Didesnio vėjingumo zonoje (Nida) geriausiai veikia 3 menčių horizontalios ašies "Talon 2" vėjo elektrinė. Mažų greičių zonose naudingiausios aerodinaminė horizontalios ašies 3 menčių "NHEOWIND 3D 50" ir horizontalios ašies 20 menčių "Honeywell" vėjo elektrinės. Vertikalios ašies vėjo elektrinių ar hibridinių elektrinių veikimas prastesni nei pateiktų.

4.4.2. 3 kW vėjo elektrinių generuojamos galios palyginimas

Analizuojant elektrinių pagaminamus energijos kiekius (kiekvienos vietovės skirtingos situacijos) parenkamos trys naudingiausios vėjo elektrinės. Rezultatai pateikti 27 lentelėje.

27 lentelė. 3 kW vėjo elektrinių analizės rezultatai

Vietovė	Situacijos	Energijos kiekis, kWh/m / Vėjo elektrinė – I	Energijos kiekis, kWh/m / Vėjo elektrinė – II	Energijos kiekis, kWh/m / Vėjo elektrinė – III
Nida	1	12917 / Eolica Turbel 3 kW	11777 / Windro H3-LS	9358 / FD4.0 3kW
	2	1366 / Eolica Turbel 3 kW	755 / FD4.0 3kW	640 / Enviko 3kW
	3	2659 / Eolica Turbel 3 kW	1578 / FD4.0 3kW	1513 / Windro H3-LS
	4	7959 / Eolica Turbel 3 kW	7116 / Windro H3-LS	5565 / FD4.0 3kW
Kaunas	1	6543 / Eolica Turbel 3 kW	4913 / Windro H3-LS	4255 / FD4.0 3kW
	2	937 / Eolica Turbel 3 kW	438 / Enviko 3kW	438 / FD4.0 3kW
	3	937 / Eolica Turbel 3 kW	438 / Enviko 3kW	438 / FD4.0 3kW
	4	3556 / Eolica Turbel 3 kW	2060 / FD4.0 3kW	1931 / Windro H3-LS
Ufena	1	4092 / Eolica Turbel 3 kW	2491 / Windro H3-LS	2426 / FD4.0 3kW
	2	311 / Eolica Turbel 3 kW	111 / FD4.0 3kW	111 / Enviko 3kW
	3	311 / Eolica Turbel 3 kW	111 / FD4.0 3kW	111 / Enviko 3kW
	4	2288 / Eolica Turbel 3 kW	1212 / FD4.0 3kW	1062 / Enviko 3kW
Telšiai	1	3851 / Eolica Turbel 3 kW	2206 / FD4.0 3kW	2130 / Windro H3-LS
	2	329 / Eolica Turbel 3 kW	118 / FD4.0 3kW	118 / Enviko 3kW
	3	329 / Eolica Turbel 3 kW	118 / FD4.0 3kW	118 / Enviko 3kW
	4	2552 / Eolica Turbel 3 kW	1353 / FD4.0 3kW	1188 / Enviko 3kW
Tauragė	1	3308 / Eolica Turbel 3 kW	1860 / FD4.0 3kW	1775 / Windro H3-LS
	2	360 / Eolica Turbel 3 kW	129 / FD4.0 3kW	129 / Enviko 3kW
	3	360 / Eolica Turbel 3 kW	129 / FD4.0 3kW	129 / Enviko 3kW
	4	1284 / Eolica Turbel 3 kW	590 / FD4.0 3kW	590 / Enviko 3kW
Varėna	1	2864 / Eolica Turbel 3 kW	1562 / FD4.0 3kW	1441 / Windro H3-LS
	2	392 / Eolica Turbel 3 kW	140 / FD4.0 3kW	140 / Enviko 3kW
	3	392 / Eolica Turbel 3 kW	140 / FD4.0 3kW	140 / Enviko 3kW
	4	1321 / Eolica Turbel 3 kW	605 / FD4.0 3kW	605 / Enviko 3kW

Naudingiausia 20 metrų horizontalios ašies " Eolica Turbel 3 kW " vėjo elektrinė. Vertikalios ašies vėjo elektrinių ar hibridinių elektrinių veikimas prastesni nei pateiktų.

4.4.3. 5 kW vėjo elektrinių generuojamos galios palyginimas

Analizuojant elektrinių pagaminamus energijos kiekius (kiekvienos vietovės skirtingos situacijos) parenkamos trys naudingiausios vėjo elektrinės. Rezultatai pateikti 28 lentelėje.

28 lentelė. 5 kW vėjo elektrinių analizės rezultatai

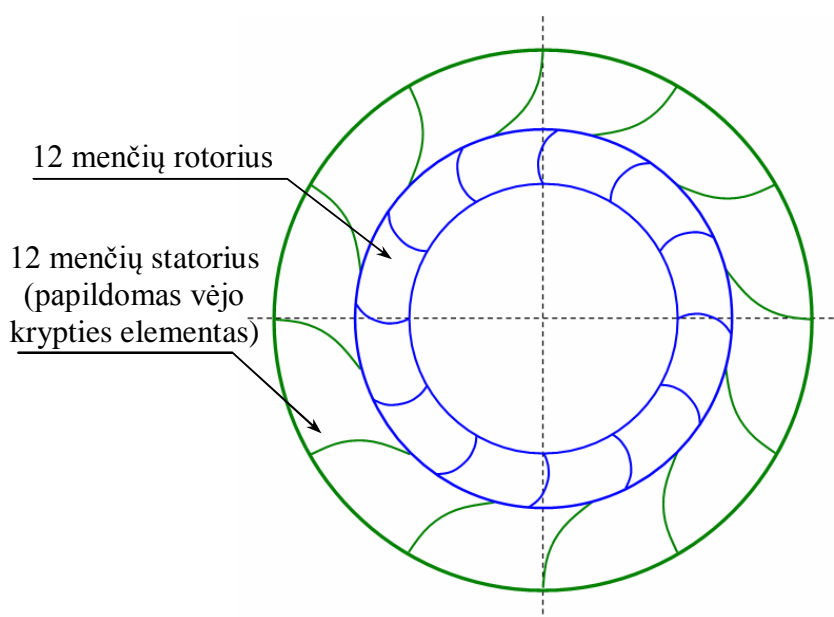
Vietovė	Situacijos	Energijos kiekis, kWh/m / Vėjo elektrinė – I	Energijos kiekis, kWh/m / Vėjo elektrinė – II	Energijos kiekis, kWh/m / Vėjo elektrinė – III
Nida	1	25459 / Eolica Turbel 6 kW	19746 / Windro H5-LS	15610 / WT6000
	2	3115 / Eolica Turbel 6 kW	1279 / ReDriven 5 kW	1062 / Windro H5-LS
	3	5643 / Eolica Turbel 6 kW	2527 / Windro H5-LS	2337 / ReDriven 5 kW
	4	16097 / Eolica Turbel 6 kW	11961 / Windro H5-LS	8701 / JFVC 5 kW
Kaunas	1	13677 / Eolica Turbel 6 kW	8242 / Windro H5-LS	6441 / JFVC 5 kW
	2	2627 / Eolica Turbel 6 kW	875 / ReDriven 5 kW	649 / SPW 5kW
	3	2627 / Eolica Turbel 6 kW	875 / ReDriven 5 kW	649 / SPW 5kW
	4	7804 / Eolica Turbel 6 kW	3226 / Windro H5-LS	3161 / ReDriven 5 kW
Utena	1	9141 / Eolica Turbel 6 kW	4170 / Windro H5-LS	3654 / ReDriven 5 kW
	2	1209 / Eolica Turbel 6 kW	222 / ReDriven 5 kW	178 / Windro H5-LS
	3	1209 / Eolica Turbel 6 kW	222 / ReDriven 5 kW	178 / Windro H5-LS
	4	5588 / Eolica Turbel 6 kW	2124 / ReDriven 5 kW	1708 / Windro H5-LS
Telšiai	1	8742 / Eolica Turbel 6 kW	3561 / Windro H5-LS	3454 / ReDriven 5 kW
	2	1248 / Eolica Turbel 6 kW	235 / ReDriven 5 kW	188 / Windro H5-LS
	3	1248 / Eolica Turbel 6 kW	235 / ReDriven 5 kW	188 / Windro H5-LS
	4	6185 / Eolica Turbel 6 kW	2375 / ReDriven 5 kW	1904 / Windro H5-LS
Tauragė	1	7719 / Eolica Turbel 6 kW	2969 / ReDriven 5 kW	2968 / Windro H5-LS
	2	1393 / Eolica Turbel 6 kW	257 / ReDriven 5 kW	206 / Windro H5-LS
	3	1393 / Eolica Turbel 6 kW	257 / ReDriven 5 kW	206 / Windro H5-LS
	4	3702 / Eolica Turbel 6 kW	1181 / ReDriven 5 kW	873 / SPW 5kW
Varėna	1	6910 / Eolica Turbel 6 kW	2581 / ReDriven 5 kW	2407 / Windro H5-LS
	2	1523 / Eolica Turbel 6 kW	280 / ReDriven 5 kW	224 / Windro H5-LS
	3	1523 / Eolica Turbel 6 kW	280 / ReDriven 5 kW	224 / Windro H5-LS
	4	3845 / Eolica Turbel 6 kW	1209 / ReDriven 5 kW	893 / SPW 5kW

Naudingiausia 20 menčių horizontalios ašies " Eolica Turbel 6 kW " vėjo elektrinė. Vertikalios ašies vėjo elektrinių ar hibridinių elektrinių veikimas prastesni nei pateiktų.

4.5. Skersinio srauto (Cross-flow) vėjo elektrinės turbina

Atsinaujinančios energijos šaltinių poreikis kasmet tampa vis didesnis. Norėdami išnaudoti tokios rūšies energijas, vėjo turbina šiuo metu laikomos perspektyviausiu pasirinkimu. Tarp skirtingų tipų vėjo elektrinių turbinų tipų labiausiai paplitusios horizontalios ašies vėjo elektrinės. Taip pat gaminamos ir tobulinamos vertikalios ašies vėjo elektrinės. Pagrindinis vertikalios ašies vėjo elektrinės privalumas – paprastumas, tačiau naujosios vertikalios ašies turbina pakankamai sudėtingos. Didelis pradinis sukimosi momentas, mažas triukšmingumas, veikimas, kur vėjo greitis yra santykinai mažas – tai pagrindinės savybės įrodančios šių vėjo elektrinių naudojimo tinkamumą miesto vietovėse.

Atlikus tyrimą, papildomai analizuojant įvairių optimalių geometrinių konfigūracijų Savonius ir Darrieus elektrinių tipus pasirinktose generavimo galios klasėse (1 kW, 2 kW ir 3 kW), nustatyta, kad šios vėjo elektrinės mažiems vėjo greičiams netinkamos. Savonius dviejų menčių rotorius maksimalus galios koeficientas – 0.2, esant optimaliam greitaeigiškumui – 0.8. Darrieus dviejų menčių rotorius maksimalus galios koeficientas – 0.3, esant optimaliam greitaeigiškumui – 3. Geresnėmis savybėmis pasižymi skersinio srauto (Cross-flow) vėjo elektrinė (48 pav.). Skersinio srauto dvylikos menčių rotorius maksimalus galios koeficientas – 0.3, esant optimaliam greitaeigiškumui – 0.5. Padidinus menčių skaičių iki 16, galios koeficientas didėja iki 0.45, tačiau dėl mažo greitaeigiškumo reikalingi didelių matmenų mažų apsukų generatoriai. Šios turbina komplektuojamos kartu su papildomais vėjo krypties elementais, kurie sutelkia vėjo srautą į pagrindinės turbina/generatoriaus centrą. Vėjo krypties elementai gaminami įvairių dydžių, didesni montuojami mažesnių vėjo greičių vietovėse, o mažesni vėjo krypties elementai montuojami didesnių vėjo greičių vietovėse.



48 pav. Dvylikos menčių skersinio srauto vėjo elektrinės turbina

4.5.1. Skersinio srauto 3, 6 ir 12 menčių vėjo elektrinės rotorius tyrimas

Tyrimas atliktas remiantis Huddersfield Universiteto mokslinių tyrimų rezultatais. Saugykloje yra skaitmeninė atliktų tyrimų atviros prieigos duomenų bazė [15].

Optimaliam vėjo elektrinės turbino veikimo analizei buvo tiriamas turbino greitaieigiškumas. Optimaliam vėjo energijos išnaudojimui, rotorius turi sukintis tam tikru dažniu. Optimalus greitaieigiškumo koeficientas pateikiamas vėjo turbinų gamintojų ir yra bedimencinis koeficientas, kuris gali būti išreikštas:

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} \cdot r}{V} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{opt} \cdot r}{V}. \quad (11)$$

čia r – rotorius spindulys [m]; V – vėjo greitis [m/s]; f_{opt} – optimalus sukimosi dažnis [Hz], [s⁻¹]; ω_{opt} – optimalus kampinis greitis [radian/s].

Optimalus kampinis greitis yra tiesiogiai susijęs su rotorius greitaieigiškumo koeficientu:

$$\omega_{opt} = V \cdot \frac{\lambda_{opt}}{r}. \quad (12)$$

Turbino galią galima užrašyti kaip momento T ir kampinio greičio ω sandaugą:

$$P_{turbinos} = T \cdot \omega. \quad (13)$$

Vėjo turbino galią taip pat galima išreikšti:

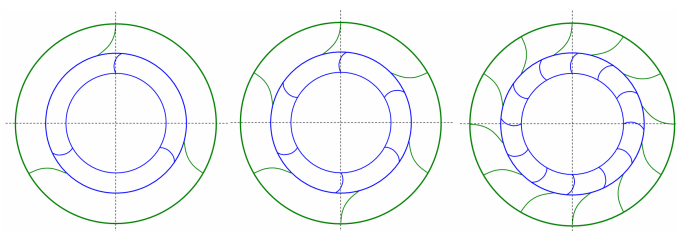
$$P_{turbinos} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3. \quad (14)$$

čia ρ – oro tankis [$\sim 1,225 \text{ kg/m}^3$], A – vėjo elektrinės rotorius plotas [1 m^2], C_p – rotorius galios koeficientas.

Iš aukščiau pateiktų formulių momentą T galima išreikšti:

$$T = \frac{1}{2 \cdot \omega} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (15)$$

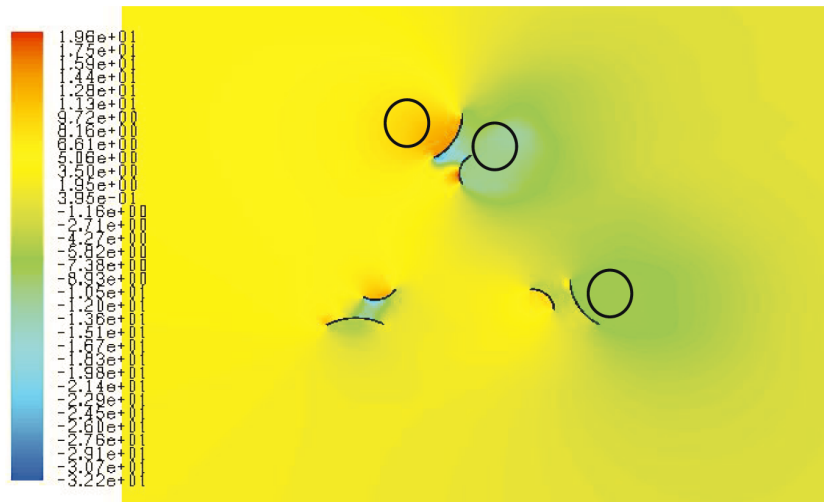
Tyrimų rezultatai buvo gauti analizuojant tų pačių matmenų, bet skirtingų konfigūracijų (3, 6 ir 12 menčių) rotorius (49 pav.), esant 4 m/s oro srauto greičiui. Rotorius greitaieigiškumas (λ) buvo keičiamas nuo 0 iki 0,6 kas 0,1. Rotorius spindulys visais atvejais buvo 0,7 m, o aukštis 1 m.



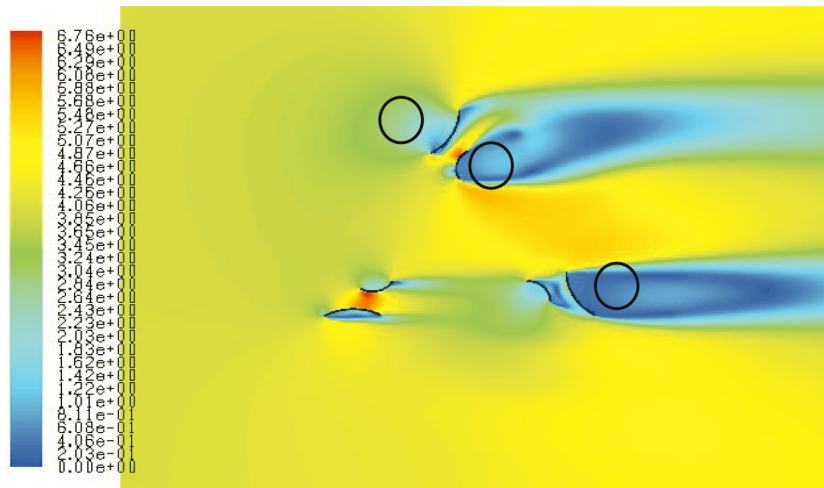
49 pav. 3, 6, 12 menčių skersinio srauto vėjo elektrinių turbinos

4.5.2. Skersinio srauto 3 menčių vėjo elektrinės turbinos tyrimo rezultatai

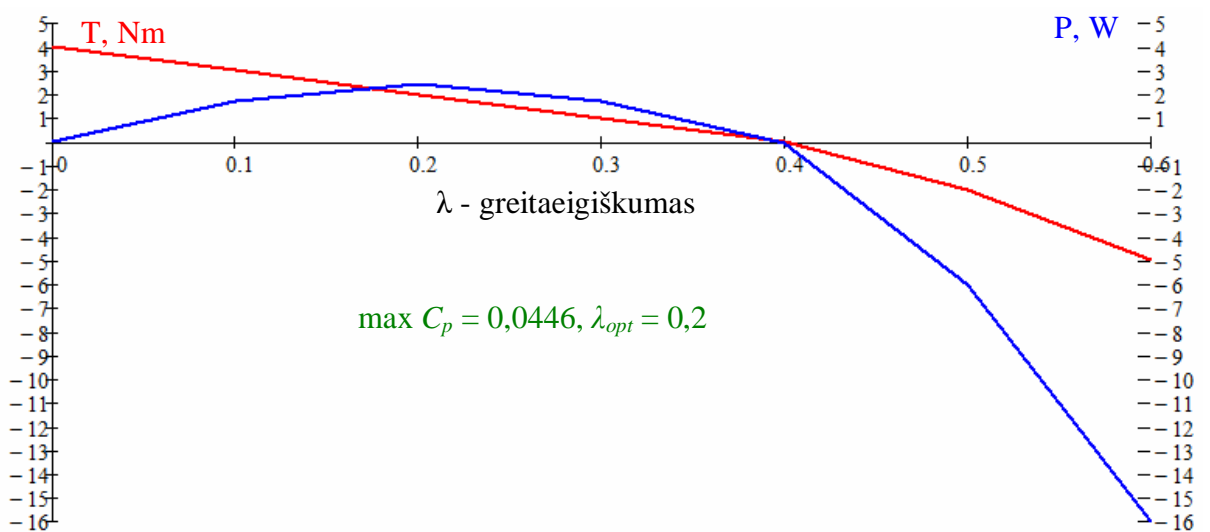
Tyrimo rezultatai pateikti 50-52 paveiksluose.



50 pav. 3 menčių turbinos statinio slėgio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui



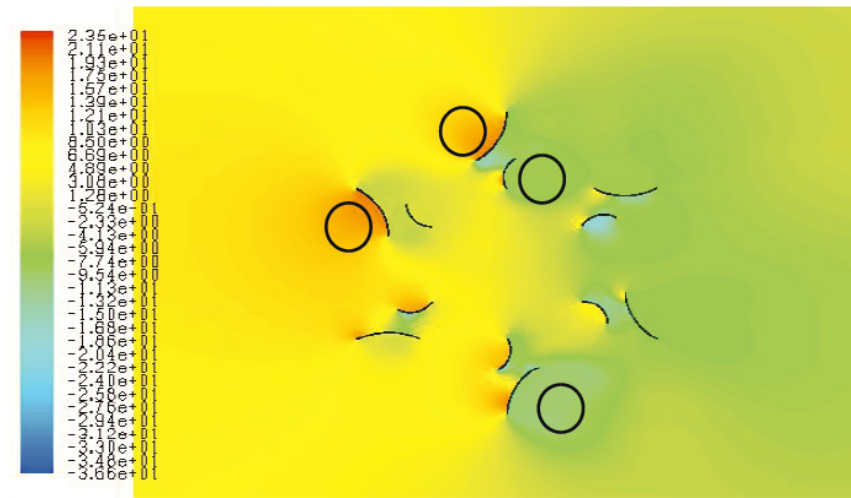
51 pav. 3 menčių turbinos oro greičio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui



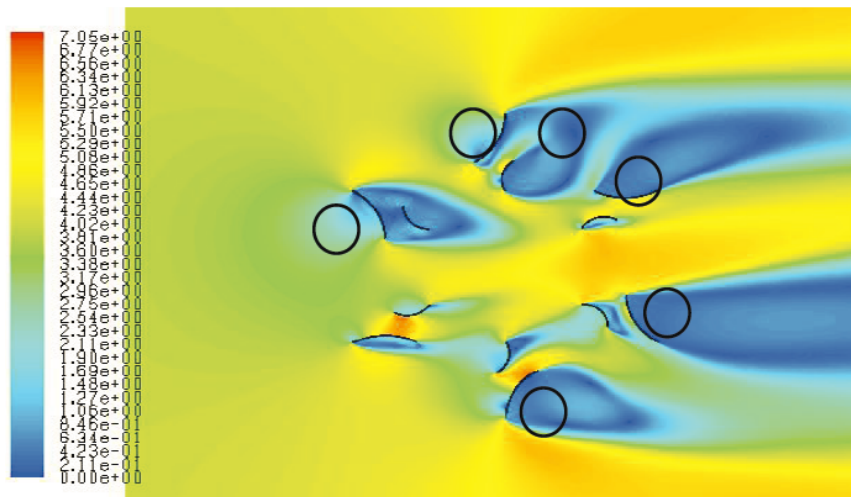
52 pav. 3 menčių turbinos momento ir generuojamos galios priklausomybė nuo greitaeigiškumo

4.5.3. Skersinio srauto 6 menčių vėjo elektrinės turbinos tyrimo rezultatai

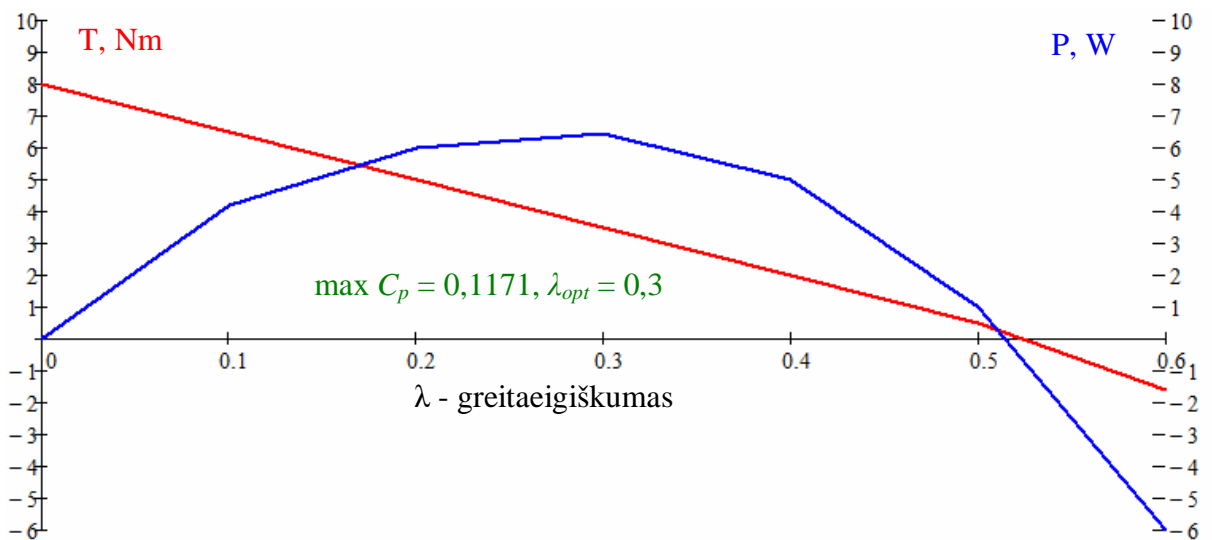
Tyrimo rezultatai pateikti 53-55 paveiksluose.



53 pav. 6 menčių turbinos statinio slėgio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui



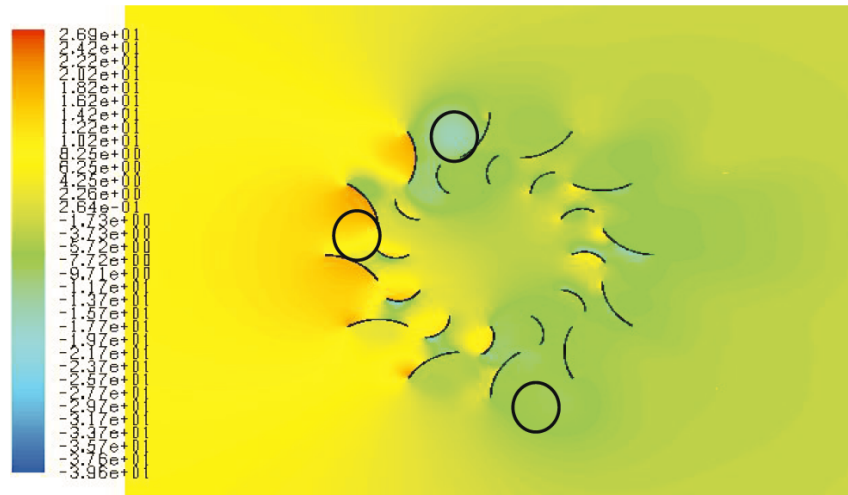
54 pav. 6 menčių turbinos oro greičio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui



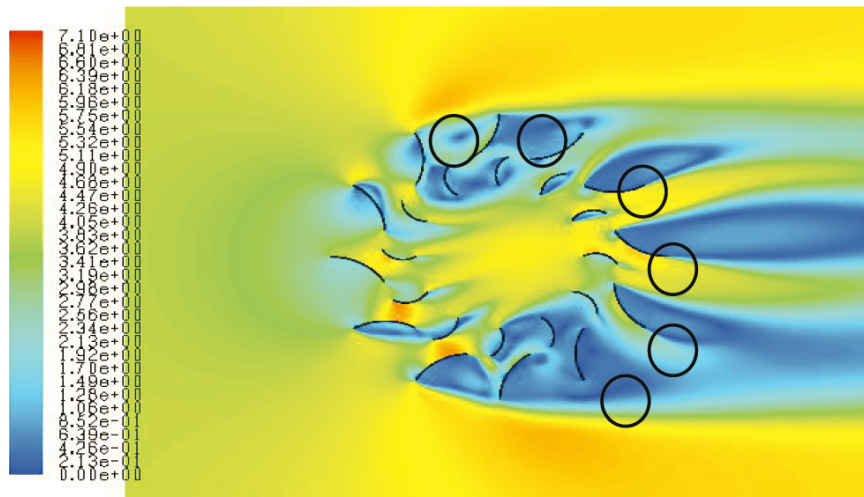
55 pav. 6 menčių turbinos momento ir generuojamos galios priklausomybė nuo greitaeigiškumo

4.5.4. Skersinio srauto 12 menčių turbinos tyrimo rezultatai

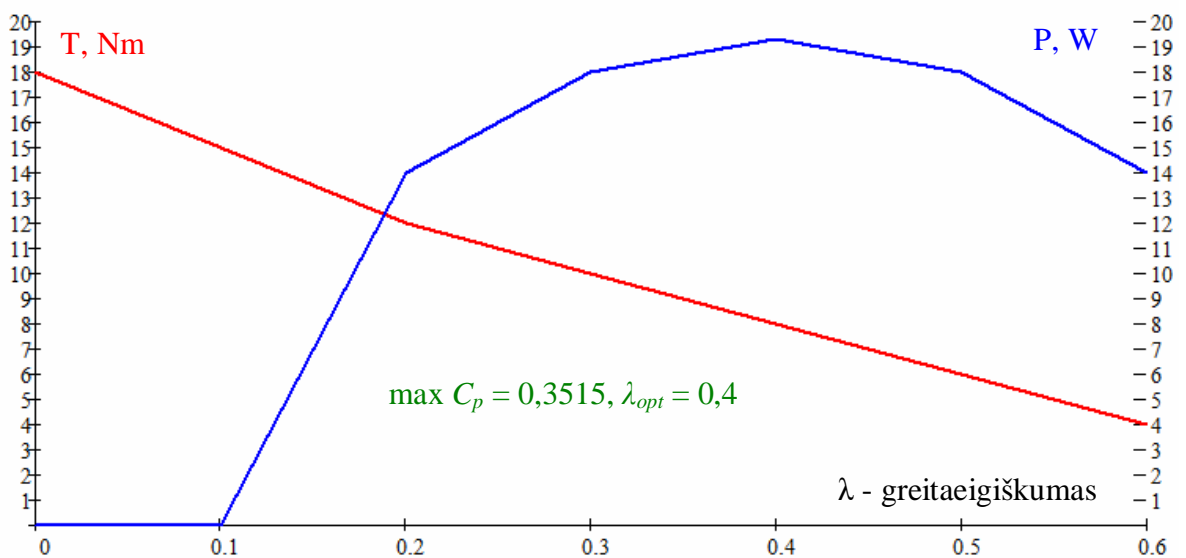
Tyrimo rezultatai pateikti 56-58 paveiksluose.



56 pav. 12 menčių turbinos statinio slėgio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui



57 pav. 12 menčių turbinos oro greičio kontūrai esant 4 m/s oro srauto greičiui



58 pav. 12 menčių turbinos momento ir generuojamos galios priklausomybė nuo greitaeigiškumo

4.5.5. Skersinio srauto turbinų tyrimo rezultatai

12 menčių turbinos rezultatai

Statinio slėgio kontūrai (56pav.) (juodu apskritimu pažymėti apskritimai) rodo žemo slėgio vietas. Šio žemo slėgio vietos sukelia tekančio srauto sutrikimus, kurie lemia antrinių srautų sukūrimą, pavyzdžiui, recirkuliavimo, kurie yra žalingi energijos perdavimo procese.

Greičio kontūrai (57pav.) rodo, kurias vėjo turbinos vietas apteka aukšto lygio srautas, tačiau aiškiai matoma, kad mažų greičių srautai susidaro už menčių. Tai vyksta dėl menčių statmenos orientacijos į ateinantį oro srautą. Galima pastebėti, kad kraštuose esančių menčių zonose srauto greitis sumažėjęs, o tai trukdo oro srauto patekti į gretimus menčių koridorius, todėl sudaro mažo greičio zonas.

Rotoriaus sukimausi veikia mentės, orientuotos į ateinantį srautą. Slėgio skirtumas tarp statoriaus menčių didina ateinančio srauto greitį rotoriaus mentėms. Be to, aiškiai matyti, kad išorinės statoriaus mentės sukonzentruoja didesnę oro masės srautą, o tai dar padidina rotoriaus sukimo momentą.

56 paveiksle pavaizduotos sukimo momento ir galios priklausomybė nuo greitaigiškumo koeficiento. Čia λ buvo didinama nuo 0 iki 0,6 kas 0,1, kuri prilygsta rotoriaus kampiniam greičiui 0; 0,57; 1,14; 1,71; 2,29; 2,86; 3,43 rad/s atitinkamai.

56 paveiksle matyti, kad sukamojo momento reikšmės mažėja, didėjant vėjo rotoriaus sukimosi greičiui. Turbina generuoja maksimalų sukimo momentą 18,2Nm. Iš turbinos galios kreivės matyti, kad optimalus greitaigiškumo koeficientas $\lambda = 0,4$ ir sukuriama maksimali 19,29 W galia. Didėjant greitaigiškumui, galia mažėja pastoviu greičiu. Remiantis šiais duomenimis turbinos optimalus kampinis greitis 1,71-2,86 rad/s.

6 menčių turbinos rezultatai

Šio tipo turbina mažiau sudėtinga, dėl mažesnio menčių kiekio tekančio srautams, tačiau slėgio ir greičio kitimo pobūdžiai tie patys.

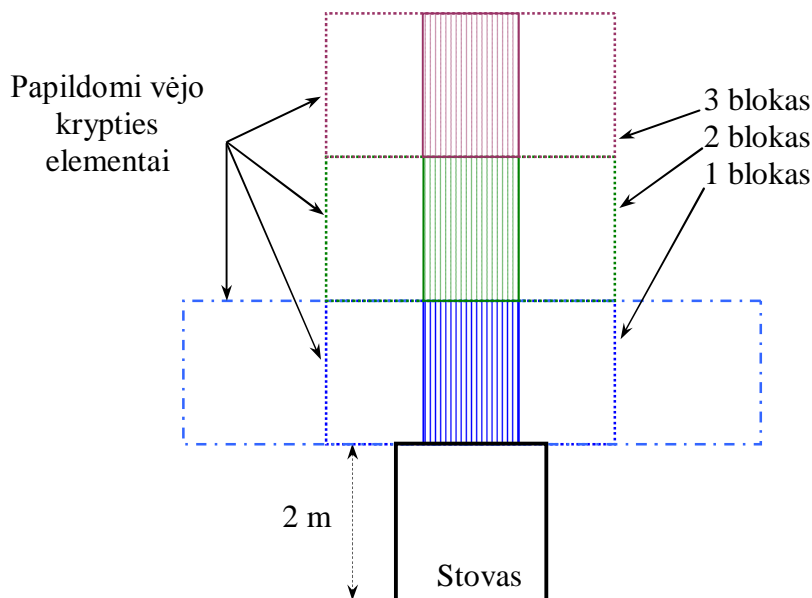
55 paveiksle matyti, kad turbina generuoja maksimalų sukimo momentą 8,3 Nm. Iš turbinos galios kreivės matyti, kad optimalus greitaigiškumo koeficientas $\lambda = 0,3$ ir sukuriama maksimali 6,43 W galia.

3 menčių turbinos rezultatai

Tai paprasčiausia konstrukcija. Paveiksle matyti, kad turbina generuoja maksimalų sukimo momentą 3,32 Nm. Iš turbinos galios kreivės matyti, kad optimalus greitaigiškumo koeficientas $\lambda = 0,2$ ir sukuriama maksimali 2,45 W galia.

4.6. Skersinio srauto vėjo elektrinės pasirinkimas

FTC ZWYND™ įmonė vartotojams siūlo labai platų vertikalios ašies vėjo turbinų pasirinkimą - nuo 2,5 kW iki 250 kW [14]. Siūlomose vėjo elektrinėse naudojami naujos kartos lėtaeigiai Neodiniumo (Ne-Fe-Br) magnetų generatoriai. Siūloma konstrukcija neturi brangiai kainuojančių ir reikalaujančių aptarnavimo reduktorių. Vėjo turbino rotorius tvirtinamas tiesiai prie generatoriaus. Konstrukcija paprasta, patikima, ilgaamžė ir nereikalauja kasdienės priežiūros. Šių vėjo elektrinių pagrindinis privalumas tai, kad nereikia orientavimo sistemos į vėją. Rotoriaus sukimosi greitis leidžia panaudoti visų krypčių ir labai gūsingus vėjus. Šių vėjo turbinų naudingumo koeficientas siekia 45%, jos gali dirbti esant silpnam vėjui, nekelti jokio triukšmo, mirgėjimų ir žemo dažnio virpesių. Šių turbinų sukimo momentas labai didelis, bet mažas greitaeigiškumas ($\lambda \sim 0,5$). Vėjo turbinų statymo aukštis nedidelis, nereikia kelti aukštai nuo žemės, jos labai gerai veikia nelygaus reljefo vietovėse ar tarp pastatų. Pagrindinis turbinų privalumas tas, kad galima surinkinėti atskiromis dalimis, kurios leidžia padidinti jau pastatytos vėjo turbino galingumą, nes atskiros dalys gali veikti ir savarankiškai nesujungti į bendrą sistemą (59 pav.). Galimas elektrinės surinkimas tiek į plotį, tiek į aukštį. Papildomi vėjo krypties elementai projektuojami pagal užsakovo reikalavimus norimam galingumui. Krypties elemento plotas projektuojamas nuo 3 iki 6 kartų didesnis už rotoriaus plotą.

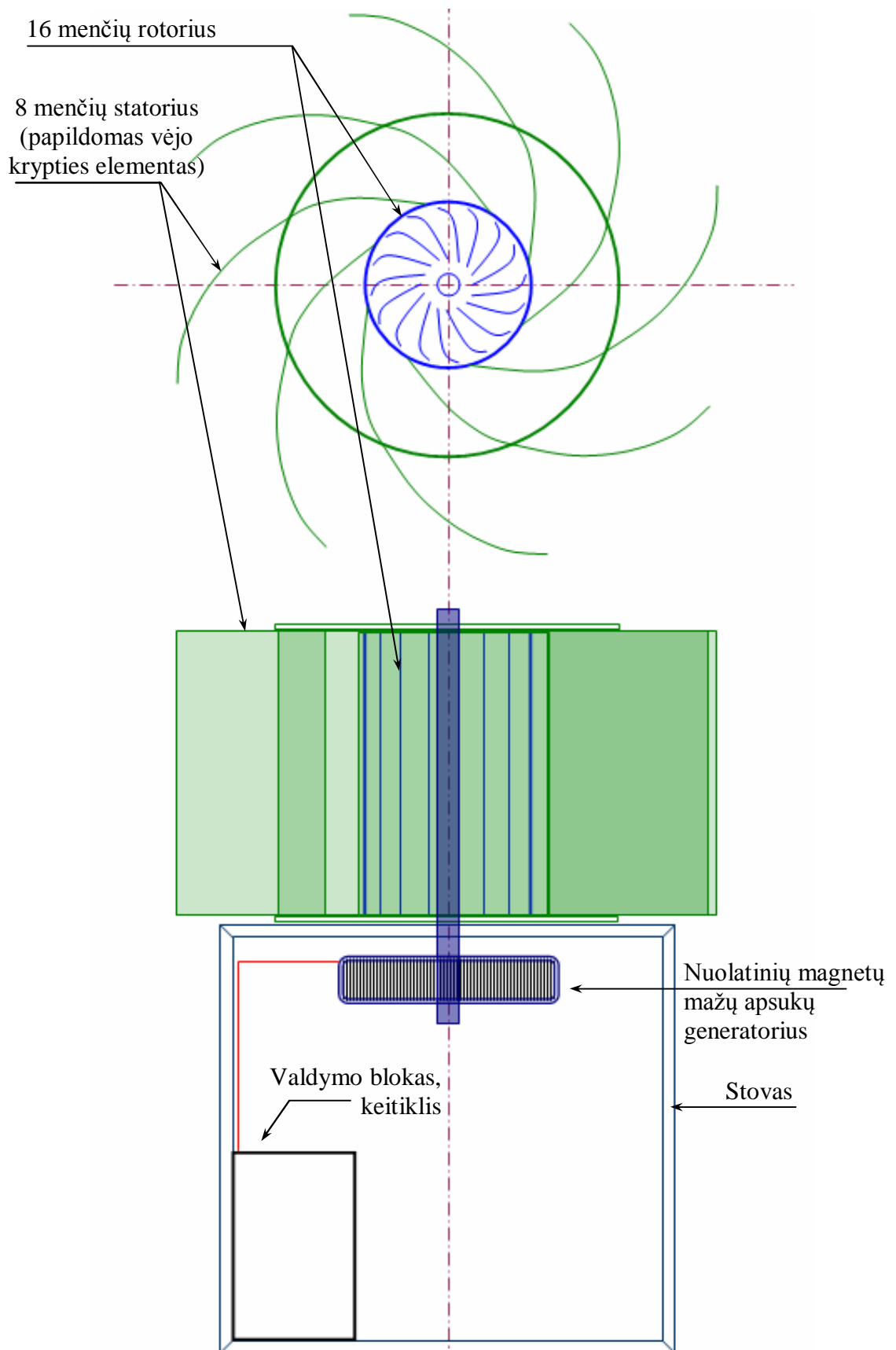


59 pav. Skersinio srauto vėjo elektrinės konstrukcinė schema

Transportavimo, montavimo, eksploatacijos išlaidos labai nedidelės. Tokio tipo vėjo turbino labai gerai dirba gyvenamose vietovėse. Vertikalios ašies elektrinių sklaidžiamas garsas siekia 8 dB(A). O vėjo turbino aukštis paprastai ne didesnis kaip 10 m, tai priklauso nuo vietovės ir pasirinkto galingumo.

4.6.1. Skersinio srauto FTC vėjo elektrinių konstrukcija

FTC ZWYNDTM vėjo elektrinės konstrukcinė schema pateikta 60 paveiksle.



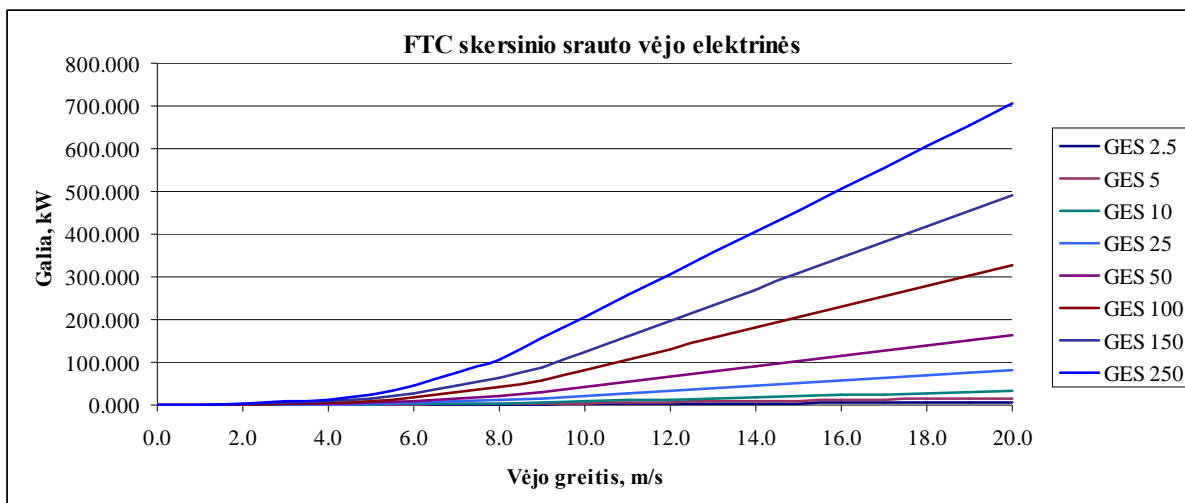
60 pav. Skersinio srauto FTC vėjo elektrinės konstrukcinė schema

4.6.2. Skersinio srauto FTC vėjo elektrinių pradinis įvertinimas

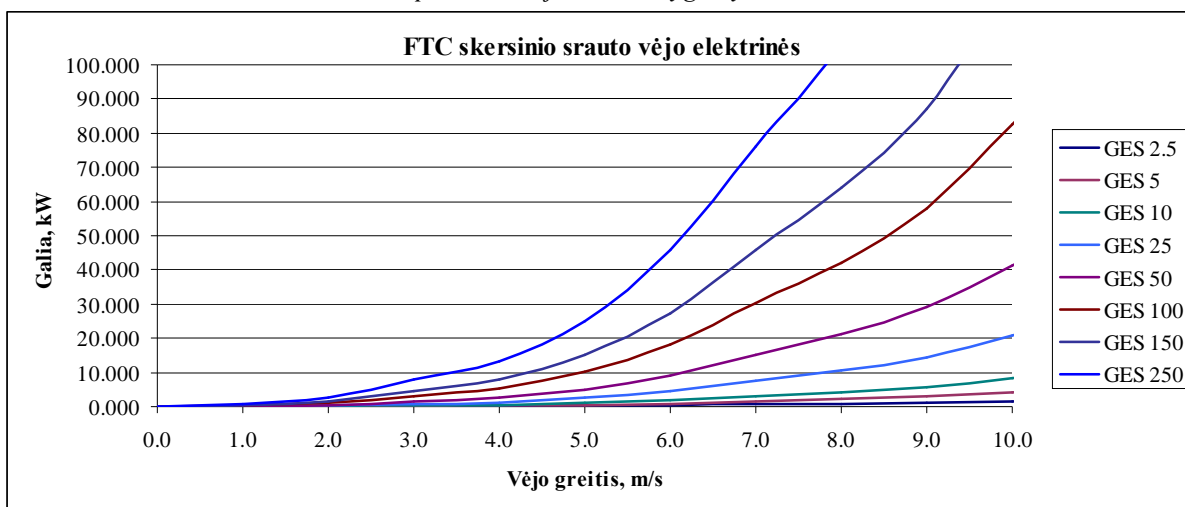
FTC ZWYND™ vėjo elektrinių pradinio vertinimo rezultatai pateikti 29 lentelėje ir 61 ir 62 paveiksluose.

29 lentelė. Pagrindiniai FTC vėjo elektrinių parametrai

Nr.	Vėjo elektrinės pavadinimas	Pradinis vėjo greitis, m/s	Nominalus vėjo greitis, m/s	Stabdymo vėjo greitis, m/s	Turbinos tipas	A_R elektrinės rotoriaus plotas, m ²
1	FTC ZWYND™ 2.5 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	0,7
2	FTC ZWYND™ 5 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	1,39
3	FTC ZWYND™ 10 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	1,86
4	FTC ZWYND™ 25 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	2,23
5	FTC ZWYND™ 50 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	2,79
6	FTC ZWYND™ 100 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	3,25
7	FTC ZWYND™ 150 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	3,90
8	FTC ZWYND™ 250 kW	1	—	67	VAVE, 16 menčių	5,20



61 pav. FTC vėjo elektrinių galių kreivės



62 pav. FTC vėjo elektrinių galių kreivės iki 10 m/s vėjo greičiui

30 lentelėje pateikiami analogiškai suskaičiuotų FTC ZWYND™ elektrinių pagaminamų energijos kiekių rezultatai

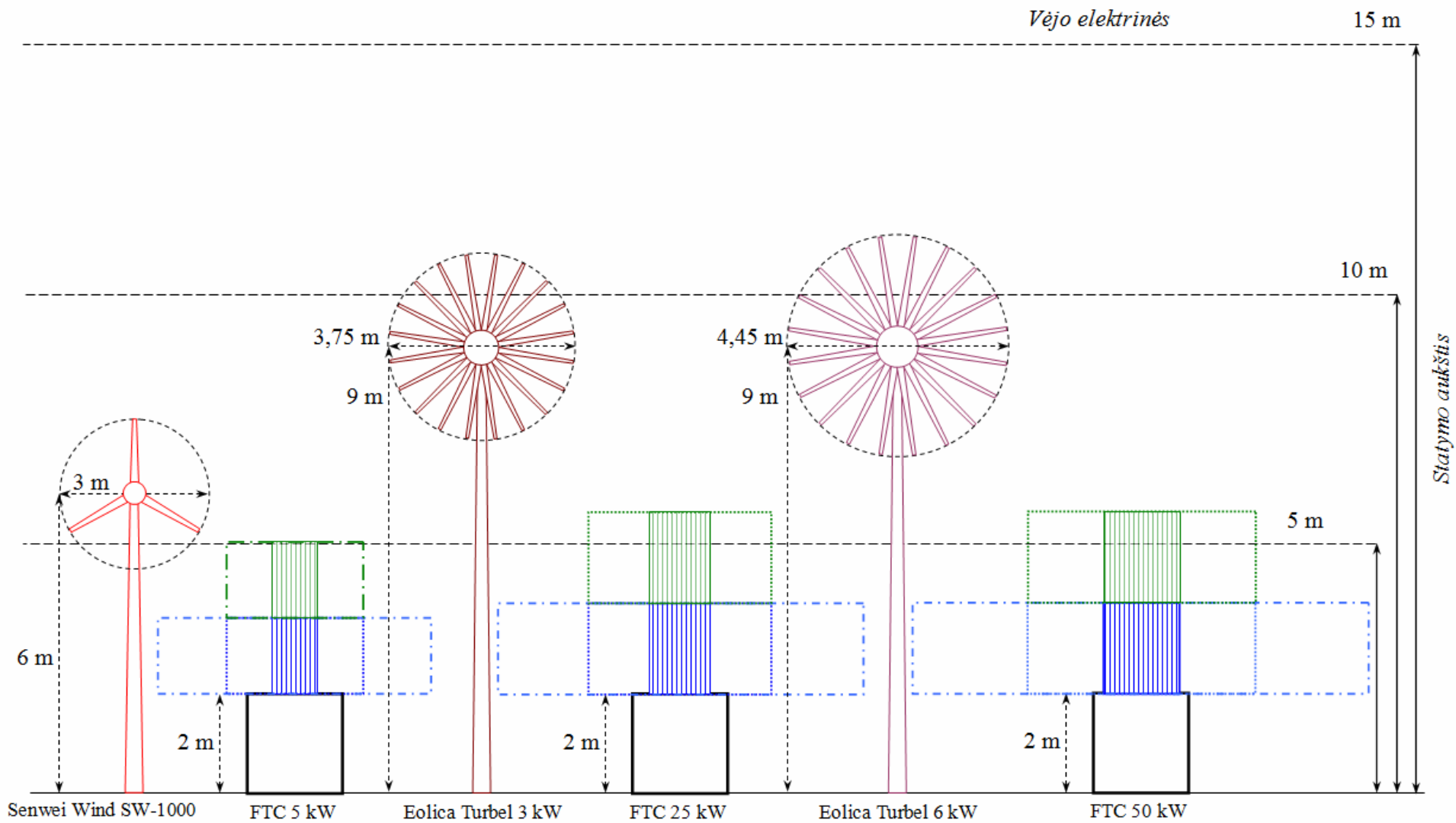
30 lentelė. FTC elektrinių pagaminamos energijos kiekių (kWh/m) skaičiavimo rezultatai

Vietovė	Situacijos	FTC ZWYND™ 2.5 kW	FTC ZWYND™ 5 kW	FTC ZWYND™ 10 kW	FTC ZWYND™ 25 kW	FTC ZWYND™ 50 kW	FTC ZWYND™ 100 kW	FTC ZWYND™ 150 kW	FTC ZWYND™ 250 kW
Nida	1	5000	12273	24554	61479	122919	245303	368781	606485
	2	204	500	1002	2515	5028	10058	15086	25154
	3	445	1089	2181	5468	10932	21869	32801	54676
	4	2076	5099	10201	25555	51092	101629	153289	255503
Kaunas	1	1524	3740	7483	18754	37495	74843	112499	188293
	2	150	369	739	1863	3726	7456	11181	18649
	3	150	369	739	1863	3726	7456	11181	18649
	4	584	1432	2868	7194	14386	28777	43163	71953
Utena	1	770	1889	3782	9491	18980	37941	56950	95029
	2	52	125	253	652	1309	2620	3938	6565
	3	52	125	253	652	1309	2620	3938	6565
	4	348	854	1712	4306	8614	17233	25850	43104
Telšiai	1	666	1634	3273	8215	16426	32855	49287	82179
	2	53	130	261	671	1347	2696	4051	6752
	3	53	130	261	671	1347	2696	4051	6752
	4	387	950	1904	4786	9572	19149	28721	47893
Tauragė	1	567	1390	2785	6997	13993	27989	41990	70016
	2	59	144	292	751	1508	3018	4537	7564
	3	59	144	292	751	1508	3018	4537	7564
	4	207	507	1017	2568	5140	10285	15427	25729
Varėna	1	475	1163	2331	5861	11723	23451	35180	58655
	2	65	158	319	821	1649	3301	4963	8272
	3	65	158	319	821	1649	3301	4963	8272
	4	214	522	1048	2649	5302	10608	15913	26540
A_R, m^2		0,7	1,39	1,86	2,23	2,79	3,25	3,90	5,20

Pasirinktų vėjo elektrinių palyginimas pagal turbinų plotus pateiktas 31 lentelėje.

31 lentelė. Vėjo elektrinių pagaminamos energijos kiekių (kWh/m) skaičiavimo rezultatai

Vietovė	Situacijos	FTC ZWYND™ 5 kW		Senwei Wind SW-1000		FTC ZWYND™ 25 kW		Eolica Turbel 3 kW		FTC ZWYND™ 50 kW		Eolica Turbel 6 kW	
Nida	1	12273	5052			61479	12917			122919	25459		
	2	500	458			2515	1366			5028	3115		
	3	1089	1105			5468	2659			10932	5643		
	4	5099	3346			25555	7959			51092	16097		
Kaunas	1	3740	2646			18754	6543			37495	13677		
	2	369	162			1863	937			3726	2627		
	3	369	162			1863	937			3726	2627		
	4	1432	1381			7194	3556			14386	7804		
Utena	1	1889	1521			9491	4092			18980	9141		
	2	125	0			652	311			1309	1209		
	3	125	0			652	311			1309	1209		
	4	854	672			4306	2288			8614	5588		
Telšiai	1	1634	1378			8215	3851			16426	8742		
	2	130	0			671	329			1347	1248		
	3	130	0			671	329			1347	1248		
	4	950	751			4786	2552			9572	6185		
Tauragė	1	1390	1127			6997	3308			13993	7719		
	2	144	0			751	360			1508	1393		
	3	144	0			751	360			1508	1393		
	4	507	208			2568	1284			5140	3702		
Varėna	1	1163	906			5861	2864			11723	6910		
	2	158	0			821	392			1649	1523		
	3	158	0			821	392			1649	1523		
	4	522	209			2649	1321			5302	3845		
A_R, m²		1,39	7,07			2,23	11,04			2,79	15,21		
A_T, m²		4,18/8.36	7,07			6,69/13.38	11,04			8.36/16.72	15,21		



63 pav. Pasirinktų vėjo elektrinių palyginimas pagal statymo aukščius

4.6.3. Skersinio srauto FTC vėjo elektrinių generuojamos galios įvertinimas

32 lentelė. FTC ZWYND™ vėjo elektrinių techniniai duomenys

Nr.	Vėjo elektrinės pavadinimas	Turbinos ir generatoriaus svoris, kg	Rotoriaus aukštis, m	Rotoriaus diametras, m	A_R elektrinės rotoriaus plotas, m ²	A_{Tmin} minimalus elektrinės turbinos plotas, m ²	A_{Tmax} maksimalus elektrinės turbinos plotas, m ²
1	FTC ZWYND™ 2.5 kW	84	1,524	0,457	0,7	2,09	4,18
2	FTC ZWYND™ 5 kW	170	1,524	0,914	1,39	4,18	8,36
3	FTC ZWYND™ 10 kW	204	1,524	1,219	1,86	5,57	11,15
4	FTC ZWYND™ 25 kW	306	1,829	1,219	2,23	6,69	13,38
5	FTC ZWYND™ 50 kW	373	1,829	1,524	2,79	8,36	16,72
6	FTC ZWYND™ 100 kW	541	2,134	1,524	3,25	9,76	19,51
7	FTC ZWYND™ 150 kW	630	2,134	1,829	3,90	11,71	23,42
8	FTC ZWYND™ 250 kW	748	2,438	2,134	5,20	15,61	31,22

Kaip matyti iš pateiktų rezultatų, šio tipo turbina neturi nominalaus vėjo greičio, generuojama galia neribojama didėjant vėjo greičiui (61 pav. ir 62 pav.). Skirtingų galių rotorijų plotai mažesni nei lyginamųjų elektrinių rotorijų plotai (63 pav.). 31 lentelėje pateikti pasirinktų vėjo elektrinių pagaminamos energijos kiekių rezultatai. Kiekvienos galios klasės (1 kW, 3 kW ir 5 kW) išrinktom vėjo elektrinėms atitinkamai parinktos skersinio srauto vėjo elektrinės pagal artimus maksimalius turbina plotus. Pagal elektrinių pagaminamos energijos kiekių palyginimo rezultatus, visose pateiktose situacijose parinktų FTC vėjo elektrinių pagaminamų energijų kiekių reikšmės didesnės, o kartais viršija du kartus ir daugiau.

63 paveiksle pavaizduotos pasirinktos vėjo elektrinės pagal jų statymo aukščius. Skersinio srauto vėjo elektrinių statymo aukštis apie 6 m, kai papildomai prijungti antri rotorijų blokai, norint išvengti turbina plėtimosi. Galimas šių elektrinių galių padvigubinimas, nes pagal statybos techninį reglamentą, vėjo energijos statinys yra ne aukštesnis kaip 10 m (į aukštį įskaičiuojamas ir mentės aukštis, kai mentė yra statmenoje padėtyje). Tokie statiniai priklauso pirmai nesudėtingų statinių statybos grupei. Tačiau šiuo atveju 3 kW ir 5 kW pasirinktos vėjo elektrinės "Eolica Turbel" šiai grupei nepriklauso, nes viršytas 10 m statymo aukštis. Skersinio srauto elektrinės absorbuoja turbulencinį srautą, todėl žemas statymas tik papildoma naudingų savybių sąrašą, nes per metus pagaminama 50% daugiau elektros energijos negu tokio pat galingumo horizontalios ašies vėjo elektrinės [1]. Kukio galingumo elektrinė reikalinga, parenkama pagal energijos poreikius.

33 lentelė. Šiaulių miesto metinis vėjo greičių pasiskirstymas valandomis (nustatytas naudojant apskaičiuotus Weibull'o parametrus)

Šiauliai	Sausis	Vasaris	Kovas	Balandis	Gegužė	Birželis	Liepa	Rugpjūtis	Rugsėjis	Spalis	Lapkritis	Gruodis
Vėjo greitis, m/s	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.	Vėjo greičių pasiskirstymas valandomis, H/mėn.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	66	65	82	104	81	98	107	118	91	92	36	81
2	118	113	134	152	129	160	155	174	133	142	85	129
3	141	131	149	153	143	166	157	169	139	151	125	143
4	135	122	133	124	129	131	127	127	120	130	140	130
5	110	96	101	84	100	84	87	78	90	95	127	100
6	77	65	66	49	68	44	52	39	60	61	95	68
7	47	39	38	25	42	19	27	17	36	34	59	41
8	25	20	19	11	23	7	12	6	20	17	31	23
9	12	10	9	4	11	2	5	2	10	8	14	11
10	5	4	4	2	5	1	2	1	5	3	5	5
11	2	1	1	0	2	0	1	0	2	1	1	2
12	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

33 lentelėje pateikti Šiaulių mieto kiekvieno mėnesio vėjo greičių pasiskirstymas valandomis. 34 lentelėje apskaičiuoti nagrinėjamų vėjo elektrinių mėnesiniai energijos kiekiai. 35 lentelėje pateikti 150 m² namo ploto mėnesiniai energetiniai poreikiai. Pagal pateiktus rezultatus matosi, kad FTC ZWYND™ 25 kW skersinio srauto vėjo elektrinė pilnai patenkina energetinius poreikius.

34 lentelė. FTC vėjo elektrinių pagaminamos energijos kiekių (kWh/mėn.) skaičiavimo rezultatai

Mėnesiai	FTC ZWYND™ 2.5 kW	FTC ZWYND™ 5 kW	FTC ZWYND™ 10 kW	FTC ZWYND™ 25 kW	FTC ZWYND™ 50 kW	FTC ZWYND™ 100 kW	FTC ZWYND™ 150 kW	FTC ZWYND™ 250 kW
1	158	387	775	1941	3880	7742	11641	19495
2	130	319	639	1601	3200	6386	9601	16106
3	132	323	646	1620	3239	6464	9717	16288
4	95	233	467	1171	2342	4677	7028	11760
5	146	359	717	1798	3594	7173	10785	18056
6	84	205	411	1031	2062	4120	6188	10338
7	103	253	506	1268	2535	5062	7607	12725
8	79	193	386	969	1939	3873	5817	9719
9	132	325	651	1630	3260	6506	9781	16371
10	121	298	597	1495	2989	5967	8970	15031
11	177	434	868	2174	4347	8672	13042	21887
12	146	357	715	1791	3582	7147	10747	17993

35 lentelė. 150 m² namo ploto mėnesiniai energetiniai poreikiai

Metai	Vidutinė oro lauko temperatūra, °C	Dienos per mėnesį	Faktinės šildymo valandos per parą, h	Per parą karšto vandens ruošimui, h	Per mėnesį šildymui, h	Per mėnesį karšto vandens ruošimui, h	Elektros suvartojimas šildymui, kWh/mėn.	Elektros suvartojimas karšto vandens ruošimui, kWh/mėn.	Elektros suvartojimas elektros įrenginiams, kWh/mėn.	Bendras elektros suvartojimas, kWh/mėn.
Sausis	-5,5	31	15	3,5	465	108,5	907	212	450	1569
Vasaris	-4,5	28	13	3,5	364	98	710	191	450	1351
Kovas	-0,1	31	8	3,5	248	109	484	212	450	1146
Balandis	6,4	30	4	3,5	120	105	234	205	450	889
Gegužė	13,3	31	0	2,5	0	77,5	0	151	450	601
Birželis	16,7	30	0	2,0	0	60	0	117	450	567
Liepa	18,0	31	0	1,5	0	46,5	0	91	450	541
Rugpjūtis	17,0	31	0	1,0	0	31	0	60	450	510
Rugsėjis	12,3	30	0	3,5	0	105	0	205	450	655
Spalis	7,2	31	3	3,5	93	108,5	181	212	450	843
Lapkritis	1,9	30	7	3,5	210	105	410	205	450	1065
Gruodis	-2,2	31	12	3,5	372	108,5	725	212	450	1387

4.6.4. Skersinio srauto vėjo elektrinių privalumai ir trūkumai

Pagrindiniai šių elektrinių privalumai:

- Efektyviai veikia esant net ir mažiems vėjo greičiams.
- Naudojama magnetinė levitacija - vėjo elektrinės pradinis vėjo greitis 0,89 m/s.
- Mažas triukšmingumas - nėra žalingų žemo dažnio harmonikų, beveik nėra vibracijos. nekelia žalos pastato stogams ir žmonėms, esantiems viduje.
- Generatorius be pavaros - nenaudojami krumpliaračiai, diržai ir nepatogūs stabdymo įtaisai.
- Praktiškai nėra eksploatacijos apribojimų, nes stabdymo vėjo greitis apie 50m/s.
- Konstrukcija paprasta, patikima ir nereikalaujanti ypatingo aptarnavimo.
- Eksploatacijos trukmė apie 20-30 metų.
- Greitas montavimas ir išmontavimas.
- Žemas aerodinaminis triukšmingumas, nesukelia girdimo triukšmo. Skleidžiamas garsas siekia 8dB.
- Mažesni paleidimo greičiai nei horizontalios ašies vėjo elektrinių.
- Žema statymo konstrukcija, nereikia labai aukštų ir brangių keliamųjų kranų ir kvalifikuotų operatorių.
- Šio tipo elektrinės dėl žemo statymo aukščio tinka vietovėms, kur nėra galimybės statyti aukštų elektrinių.
- Nereikalinga papildoma orientavimo į vėjo kryptį sistema. Šio tipo vėjo elektrinės veikia esant įvairioms vėjo kryptims, todėl elektrinės gamina energiją esant bet kurios krypties vėjui.
- Veikia be pertrūkių net ir esant gūsingomis vėjo sąlygomis.
- Pagrindiniai elektrinės elementai montuojami ant elektrinės pamato.
- Vienos judančios dalies konstrukcija.
- Dėl didelio rotoriaus menčių skaičiaus ir žemo statymo aukščio nesukelia mirgėjimo efekto.
- Elektrinės galima surinkti atskirais moduliais, kurie leidžia padidinti elektrinės galingumą, taip pat atskiri moduliai gali veikti savarankiškai nesujungti į bendrą sistemą.
- Ekologiška - paukščių ir šikšnosparniai gali aptikti turbinas ir išvengti susidūrimo.
- Elektrinių naudingumo koeficientas siekia 39-45%, o mechaninę energiją verčiant į elektrinę naudingumas pasiekiamas 90-97%.

- Labai didelis sukimo momentas.
- Dėl Magnuso efekto nepavojingas apledėjimas.
- Elektrinės gerai veikia net ir turbulentinėmis sąlygomis, todėl per metus pagamina 30-50% daugiau elektros energijos negu tokio pat galingumo horizontalios ašies vėjo elektrinės.
- Ekonominiu bei techniniu požiūriu vertikalios ašies vėjo elektrinių gamyba labai pigi.
- Transportavimo ir montavimo bei priežiūros, eksploatacijos išlaidos labai mažos.
- Magnetinis pakėlimas užtikrina labai mažą sukimosi pasipriešinimą – tokiu būdu padidinamas efektyvumas.

Pagrindiniai trūkumai:

- Jos lėtaeigės, didesnių gabaritų.
- Didesnio galingumo vėjo turbina yra laikoma pakeltoje padėtyje magnetiniu būdu – ji veikia tyliai, tačiau ši sistema yra pakankamai sudėtinga ir brangi.
- Mentės rotoriaus konstrukcijoje turi būti gaminamos iš lengvų, bet labai stiprių kompozitinių medžiagų arba iš lengvų stiprių metalų, kurių struktūra atlaikytų labai stiprius vėjus.
- Rotorių greitaigiškumas kinta siaurame intervale, todėl būtina jautri valdymo sistema.
- Vėjo greitis arčiau žemės paviršiaus yra mažesnis, todėl žemos konstrukcijos rotoriaus apatinę dalį veiks mažesni vėjo greičiai.

Išvados

1. Mažoji vėjo energetika sparčiai vystoma ir vertinama kaip viena iš pagrindinių priemonių sprendžiant tiek ekonomines, tiek ir ekologines problemas.
2. Matavimo stotys Lietuvos miestuose leidžia pakankamai tiksliai fiksuoti ilgalaikius vėjo energetinius parametrus.
3. Prieš pasirenkant vėjo elektrinę, būtina atlikti papildomus pasirinktos vietovės vėjo energijos parametrų matavimus ir įvertinti Weibull'o skirstinio parametrus, kurie leidžia tinkamai parinkti elektrinės tipą ir prognozuoti energijos gamybą.
4. Šiaulių miesto vėjo greičio duomenų statistinė analizė parodė, kad vėjo pulsacijos pakankamai didelės, kad didžiausias vidutinis vėjo greitis buvo lapkričio mėnesį - 4.450 m/s, o mažiausias rugpjūčio mėnesį - 3,092 m/s. Analizuojant dažniausiai pasirodančius vėjo greičius, reikšmių dydžiai mažesni - lapkričio mėnesį - 4.004 m/s, rugpjūčio mėnesį - 2,387 m/s. Metinis vidutinis vėjo greitis - 3,629 m/s.
5. Pateikta skaičiavimo metodika ir išanalizuoti svarbiausi parametrai, kuriuos reikia žinoti vertinant vėjo elektrines ir parenkant optimaliausią vėjo elektrinę.

Literatūra

1. Adomavičius V., Balčiūnas P. Kai kurios galimybės mažųjų vėjo elektrinių efektyvumui padidinti // Energetika. 2003. Nr. 1. P. 38–45.
2. Birgiolas E., Katinas V. Vėjo srauto parametrų kitimo dėsningumų tyrimas Lietuvos pajūryje // Energetika. 2006. Nr. 2. P. 29–33.
3. Gulbinas A. Vėjaračiai nedidelės galios vertikaliosios ašies vėjo jėgainei // Energetika. 2009. Nr. 4. P. 214–219.
4. Katinas V., Markevičius A., Burlakovas A. Vėjo energetika ir jos artimiausia perspektyva Lietuvoje // Energetika. 2006. Nr. 3. P. 67–76.
5. Katinas V., Markevičius A. Vėjo energijos išteklių ir stebėjimo postų kūrimas Lietuvoje // Energetika. 2001. Nr. 2. P. 45–50.
6. Katinas V., Tumosa A. Vėjo energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje. Vilnius: VI "Energetikos agentūra", Energijos taupymo programos direkcija, 1995. 38 p.
7. Marčiukaitis M., Marčiukaitienė R., Tumosa A. Vėjo greičio kitimo dėsningumų Lietuvos pajūrio regione tyrimas // Energetika. 2009. Nr. 1. P. 27–34.
8. Markevičius A., Katinas V. Vėjo energetikos plėtros tendencijos // Energetika. 2003. Nr. 1. P. 22–27.
9. Navardauskas E., Deveikis T. Vėjo elektrinių gaminamos energijos kiekio ir atsiperkamumo įvertinimas // „Elektros ir valdymo technologijos“ 2006, Kaunas, 2006. p. 55-60
10. Petrauskas G., Adomavičius V. Vėjo energijos išteklių ir jėgainių techninių ekonominių rodiklių įvertinimas projektavimo stadijoje // Energetika. 2001. Nr. 2. P. 51–55.
11. Petrauskas G. Modernių vėjo jėgainių savybės ir plėtojimo perspektyvos // Energetika. 2001. Nr. 2. P. 51–55.
12. <http://www.laiea.lt/>
13. Industrial Wind Turbines, Infrasound and VibroAcoustic Disease (VAD)
14. www.ftcenergy.com/
15. Colley, G.R., Mishra, Rakesh, Rao, H.V. and Woolhead, R (2009) Performance evaluation of three cross flow vertical axis wind turbine configurations. In: Proceedings of Computing and Engineering Annual Researchers' Conference 2009: CEARC'09. University of Huddersfield, Huddersfield, pp. 130-136. ISBN 9781862180857