

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
FIZIKOS KATEDRA

Renatas Liberis

Fizikos informatikos specialybės IV kurso studentas

**JĖGOS AITVARO GALIOS MODELIAVIMAS IR
GENERUOJAMOS ELEKTROS ENERGIJOS ĮVERTINIMAS,
OPTIMIZUOJANT JĖGOS AITVARO PARAMETRUS**

**FORCE MODELING OF POWER KITES AND ESTIMATION OF
GENERATING ELECTRIC ENERGY OPTIMIZING POWER KITES
PARAMETERS**

BAKALAURO DARBAS

Darbo vadovas:
doc. dr. Alfredas Lankauskas

Šiauliai, 2013

„Tvirtinu, jog darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota ir paruošta naudojant literatūros sąraše pateiktus informacinius šaltinius bei savo tyrimų duomenis“

Darbo autoriaus _____
(vardas, pavardė, parašas)

ANOTACIJA

Bakalauro baigiamąjį darbą „Jėgos aitvaro galios modeliavimas ir generuojamos elektros energijos įvertinimas, optimizuojant jėgos aitvaro parametrus“ sudaro 3 skyriai. Darbo apimtį sudaro 33 puslapiai, 23 paveikslėliai, 1 lentelė.

Įvade iškeliamas darbo problema, tikslai ir uždaviniai. Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros šaltinių analizė, kuriame analizuojami vėjo jėgainių tipai ir jėgos aitvaro vėjo jėgainės veikimo principas. Antrajame skyriuje pateikiama tyrimo metodika. Trečiajame skyriuje pateikti teorinių skaičiavimų ir eksperimentinių duomenų rezultatai ir jų analizė. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados apibendrinančios atliktą darbą.

SUMMARY

The final bachelor's work "Force modeling of power kites and estimation of generating electric energy optimizing power kites parameters" consist of three chapters. The work is made of 33 pages, 23 images and 1 table.

Problem of the research along with objectives and goals are provided in the introduction of this work. The first chapter provides analysis of literature about types of wind power plants and power kite power plants principle of operations. The second chapter is about research methodology. The third chapter provides theoretical calculations and experimental results and their analysis. At the end of the work there are conclusions summarizing the work.

Turinys

ĮVADAS	5
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ ANALIZĖ	8
1.1. Vėjo jėgainių tipai ir jų veikimo principai	8
1.1.1. Horizontalios ašies vėjo jėgainės	8
1.1.2. Vertikalios ašies vėjo jėgainės	10
1.2. Jėgos aitvarų vėjo jėgainių veikimo principas	12
1.2.1. Jėgos aitvaro veikimo aerodinaminis principas	12
1.2.2. Jėgos aitvaro valdymo principas	17
2. TYRIMO METODIKA	22
3. TYRIMO REZULTATAI	24
3.1. Teoriniai skaičiavimai.....	24
3.2. Eksperimento rezultatai	28
IŠVADOS	31
LITERATŪROS SĄRAŠAS	32

IVADAS

Jau nuo senų laikų, t.y. istorijos šaltinių teigimu, pirmieji vėjo malūnai buvo naudojami daugiau nei prieš 2000 metų Kinijoje, o pirmieji vėjo malūnai Europoje aprašyti ir atvaizduoti tik 833 metais, bet nieko nebuvo žinoma apie jo tipą, buvo pradėtas naudoti vėjas, kaip energijos šaltinis, galintis palengvinti žmonių buitį. [1] Pirmieji vėjo malūnai Europoje Viduržemio jūra atkeliavo į Olandiją ir nuo 1390 metų jie čia pradėti statyti ir naudoti. [2] Lietuvoje pirmieji vėjo malūnai buvo pradėti statyti nuo XVIII a. ir jie, kaip spėja istorikai, atkeliavo prekybiniais keliais per Baltijos jūrą. [3] Jie ir buvo pradėti statyti Baltijos jūros pakrantėje, o jų mentės buvo atsuktos vyraujančio vėjo kryptimi. Bėgant laikui vėjo malūnai evoliucionavo, atsirado stiebiniai malūnai, kurių liemuo gali atsisukti į vėją, o po to dar tobulesni – kepuriniai vėjo malūnai, kurių mentės pasukamos tik viršutine dalimi į vėją. Vėjo malūnų Lietuvoje atsirado labai daug, XX a. pirmoje pusėje jų priskaičiuota apie 900. [4]

Vėjo malūnų sistema buvo naudojama ne tik grūdų malimui, šimtus metų svarbiausias vėjo malūną naudojantis įrenginys buvo skirtas vandens pumpavimui, kurį naudojo fermose ir kaimeliuose, naudojant palyginus nedideles sistemas su vos vieno ar kelių metrų skersmens rotoriumi, o didesniais rotoriais, apie 18 metrų, buvo naudojami vandens pumpavimui garo traukiniams. Jungtinėse Amerikos valstijose tokie vėjo malūnai buvo pradėti statyti XIX a. ir kai kuriuose regionuose naudojami iki šių dienų. Jau per 1850 – 1970 metus Amerikoje jų buvo pastatyta apie 6 milijonus. [2]

Keičiantis laikams, keitėsi ir vėjo kinetinės energijos panaudojimo galimybės. 1888 metais JAV Ohajo valstijoje buvo pastatyta pirmoji vėjo jėgainė, kuri galėjo vėjo kinetinę energiją paversti į elektros energiją. [5] Nuo amerikiečių neatsiliko ir danai. Danijoje pirmoji vėjo jėgainė buvo pastatyta apie 1890 metus. Tokios pirmosios vėjo jėgainės buvo tvirtas žingsnis atsinaujinančios elektros energijos gamybos link. Vėjo kuriama elektros energija buvo naudojama II pasaulinio karo metu, kai teko elektra aprūpinti vietinius pagalbos centrus. [6]

Vėjo jėgainės evoliucionavo iš vėjo malūnų, bet pagrindinės jų dalys liko tos pačios, tik pasikeitė jų panaudojimo paskirtis. Vėjo malūnų pagrindinės dalys yra trys: tai mentės,

kaip energijos imtuvas, pavaros, kaip energijos perdavimo mechanizmas, ir girkos, kaip darbo įrankis. Vėjo jėgainių pagrindinės dalys yra labai panašios, bet turi kelis esminius skirtumus, energijos imtuvai išliko mentės, kurios vėjo kinetinę energiją paverčia mechanine energija. Taip pat labai svarbi vėjo jėgainių dalis yra generatorius, jis sukurtą mechaninę energiją paverčia elektros energija. [7]

Problemos, susijusios su iškastinio kuro elektros energijos gamyba iškyla visų pirma dėl to kad iškastinis kuras yra brangus, yra ribotas jų ištekliai ir yra teršiama gamta, be to, norint išgauti iškastinį kurą, didelę įtaką gavybai daro gamtinės sąlygos, leidžiančios vienoms šalims pelnytis iškastiniu kuru, o kitoms šalims tenka tą kurą pirkti. Šios problemos gali būti išspręstos panaudojant alternatyvius atsinaujinančius energijos šaltinius. [8]

Pasaulyje, o ypač Vakarų Europoje, XX a. pabaigoje stipriai buvo susidomėta vėjo energetika, kuri paskatino vėjo jėgainių plėtojimą ir vystymąsi, taip skatinant sumažinti energetinę priklausomybę nuo iškastinių išteklių (naftos, dujų, akmens anglies). Europos vėjo energetikos asociacijos duomenimis Europoje visų vėjo jėgainių bendra galia siekia 106000 MW, o Lietuvoje bendra vėjo jėgainių galia siekia 225 MW. [9]

Vis dėl to šiuolaikinės atsinaujinančios energijos technologijos turi apribojimų. Paskaičiuota, kad netgi pačiomis geriausiomis oro sąlygomis vėjo, fotovoltinių elementų, biomasės sukuriama energijos produkcija per pastaruosius ateinančius 15-20 metų sudarys nedaugiau, kaip 20% bendros produkcijos dalies. Išskirtinai hidroelektrinių ir vėjo jėgainių gaminama elektros energija yra didžiausias atsinaujinančios energijos šaltinis. Deja vėjo jėgainėms reikalingi dideli žemės plotai, turbinoms reikalingi didžiuliai bokštai, pamatai ir didžiulės mentės, o besisukančios mentės kelia pakankamai didelį triukšmą, taip pat reikalingos didelės investicijos vėjo jėgainių priežiūrai ir remontui. Neskaitant šių dienų naftos ir dujų kainų šuolių, atsinaujinančių energijos šaltinių produkcijos kainos nėra konkurencingos šiluminių ir atominių elektrinių kuriamai energijai. [10]

Kadangi vis vien yra didelis poreikis tradicinę elektros energijos gamybą pakeisti atsinaujinančia, atsiranda poreikis tyrinėti alternatyvias galimybes, kaip efektyviai galima išnaudoti vėjo kinetinę energiją dideliuose aukščiuose. Buvo pasiūlyta naujo tipo jėgos aitvaro generatoriaus idėja, kuri teigia, jog vėjo kinetinė energija dideliuose aukščiuose (1-10 km) yra

žymiai didesnė, nei esanti prie žemės paviršiaus, todėl ją galima efektyviai išnaudoti elektros gamyboje panaudojant jėgos aitvarus. [10]

Taigi iškyla aktualūs klausimas, ar naujo tipo jėgos aitvarų vėjo jėgainės generuoja pakankamos galios elektros energiją, kurią būtų galima panaudoti žmonių buičiai ir pramonei.

Darbo tikslas: teoriškai išanalizuoti jėgos aitvaro vėjo jėgainės veikimo principą ir taikymo galimybes.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti jėgos aitvaro vėjo jėgainės raidą.
2. Teoriškai išanalizuoti jėgos aitvarų veikimo principą.
3. Eksperimentiškai išbandyti jėgos aitvaro modelį.

Tyrimo metodai: mokslinės literatūros analizė, eksperimentas.

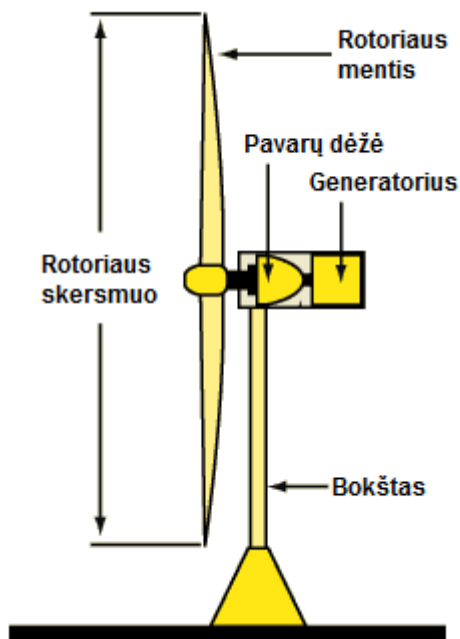
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ ANALIZĖ

1.1. Vėjo jėgainių tipai ir jų veikimo principai

Vėjo jėgainės yra skirstomos į dvi pagrindines rūšis: vertikaliosios ašies ir horizontaliosios ašies.

1.1.1. Horizontalios ašies vėjo jėgainės

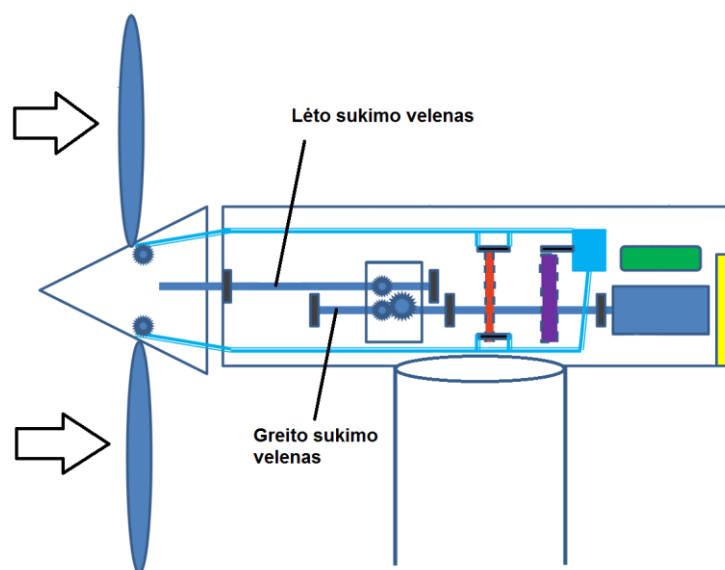
Tokios vėjo jėgainės, kurios turbiną suka horizontaliai orientuotą ašį yra vadinamos horizontalios ašies vėjo jėgainėmis (1 pav.). Šiuo metu tokio tipo vėjo jėgainės yra labai paplitusios, kaip atsinaujinančio energijos šaltinio – vėjo, išgaunama elektros energija. Pagrindinis rotoriaus darbas yra linijinį vėjo judėjimą paversti sukamąja energija, kuri būtų panaudota generatorių veikimui ir vėjo kinetinę energiją būtų galima paversti į elektros energiją. Toks pats principas yra panaudotas elektros gamyboje moderniuose vandens turbinose, kurios tekančio vandens kinetinę energiją paverčia elektros energija. [11]



1 pav. Horizontalios ašies vėjo jėgainės schema.

Šio tipo vėjo jėgainės greitai išstūmė iš rinkos vertikalios ašies vėjo jėgaines, nes jos turi daugiau pranašumų už vertikalios ašies, o jų rinkoje visišką sumažėjimą lėmė Amerikoje veikusios ir gaminusios vertikalios ašies vėjo jėgainės kompanijos bankrotas.

Horizontalios ašies vėjo jėgainės yra gaminamos trijų menčių, rečiau dviejų ar vienos mentės vėjo turbinos. [1] Trijų menčių turbinos vadinamos propelerio turbinomis, nes jos panašios į lėktuvo propelerius. Šio tipo vėjo jėgainės veikia keliamosios jėgos principu, nes pučiant vėjui, mentės yra keliamos į viršų. Vėjo jėgainės turi didžiausią našumą ir yra palaikomas geriausias balansas, kai vėjo jėgainė turi tris mentes.



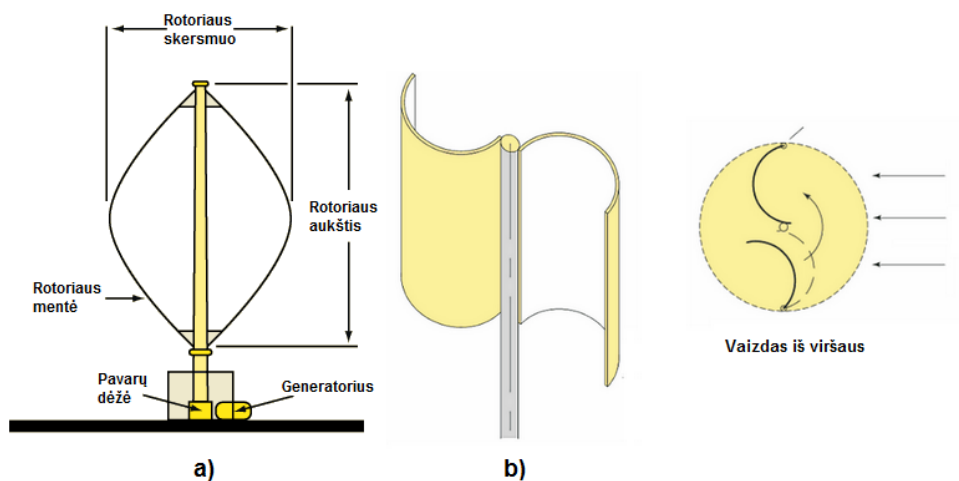
2 pav. Veleno padėtis vėjo atžvilgiu.

Kadangi vėjo kryptis statmena vėjo jėgainės mentėms, todėl turbinos velenas turi būti lygiagrečioje padėtyje su pučiančio vėjo kryptimi (2 pav.) (dėl to šios vėjo jėgainės vadinamos horizontalios ašies). Jei jėgainės rotorius būtų horizontalioje padėtyje, o velenas vertikalioje padėtyje (prieš vėją) didelė tikimybė, jog mentės nesisuks. [12]

1.1.2. Vertikalios ašies vėjo jėgainės

Vėjo jėgainės, kurių turbiną suka vertikaliai orientuota ašis ir ši ašis yra statmena vėjo judėjimo kryptčiai, tokia vėjo jėgainė yra vadinama vertikaliaios ašies vėjo jėgaine. Tokio tipo vėjo jėgainėse centrinė ašis yra vertikalus velenas, kuris yra sujungtas su pavarų dėže. Iš Pavarų dėžės išvestas velenas, kuris suka generatoriaus rotorių, mechaninį sukimo momentą paverčia elektros energija. Pagrindinis skirtumas tarp horizontalios ašies vėjo jėgainės ir vertikaliaios yra tas, kad skiriasi jų sukimosi ašies orientacijos, o skiriantis orientacijoms, skiriasi ir vėjo kryptis, t.y. vertikaliaios ašies vėjo jėgainėms nėra svarbi vėjo kryptis, jos gali veikti pučiant bet kurios krypties vėjui.

Vertikalios ašies vėjo jėgainės yra skirstomos į du pagrindinius tipus, t.y. Darrieus vėjo jėgainės modelio tipą ir Savonius vėjo jėgainės tipą (3 pav.).

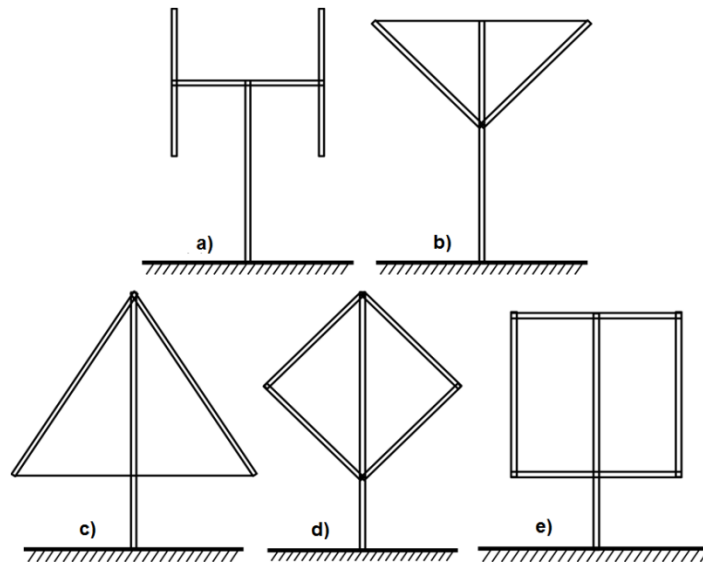


3 pav. Vertikalios ašies vėjo jėgainės. a) Darrieus tipo vėjo jėgainė; b) Savonius tipo vėjo jėgainė.

Darrieus tipo vėjo jėgainės veikia vėjo jėgos mentės tempimo jėga ir sistema įgyja didelį sukimo greitį ir didelį naudingumo koeficientą.

Savonius tipo vėjo jėgainės veikia vėjo keliamosios jėgos principu, vėjo kinetinė energija kelia įrenginio profilį taip suteikdama jam judėjimo energijos. Šio tipo jėgainės pagrįstos dideliu sukimo momentu, mažu sukimosi greičiu, bei mažu naudingumo koeficientu. [13]

Taip pat yra naudojamos ir kitų tipų vertikalios ašies vėjo jėgainės, tokios kaip „H“, „V“ (arba „Y“), „Delta“, „Diamond“ ir „Gyromill“ tipai (4 pav). Visoms šio tipo vėjo jėgainėms reikalinga papildoma paleidimo sistema. [13]



4 pav. Pagrindinės naudojamos vertikalios ašies vėjo jėgainės: a) „H“ tipo, b) „V“, c) „Δ“, d) „Diamond“ (deimanto), e) „Gyromill“.

Vertikalios ašies vėjo jėgainės turi savų privalumų, bet turi ir nemažai trūkumų, būtent dėl to, kad šio tipo vėjo jėgainės turi daugiau trūkumų nei privalumų jos nėra labai populiarios elektros energijos gaminimui panaudojant vėjo kinetinę energiją. [1]

1.2. Jėgos aitvarų vėjo jėgainių veikimo principas

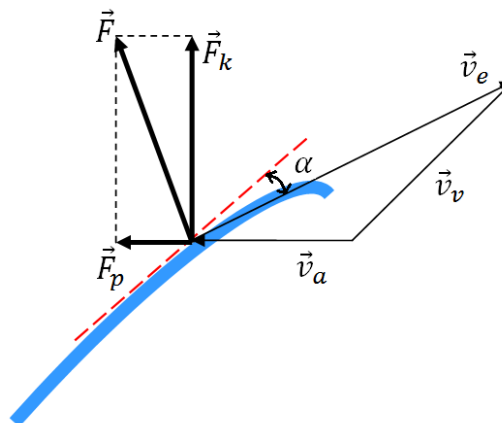
Vystantis vėjo kinetinės energijos pritaikymui elektros energijos gamyboje, buvo sugalvota kaip efektyviai būtų galima išnaudoti vėjo kinetinę energiją dideliuose aukščiuose (1 - 10 km), kur vėjo greitis yra žymiai didesnis ir pastovesnis, nei pučiantis vėjas ties žemės paviršiumi. Dėl to buvo pasiūlyta jėgos aitvaro vėjo jėgainės idėja. Ši idėja buvo sumodeliuota teoriškai ir buvo pristatytas jėgainės prototipas, o dabartiniu metu projektuojamose aitvarų jėgainėse planuojama pasiekti net 7 - 9 km aukštį ir generuoti kelių megavatų galią. Tokių vėjo jėgainių pranašumas yra tame, kad jos išnaudoja vėjo kinetinę energiją dideliuose aukščiuose, o kinetinė energija didėjant aukščiui kinta kubu, tokią priklausomybę galime pamatyti iš vėjo kinetinės energijos formulės: [8]

$$E_k = \frac{\rho S v_v^3}{2}, \quad (1)$$

čia E_k – vėjo kinetinė energija, ρ – oro tankis ($\rho = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$), S – aitvaro efektyvusis plotas, v_v – vėjo greitis.

1.2.1. Jėgos aitvaro veikimo aerodinaminis principas

Visų vėjo jėgainių veikimo principai yra pagrįsti pagrindiniais aerodinamikos dėsniais, todėl norint išsiaiškinti kaip veikia jėgos aitvarų vėjo jėgainės, turime remtis šiais principais. Jėgos aitvarą veikiančios aerodinaminės jėgos pavaizduotos 5 pav. [14]



5 pav. Aitvaro aerodinaminių jėgų schema.

Žinodami, jog aitvarą veikia oro srautas taip pat, kaip ir lėktuvo sparną, tuomet žinome, kad aitvarą veikia keliamoji jėga F_k ir pasipriešinimo jėga F_p , tuomet galime įvesti jų formules:

$$F_k = C_k \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} \cdot S; \quad (2)$$

ir

$$F_p = C_p \cdot \frac{\rho \cdot v_e^2}{2} \cdot S; \quad (3)$$

čia $\vec{v}_e = \vec{v}_a - \vec{v}_v$ yra efektyvusis (atstojamasis oro srauto greitis); $\vec{v}_a$ – aitvaro greitis; $\vec{v}_v$ – vėjo greitis; C_k – keliamosios jėgos koeficientas, o C_p – pasipriešinimo jėgos koeficientas.

Žinodami keliamąją jėgą ir pasipriešinimo jėgą galime rasti pilnąją aerodinaminę jėgą, kuri yra lygi veikiančių aitvarą jėgų sumai: [14]

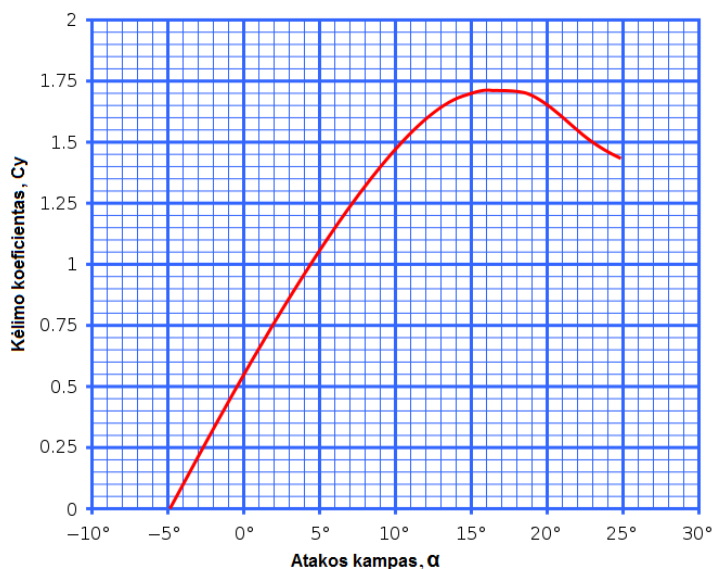
$$F = F_y + F_x \quad (4)$$

Šiose formulėse sunkiausiai yra įvertinami aerodinaminiai koeficientai C_k ir C_p . Jie priklauso nuo aitvaro profilio, jo formos ir atakos kampo α (5 pav.). Dažniausiai jie yra nustatomi eksperimentiškai „prapučiant“ juos aerodinaminuose vamzdžiuose, nubraižant jų verčių priklausomybes nuo atakos kampo (6 pav.).

Pasipriešinimo jėgos koeficientas jėgos aitvarų tipo profiliams mažai priklauso nuo atakos kampo ir vidutiniškai lygus 0,08, todėl dažnai jo įtaka, skaičiuojant jėgos aitvaro trauką ir galią nėra vertinama.

Kaip matyti iš 6 pav., keliamosios jėgos koeficientas teigiamose atakos kampų ribose kinta nuo 0,5 iki 1,75., optimali šio koeficiento reikšmė turi būti artima vienetui, o optimalus atakos kampas nuo 5 iki 10 laipsnių.

Taigi, norint sužinoti kėlimo koeficiento vertę žinant atakos kampą, reikia pasinaudoti keliamosios jėgos priklausomybės nuo atakos kampo grafiku (6 pav.), [15]:



6 pav. Keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo. [15]

Norint sužinoti jėgos aitvarų vėjo jėgainės galios priklausomybę nuo aukščio, visų pirma turime rasti vėjo greičio priklausomybę nuo aukščio. Tai galime padaryti žinodami, vėjo greičio, bei vėjo kinetinės energijos nuo aukščio priklausomybės formules:

$$v(h) = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\beta \quad (5)$$

$$E_k(h) = \frac{\rho S}{2} v_0^3 \left(\frac{h}{h_0} \right)^3 \quad (6)$$

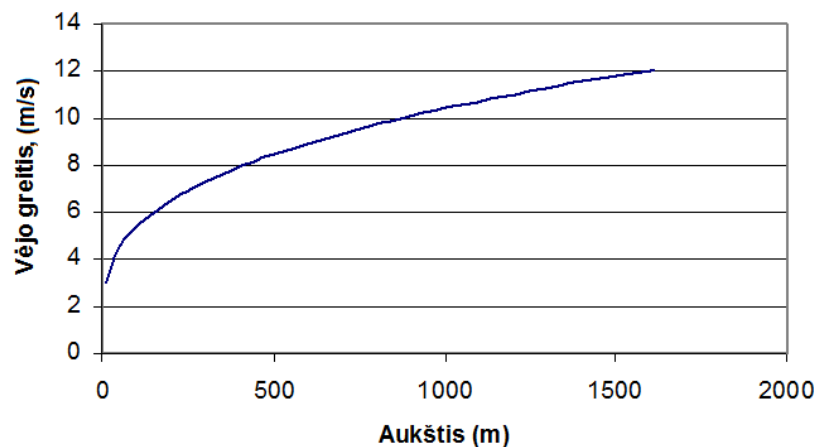
Čia v_0 – vėjo greitis prie žemės paviršiaus, h - aukštis nuo žemės paviršiaus, kuriame skraido aitvaras, h_0 – aukštis, kuriame yra matuojamas v_0 vėjo greitis (vėjo greitį geriausia matuoti 10 m aukštyje), β – paviršiaus trinties koeficientas, jo dydis taip pat priklauso nuo aplinkos kurioje yra skraidinamas aitvaras, jis kinta nuo 0,1 iki 0,4 (1 lentelė).

Reikia pažymėti, kad arti žemės paviršiaus šis dėsnis negalioja, jis pradeda galioti tuomet, kai yra pasiekiamas aukštis, didesnis už gradientinį aukštį. Šie aukščiai taip pat priklauso nuo paviršiaus trinties koeficientų ir kinta nuo 200 iki 450 m (1 lentelė). [16]

Lentelė 1. Paviršiaus trinties koeficientai, optimalus lyno polinkio kampas ir gradientiniai aukščiai.

Paviršiaus tipas	β	Θ°	h_{grad}
Lygus paviršius, ežeras, jūra	0,10	17	200
Trumpa žolė, nesueltas laukas	0,14	20	230
Lyguma su 20-30 cm. aukščio žole	0,16	21	250
Pasėliai, javai, pavieniai medžiai	0,20	24	280
Retas neaukštas miškas	0,22-0,24	26-27	320
Miškinga vietovė, priemiestis	0,28-0,30	28	370
Urbanizuota teritorija su aukštais pastatais	0,4	30	450

Iš (5) formulės matyti, kad jėgos aitvarų vėjo jėgainės efektyvumas yra tuo didesnis kuo didesnis darbinis aukštis, o tai patvirtina 7 pav. Tai yra esminis aitvarų jėgainės pranašumas, lyginant ją su tradicinėmis vėjo jėgainėmis, tačiau šis pranašumas išryškėja tik didesniuose nei 200 m aukščiuose. Didėjant aukščiui, mažėja oro tankis, tai mažina generuojamos energijos galią, tačiau iki 1 km aukščio ši priklausomybė reikšmės neturi. [16]



7 pav. Vėjo greičio priklausomybė nuo aukščio.

Iš grafiko matyti, kylant aukštyn vėjo greitis aiškiai didėja. Taip pat galime matyti, jog esant 3 m/s vėjo greičiui prie žemės, vieno kilometro aukštyje vėjo greitis pakinta daugiau nei tris kartus, t.y. jis siekia apie 11 m/s greitį. [8]

Žinodami, kad vėjo greitis dideliuose aukščiuose yra žymiai didesnis nei prie žemės paviršiaus, galime sužinoti, kokią mechaninę galią gali generuoti vėjo jėgainė, galime ją rasti panaudoję formulę:

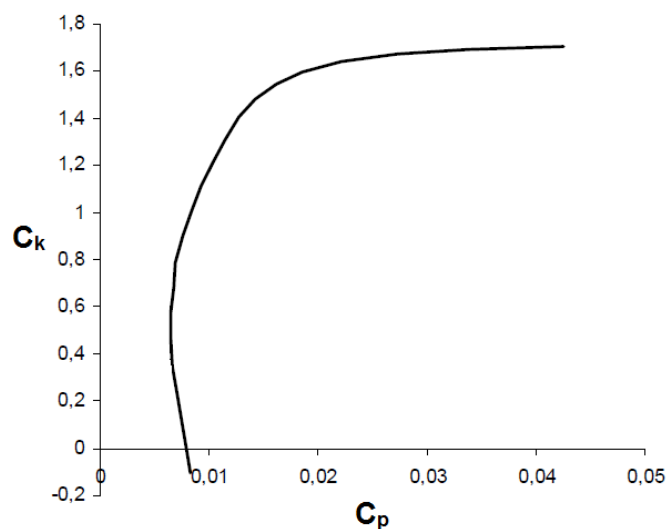
$$P_M = 0,074 \cdot \rho \cdot C_k \cdot S \cdot V^3 \cdot \cos^3 \theta \cdot k^2 \quad (7)$$

čia θ – lyno polinkio kampas, kuris kinta priklausomai nuo aplinkos ypatybių (nuo 17° lygiame paviršiuje iki 30° urbanizuotoje teritorijoje iš 1 lentelės), k – aerodinaminis sistemos kokybės koeficientas, kuris yra lygus:

$$k = \frac{C_k}{C_p + \frac{r \cdot d}{4 \cdot S}} \quad (8)$$

čia r – lyno ilgis, o d – lyno diametras. [17]

Keliamosios vėjo jėgos ir pasipriešinimo jėgos dydžiai C_k ir C_p yra įvertinami pagal naudojamo aitvaro profilį, formą ir atakos kampą α ir yra nustatomi eksperimentiškai. Profilio poliarės yra svarbiausia profilio aerodinaminė charakteristika. Norint įvertinti keliamosios vėjo ir pasipriešinimo jėgas, turime pasinaudoti profilio poliarės grafiku (8 pav.) [14]



8 pav. Profilio poliarė.

Žinant jėgos aitvaro vėjo jėgainės aerodinaminį veikimo principą dar reikia išsiaiškinti aitvaro valdymo principą.

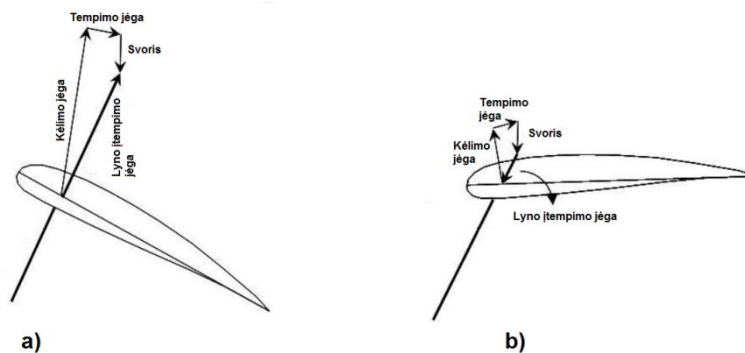
1.2.2. Jėgos aitvaro valdymo principas

Jėgos aitvaro vėjo jėgainės veikimo principas paremtas vėjo keliamosios jėgos panaudojimu, naudojant pririštą kontroliuojamą jėgos aitvarą elektros gamybai (9 pav.).



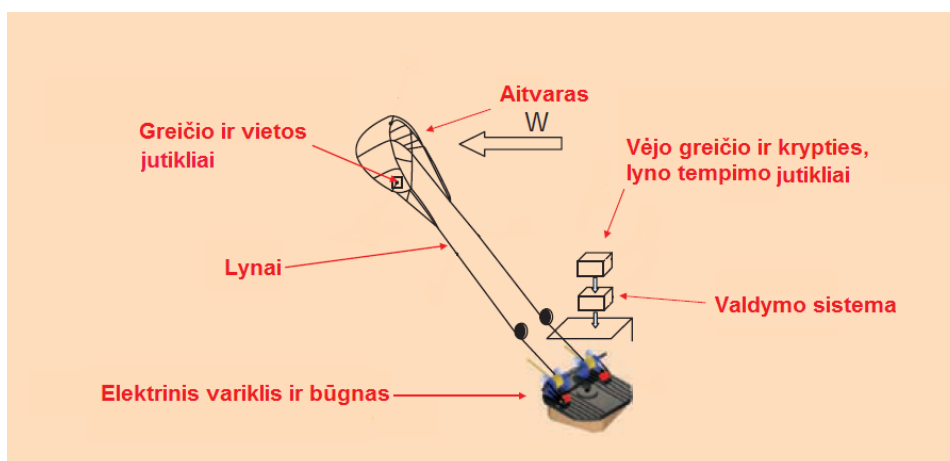
9 pav. Jėgos aitvaras.

Vienas aitvaro lynas (gali būti ir keli lynai) pririštas ir apvyniotas apie būgną, kuris prijungtas prie elektrinio variklio, kuris pritvirtintas ant žemės. Aitvaro skriejimo trajektorija yra reguliuojama valdant lyną tempimo jėga valdymo sistemoje. [8] Kylant aitvarui į viršų atakos kampas yra bandomas išlaikyti didelis, tam kad lyno tempimo jėga būtų didžiausia (10 a pav.). Elektros energija generuojama tuomet, kai vėjo kinetinė energija kelia aitvarą aukštyn, o šis traukia lyną, kuris išvynioja ant būgno likusį lyną, būgnas išvyniojant lyną sukasi taip išsukdamas ir elektrinį variklį, kuris tuo metu veikia kaip generatorius. Tam, kad lyno sutraukimui nebūtų naudojama elektros energija, optimalus variantas yra keisti aitvaro atakos kampą, t.y. jam išvyniojus visa lyną, sumažinamas atakos kampas, ir aitvaras pradeda leistis, o lynas yra susukamas atgal ant būgno (10 b pav.). [18]



10 pav. Aitvarą veikiančios jėgos: a) kai aitvaras kyla į viršų; b) kai aitvaras leidžiasi žemyn.

Kitas variantas, kai visas lynas yra išsukamas, tuomet būgnas pradeda veikti motoro principu ir vynioja lyną atgal, taip susukdamas nenaudojamą lyno dalį atgal ant būgno, šitaip panaudodamas nedidelę dalį jau pagamintos elektros energijos. Tokia „yo-yo“ principu veikianti konfigūracija vykdoma valdymo sistemoje (11 pav.), kuri susideda iš elektros variklio, būgno ir visos techninės įrangos, reikalingos kontroliuoti aitvarą.

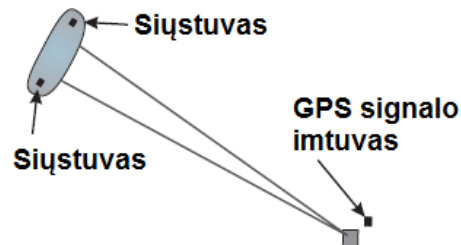


11 pav. Jėgos aitvaro sistemos schema.

Jėgos aitvarų generatoriaus valdymo sistema pagrįsta grįžtamuju aitvaro vietos ir greičio vektoriaus nustatymu, kuris turi būti tiksliai pamatuojamas ir apskaičiuojamas. Abiejuose aitvaro galuose yra pritaisyti keli akselerometrai ir dar keli magnetometrai, kurie perduoda duomenis valdymo sistemai radijo signalu. Šių duomenų pakanka apskaičiuoti aitvaro vietą ir greitį. [8]

Taip pat aitvaro vietos ir greičio nustatymui gali būti naudojami GPS siųstuvai ir imtuvai. Siųstuvai yra tvirtinami taip pat aitvaro galuose, o imtuvas tvirtinamas prie valdymo sistemos, taip yra nustatoma aitvaro padėtis ir jo greitis. Nors GPS sistema turi 20 – 50 cm

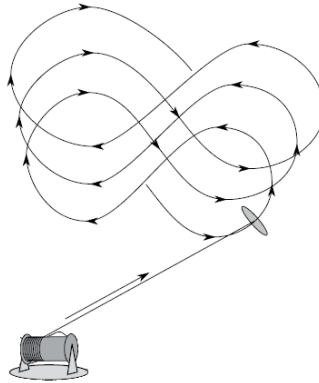
paklaidą, bet tai yra pakankamas tikslumas norint nustatyti aitvaro būvimo vietą ar pakeisti jo padėtį. Tokia sistema paranki, nes siųstuvas ir imtuvas yra maži, pigūs ir lengva jais naudotis, bet pagrindinis jų trūkumas, jie yra jautrūs greičių šuoliams, dėl to atsiranda signalo netikslumų, kurie gali įtakoti netikslių aitvaro vietos ir greičio nustatymą. [20]



12 pav. Jėgos aitvaro valdymo sistema su GPS.

Paskaičiuota, pagaminant tą patį elektros kiekį reikalingi žymiai mažesni žemės ir oro plotai (beveik per pus) aitvarų generatoriams, nei naudojamų generatorių dabartiniuose vėjo parkuose, o elektros gamybos kaina sumažėja apie 10-20%. Pavyzdžiui, 90% generuojamos galios 2 MW trijų menčių turbinoje su 90 m skersmens rotoriumi generuojama galia yra išgaunama naudojant 40% menčių ploto, kuris atitinka 120 m² naudojamo paviršiaus ploto. Ši priklausomybė atsiranda dėl to, kad aerodinaminės jėgos kiekvienai mentės daliai yra proporcingos greičio kvadratui ir šie dydžiai didėja einant link mentės galų. Jėgos aitvarų generatoriams, aerodinaminiai paviršiai veikia kaip išorinės menčių dalys, kurioms nereikalinga mechaninė atrama (bokštas) ir mažiau produktyvios vidinės menčių dalies. Tai parodo, jog sukimo momentas, sukiamas vėjo jėgos ties vėjo turbinos pagrindu, didėja kylant bokšto viršūnės link, o jėgos aitvaro lynas neįtakoja vėjo jėgos. Dėl vėjo jėgainių statybos apribojimų inžineriniu ir ekonominiu pagrindu, nėra didelės prasmės statyti vėjo jėgaines aukštesnes, nei 100-120 m. aukščio. Bet priešingai nei standartinės vėjo jėgainės, jėgos aitvarų vėjo jėgainės gali dirbti kelių šimtų metrų ir kilometrų aukštyje, kur vėjo greičiai yra žymiai didesni ir mažiau kintantys. [8]

Pati optimaliausiai aitvaro skriejimo trajektorija yra „aštuoneto“ formos, taigi aitvarui skrendant tokia trajektorija atsiranda naujų skaičiavimo ypatybių.



12 pav. Aitvaro judėjimo „aštuoneto“ trajektorija.

Norint apskaičiuoti vidutinę (efektinę) galią, galime ją aprašyti parametrinėmis lygtimis:

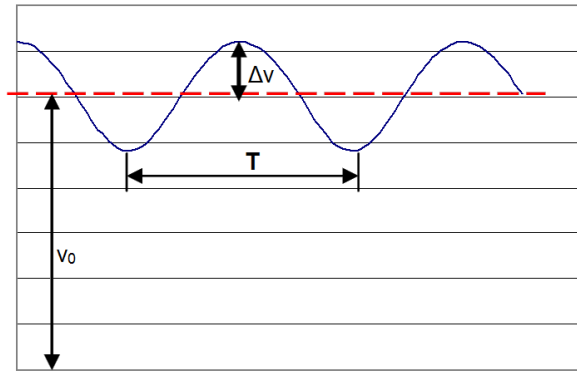
$$\left. \begin{aligned} x &= r \cdot \sin\theta + a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \\ y &= r \cdot \cos\theta + b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

čia T – „aštuoneto“ periodas (optimalus aitvato trajektorijos periodas yra apie 19 m/s), t – laikas, a – „aštuoneto“ plotis, b – „aštuoneto“ plotis.

Iš (7) sistemos galime gauti aitvaro greičio priklausomybę nuo laiko:

$$v_a = v_0 + \frac{2\pi}{T} \cdot \sqrt{a^2 \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + b^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)}, \quad (10)$$

čia v_0 – pastovioji greičio dedamoji.



13 pav. Aitvaro greičio svyravimai.

Kadangi jėgos aitvaras šiuo atveju juda ne tolygiai, o „aštuoneto“ trajektorija, jo generuojama galia ir lyno įtempimo jėga bus taip pat netolygi („pulsuojanti“), dėl to vieno periodo metu galia bus apskaičiuojama pagal formulę:

$$P = \mu \cdot P_M; \quad (11)$$

čia dydis μ – efektyvumo koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\mu = 0,5 \cdot \frac{1}{1 + \frac{v_0}{\Delta v}}; \quad (12)$$

Dažniausiai dydžio μ skaitinė vertė yra artima 0,2. Taigi, norint apskaičiuoti defektinę jėgos aitvaro generuojamą galia, panaudoję (5) formulę galime ją parašyti taip:

$$P_D = 0,074 \cdot \mu \cdot \rho \cdot C_k \cdot S \cdot V^3 \cdot \cos^3 \theta \cdot k^2 \quad (13)$$

2. TYRIMO METODIKA

Šio darbo tyrimas atliekamas dviem etapais. Pirmo etapo metu atliekami teoriniai skaičiavimai ir grafikų braižymas naudojantis jau išvestomis formulėmis, o antro etapo metu apibendrinami teoriniai skaičiavimai pasinaudojant eksperimentiniais bandymais.

Teoriniai skaičiavimai:

Teoriniai skaičiavimai atliekami panaudojant jau išvestomis vėjo greičio, galios formulėmis ir aerodinaminių koeficientų vertėmis, apskaičiuotomis eksperimentiškai.

Eksperimentas:

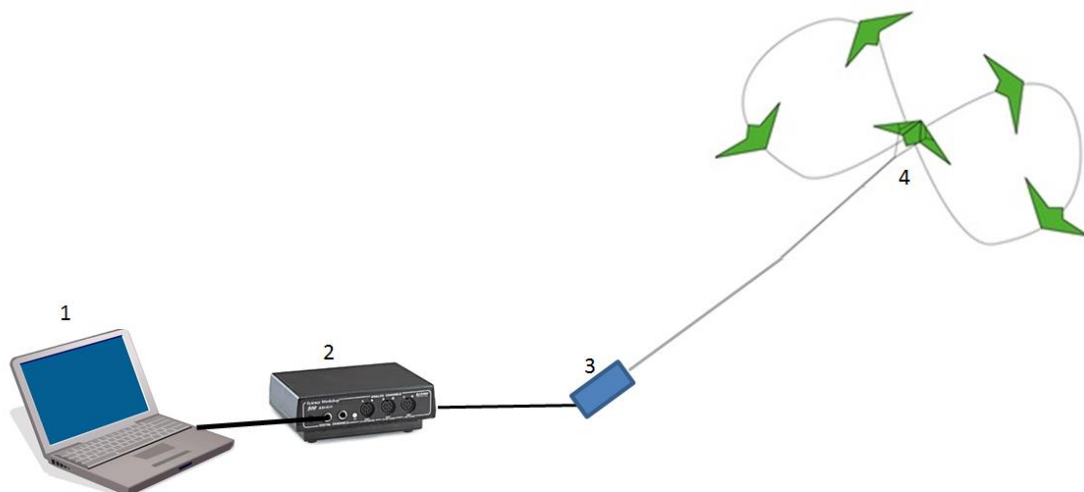
Tyrimas su jėgos aitvarais buvo atliekamas Kairių sąvartyne, vadovaujant Šiaulių Universiteto Gamtos mokslų fakulteto dekaną doc. dr. Alfredo Lankausko ir lekt. Mindaugo Kiriliausko. Tyrimui atlikti buvo naudojama sistema, kuri atitinka (14 pav.) pavaizduotą schemą, o tyrimui buvo naudojamas standartinis stačiakampio formos dvigubo prisipučiančio profilio aitvaras ir trikampio formos viengubo profilio aitvaras. Taip pat eksperimento duomenims registruoti buvo naudojama DATA STUDIO programinė įranga ir PASCO jėgos jutikliai, kuriais buvo matuojama lyno tempimo jėga.

Eksperimento eiga:

Atliekant eksperimentą visų pirma yra sujungiama sistema pagal (14 pav.) schemą.

Eksperimentui naudojame šiuos prietaisus:

- Dvigubo prisipučiančio profilio aitvaras;
- Vieno profilio standartinis trikampio formos aitvaras;
- PASCO jėgos jutiklis;
- PASCO sąsaja;
- Kompiuteris su DATA STUDIO programine įranga.



14 pav. Sistemos jungimo schema: 1) Kompiuteris su DATA STUDIO programine įranga; 2) PASCO sąsaja; 3) PASCO jėgos jutiklis; 4) Jėgos aitvaras.

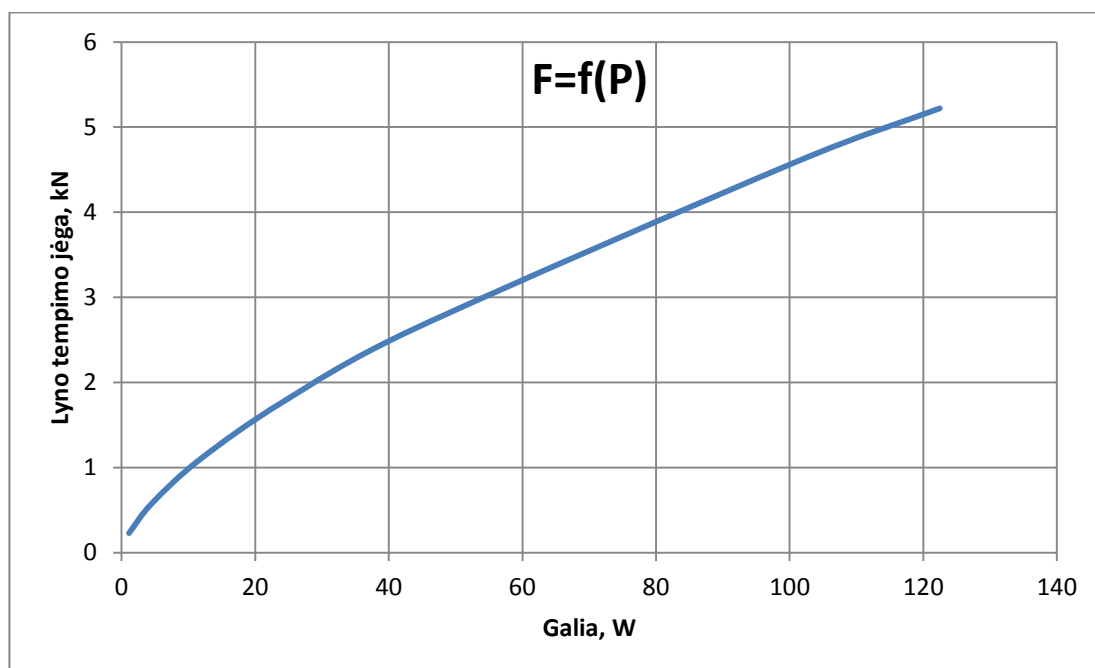
Pirmiausia bandymas atliekamas su dviejų profilių stačiakampės formos aitvaru. Esant 6-11 m/s vėjo greičiui, aitvaras paleidžiamas kilti pavėjui ir stengiamasi skraidinti aitvarą aštuoneto trajektorija ir bandant išlaikyti trajektoriją kuo siauresnę. Aitvaras yra skraidinamas 300 sekundžių, o lyno įtempimo jėga yra registruojama kompiuteryje.

Atliekamas toks pat eksperimentas su vieno profilio standartiniu trikampių aitvaru pučiant 6- 11 m/s vėjui, duomenys taip pat yra registruojami.

3. TYRIMO REZULTATAI

3.1. Teoriniai skaičiavimai

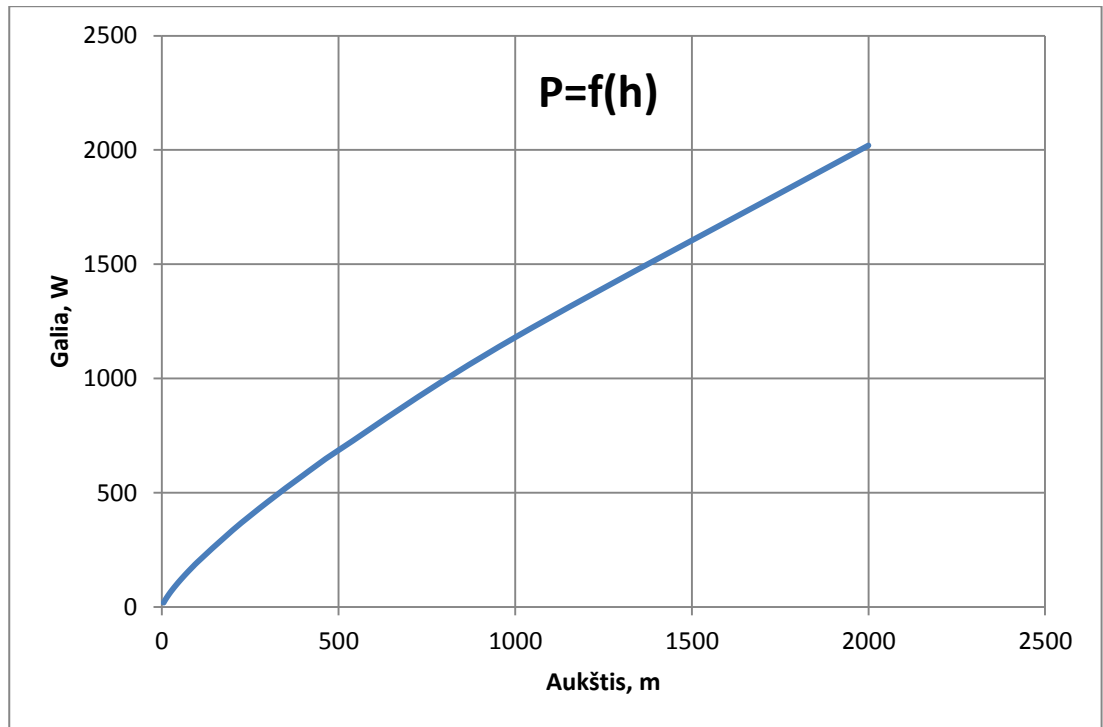
Prieš braižant galios priklausomybės nuo aukščio grafiką, visų pirma turime sužinoti, kokia yra teorinė lyno įtempimo jėgos priklausomybė nuo aitvaro generuojamos galios. Šiems skaičiavimams pasinaudosime aitvaro keliamosios jėgos formule (2).



15 pav. Lyno įtempimo jėgos priklausomybė nuo jėgos aitvaro generuojamos galios.

Pagal šį grafiką galime įvertinti kokio dydžio lyno įtempimo jėga yra generuojant skirtingą aitvaro galią ir iš grafiko galime įvertinti kokio diametro lynas reikalingas, generuojant pasirinktos galios elektros energiją.

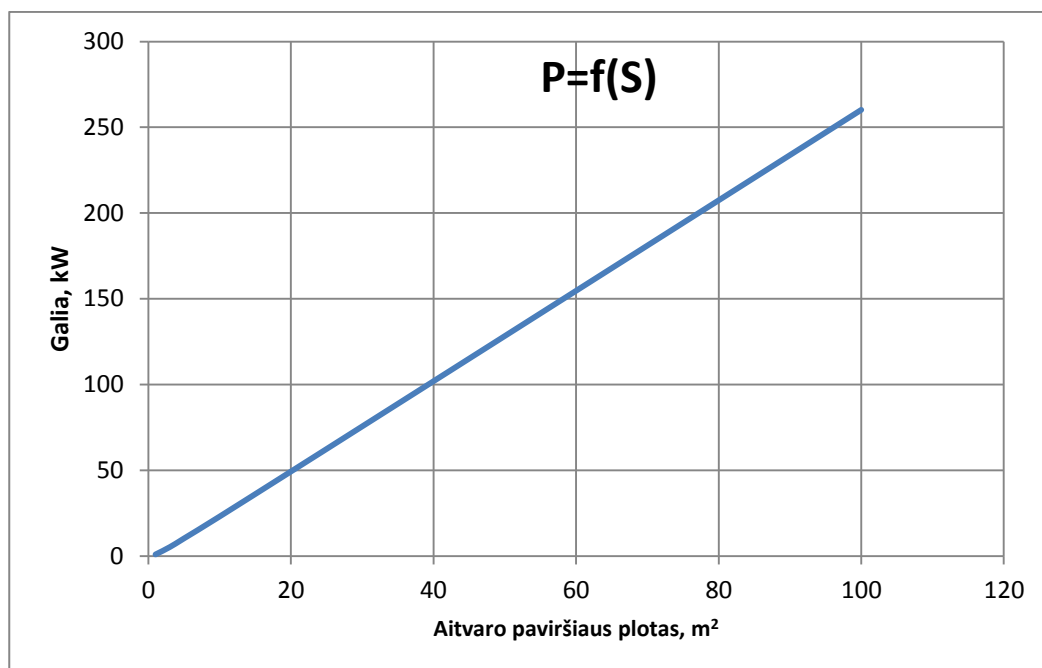
Žinant keliamosios jėgos ir pasipriešinimo jėgos koeficientus $C_k = 1,6$, $C_p = 0,02$, kuriuos pasirenkame iš profilio poliarės (8 pav.) ir atakos kampą $\theta = 17^\circ$, kurį pasirenkame iš 1 lentelės, galime nubrėžti jėgos aitvaro generuojamos galios nuo aukščio priklausomybę panaudoję (7) formulę:



16 pav. Jėgos aitvaro generuojamos galios priklausomybė nuo aukščio virš žemės paviršiaus.

Iš grafiko aiškiai matome, jog kuo didesniame aukštyje yra aitvaras, tuo didesnės galios elektros energija yra generuojama.

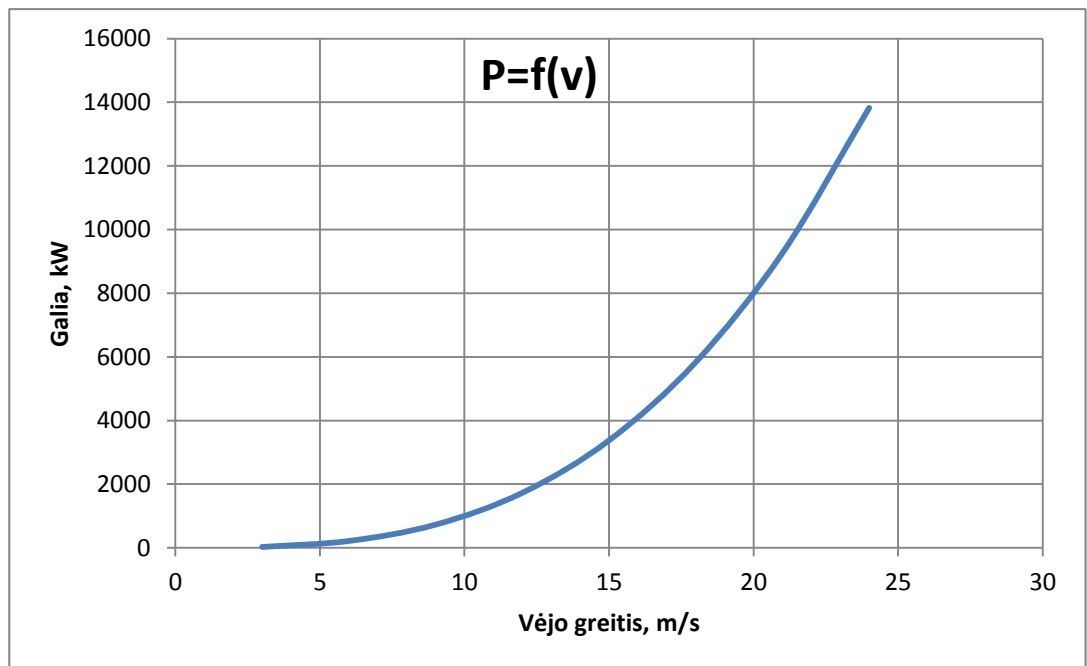
Pasinaudoję (7) formule galime sužinoti kokia yra jėgos aitvaro paviršiaus ploto priklausomybė nuo jo generuojamos galios nubrėžiant grafiką:



17 pav. Jėgos aitvaro galios nuo efektyvaus aitvaro paviršiaus ploto priklausomybės grafikas.

Iš grafiko aiškiai matome, jog tai yra tiesinis grafikas ir pagal (5) formulę aitvaro generuojama galia yra tiesiogiai proporcinga aitvaro paviršiaus plotui, tai reiškia kuo didesnis aitvaro paviršiaus plotas, tuo didesnė galia bus generuojama.

Dar kartą panaudoję (7) formulę galime paskaičiuoti aitvaro galios priklausomybę nuo vėjo greičio. Imant dydžius šioje formulėje kaip pastovius, o keičiant tik vėjo greitį, galime nubrėžti tokį grafiką:



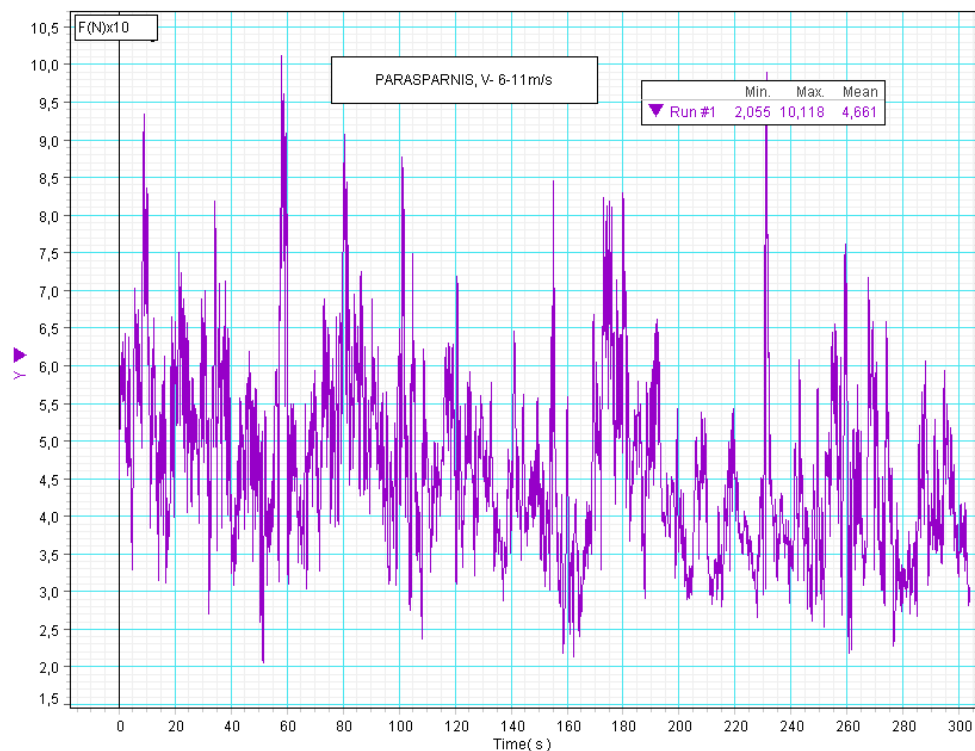
18 pav. Jėgos aitvaro galios priklausomybė nuo vėjo greičio.

Iš grafiko aiškiai matome, jog kintant vėjo greičiui, aitvaro generuojama galia kinta eksponentiškai. Taigi esant dideliame vėjui, galima generuoti didelės galios elektros energiją.

Visi šie skaičiavimai aprašyti, kai aitvaras juda tolygiai, bet jei norime rasti vidutinę (defektinę) galią, turime atsižvelgti ir į tai, kad aitvaro judėjimo trajektorija yra „aštuoneto“ formos, kuri galime aprašyti parametrinėmis lygtimis (10), (11), (12) ir (13).

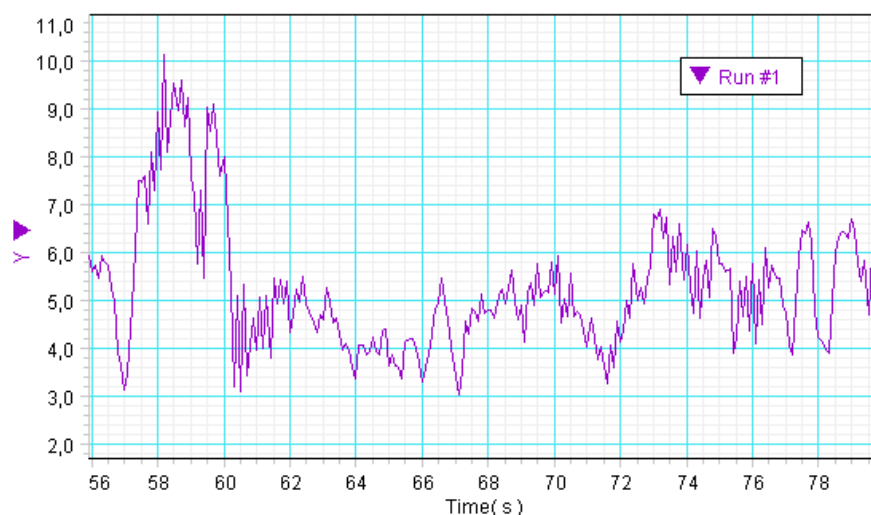
3.2. Eksperimento rezultatai

Teorinių skaičiavimų apibendrinimui buvo atlikti keli eksperimentai su dviejų tipų aitvarų modeliais: standartinio trikampės formos viengubo profilio ir stačiakampio formos dvigubo prisipučiančio profilio aitvarais. Jų abiejų plotas apie 0,7 kv.m. Eksperimento metu buvo matuojama lyno tempimo jėga naudojant PASCO tipo jėgos jutiklį ir DATA STUDIO programinę įrangą.



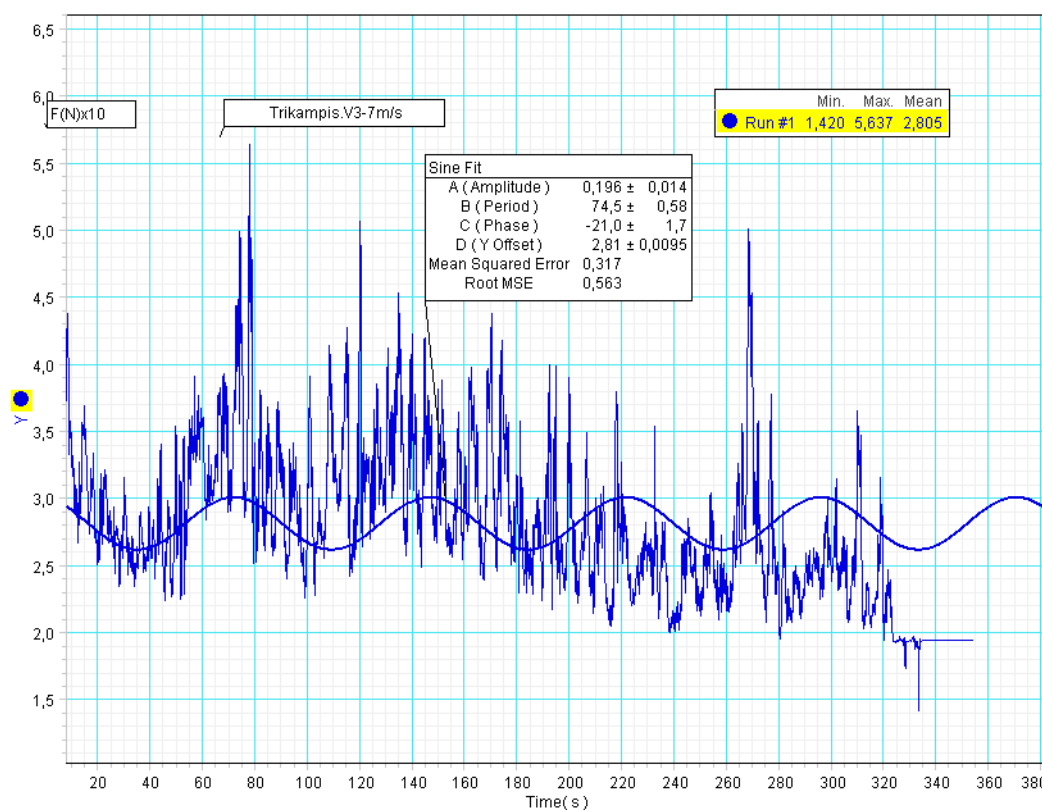
19 pav. Jėgos aitvaro lyno įtempimo jėga (stačiakampis aitvaras).

Pateiktame grafike (3.2.1 pav.) pateikti bandymų duomenys su stačiakampio formos dviejų profilių aitvaru. Eksperimento trukmė – 300 s ir duomenys yra redukuoti 1 kv.m. plotui.



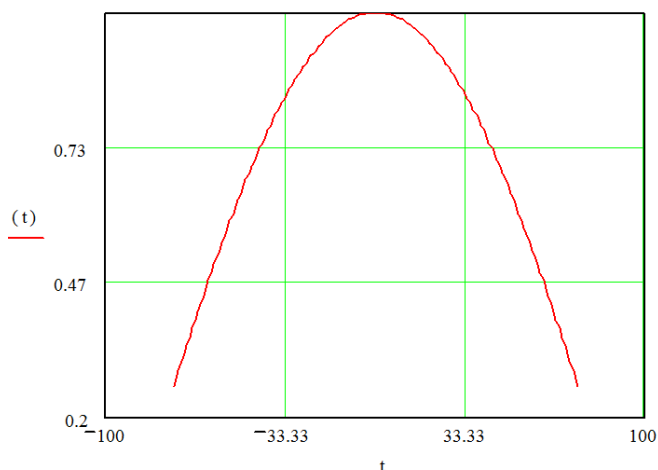
20 pav. Jėgos aitvaro lyno įtempimo jėga (duomenų fragmentas).

19 pav. pateiktas eksperimento duomenų fragmentas, kuris parodo tempimo jėgos „nestabilumą“ dėl gūsingo ir turbulentinio vėjo. Tačiau tam tikras proceso pasikartojamas yra išvelgiamas. Manoma, kad dėl šių pačių priežasčių žymiai skiriasi teoriniai skaičiavimai ir praktinio eksperimento rezultatai. Tikėtina, kad didėjant aukščiui šis skirtumas mažėtų.



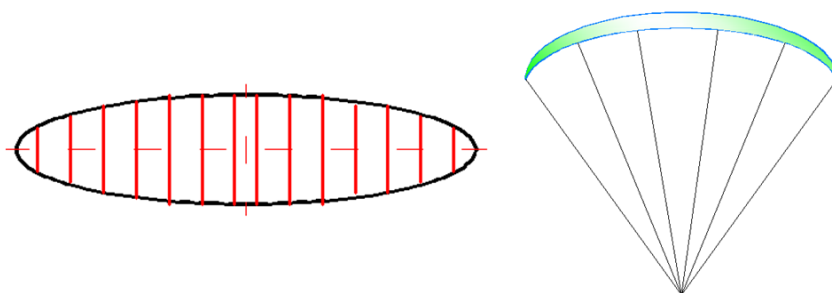
21 pav. Jėgos aitvaro lyno įtempimo jėga (trikampis aitvaras).

Panašūs rezultatai gaunami ir su trikampio formos aitvaro modeliu (21 pav.). Paprasčiausia periodinė aproksimacija išryškina tokio proceso periodiškumą.



22 pav. Traukos jėgos priklausomybė nuo aitvaro kurso.

Eksperimento metu taip pat išaiškėjo būtinybė kuo tiksliau išlaikyti aitvaro „kursą“ vėjo krypties atžvilgiu, t.y. trajektorijos „aštuoneto“ centras turi būti ant vėjo krypties vektoriaus ir pageidautina, kad trajektorijos matmenys būtų kuo „siauresni“.



23 pav. Aitvaro aerodinaminis dizainas.

Šiame darbe nėra įvertinti aerodinaminiai ir geometriniai sparno parametrai. Kaip buvo minėta anksčiau, teoriniai skaičiavimai grindžiami fiksuotais parametrais ir tik sparno plotu. Tai gali turėti įtakos visos jėgainės darbo efektyvumui. Sparno geometrinės formos ir profilio parinkimas taip pat reikalauja optimizavimo.

IŠVADOS

1. Ištyrėme jog jėgos aitvaro pagalba galima generuoti elektros energiją, tai patvirtina teorija ir eksperimentas.
2. Jėgos aitvarai, energetinio našumo požiūriu, yra pranašesni už tradicinės vėjo jėgainės dėl to, kad jėgos aitvaro vėjo jėgainės dirba dideliuose aukščiuose kur vėjo greitis yra žymiai didesnis.
3. Nepaisant pranašumų jėgos aitvaro vėjo jėgainės reikalauja didelių žemės plotų ir oro erdvės, jų eksploatacija ir priežiūra yra žymiai sudėtingesnė už tradicinės vėjo jėgainės.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] KYTRA, S. *Atsinaujinantys energijos šaltiniai*. Kaunas: Technologija, 2006.
- [2] Illustrated history of wind power development. Prieiga per internetą:
<http://www.telosnet.com/wind/early.html> [žiūrėta 2013-04-20].
- [3] ANDREJAVAS, A.; MORKŪNAS, E. *Vėjo malūnai: technikos paminklai Lietuvoje*. Vilnius: Mokslas, 1982.
- [4] GULBINAS, A. Vėjo jėgainių parkai Lietuvoje. In *Efektyvus atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-20] Prieiga per internetą:
http://www.ena.lt/doc_atsti/EAEIN_2008.pdf
- [5] Illustrated history of wind power development. Prieiga per internetą:
<http://www.telosnet.com/wind/20th.html> [žiūrėta 2013-04-20].
- [6] History of Wind Energy. Prieiga per internetą:
http://www1.eere.energy.gov/wind/wind_history.html [žiūrėta 2013-04-25].
- [7] Vėjo energija. In *Atsinaujinantys energijos šaltiniai*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-18]
Prieiga per internetą:
http://www.lei.lt/_img/_up/File/atvir/erlic/index_files/Atsinaujinantys_energijos_saltiniai.pdf
- [8] CANALE, M.; FAGIANO, L.; MILANESE, M. *Power Kites of Wind Energy Generation: Fast Predictive Control of Tethered Airfoils*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-02-09].
- [9] Wind in Power. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-05-02] Prieiga per internetą:
http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind_in_power_annual_statistics_2012.pdf
- [10] ARGATOV, I.; RAUTAKORPI, P.; SILVENNOINEN, R. *Estimation of the mechanical energy output of the kite wind generator*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-02-10] Prieiga per internetą: <http://greening-aiken.wikispaces.com/file/view/Wind+Kite+Estimated+Output.pdf>

- [11] WAGNER, H. J., MATHUR, J. *Introduction to Wind Energy Systems– Basics, Technology and Operation*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-20] Prieiga per internetą: http://books.google.lt/books/about/Introduction_to_Wind_Energy_Systems.html?id=-sdbfE8A8TsC&redir_esc=y
- [12] HEMAMI, A. *Wind Turbine Technology*. [interaktyvus] [žiūrėta 2013-04-20] Prieiga per internetą: <http://books.google.lt/books?id=urNSjGoyn8QC&pg=PA48&dq=horizontal+axis+wind+turbines&hl=lt&sa=X&ei=7sh-UY3mEorYsgahrIGgCQ&ved=0CEEQ6AEwAjgK#v=onepage&q&f=false>
- [13] SUTHERLAND, H. J.; BERG, D. E.; ASHWILL, T.D. *A Retrospective of VAWT Technology*. [interaktyvus] [žiūrėtas 2013-04-20] Prieiga per internetą: <http://energy.sandia.gov/wp/wp-content/gallery/uploads/SAND2012-0304.pdf>
- [14] LASAUSKAS, E. *Skrydžio principai*. Vilnius: Technika, 2008
- [15] CLANCY, L. J. *Aerodynamics*. [interaktyvus] [žiūrėtas 2013-01-05] Prieiga per internetą: http://books.google.lt/books/about/Aerodynamics.html?id=zaNTAAAAMAAJ&redir_esc=y
- [16] ARGATOV, I; SILVENNOINEN, R. *Structural optimization of the pumping kite wind generator*. [interaktyvus] [žiūrėtas 2013-01-05] Prieiga per internetą: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00158-009-0391-3.pdf>
- [17] KRENCISZEK, J.; AKINDEINDE, S.O.; BRAUN, H.; MARCEL, C.; OKYERE, E. *Mathematical Modelinf of the Pumping Kite Wind Generator: Optimization of the Power Output*. [interaktyvus] [žiūrėtas 2013-01-05] Prieiga per internetą: <http://www.win.tue.nl/casa/meetings/special/ecmi08/pumping-kite.pdf>
- [18] LANSDORP, B; OCKELS, W.J. *Design of a 100 MW laddermill for wind energy generation from 5 km altitude*. [interaktyvus] [žiūrėtas 2013-04-25] Prieiga per internetą: http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_AEWE/Applied_Sustainable_Science_Engineering_and_Technology/Publications/doc/Design_of_a_100_MW_laddermill__2__bas.pdf
- [19] HOUSKA, B.; DIEHL, M. *Optimal Control for Power Generating Kites*. [interaktyvus] [žiūrėtas 2013-04-25] Prieiga per internetą: <http://www.kuleuven.be/optec/files/Houska2007.pdf>
- [20] WEILENMANN, G; TISCHHAUSER, F. *Preliminary Study on Kite Autonomy. Design, Model and Control* [interaktyvus] [žiūrėtas 2013-04-25] Prieiga per internetą: http://students.asl.ethz.ch/upl_pdf/41-report.pdf