

# Modernių vėjo jėgainių savybės ir plėtojimo perspektyvos

**Gytis Petrauskas**

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

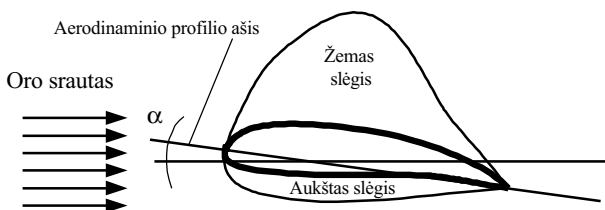
Šiame darbe apibūdinama vėjo jėgainių raida nuo senovinio vėjo malūno iki modernios vėjo jėgainės. Pateikiama vėjo jėgainių klasifikacija, nagrinėjamos bei palyginamos jų savybės ir valdymo būdai. Numatomos jų plėtojimo perspektyvos.

**Raktažodžiai:** vėjo energetika, vėjo jėgainė, atsinaujinantis energijos šaltiniai

Atėjus XXI a. ir didėjant elektros energijos poreikiams, reikia prisiminti ir vieną iš ekologiškų bei nereikalaujančių įvežtinio kuro energijos šaltinių – vėjo jėgainę. Vėjo malūnai grūdus malė ir medieną pjovė pajūryje jau XVI–XIX a. 1921 m. Lietuvoje veikė 900 vėjo malūnų. Ilgainiui juos pakeitė garo, vėliau ir naftos kuro pagrindu veikiančios jėgainės, atominė elektrinė. Tačiau šiuo metu, visame pasaulyje brangstant naftos produktams ir besiplėtojant vėjo energetikos pramonei, į šiuos energijos šaltinius vėl reikėtų atkreipti dėmesį.

Daugumai iškilus klausimas – kuo šiuolaikinė vėjo jėgainė skiriasi nuo XX a. pradžioje dar naudotų vėjo malūnų? Šį klausimą verta panagrinėti keliais aspektais: kaip pasikeitė pagrindinė jėgainės dalis – rotorius, tiesiogiai keičiantis kinetinę vėjo energiją į mechaninę jėgainės veleno energiją, kaip pasikeitė valdymo metodai ir principai, ir kas vėjo jėgainių laukia ateityje.

Panagrinėkime, kuo gi pasikeitė vėjo jėgainės rotorius aerodinamikos požiūriu, kai senoviniuose vėjo malūnuose, ir šiuolaikinėse vėjo jėgainėse naudojami aerodinaminiai profiliai. Praeinant pro jį oro srautui viršutinėje profilio dalyje (kurios kontūras yra ilgesnis už apatinės dalies kontūro ilgį) slėgis  $p_v$  bus mažesnis už  $p_0$ , o apatinėje dalyje slėgis  $p_a$  bus didesnis už  $p_0$  (1 pav.) [1]. Dėl to profilį veikia nor-



1 pav. Skirtingo slėgio zonos aerodinaminiam profilyje

malinė jėga  $F_N$ , kurią galima išskaidyti į dvi dedamąsias – kėlimo jėgą  $F_L$  (su oro srautu sudaro  $90^\circ$  kampą) ir pasipriešinimo jėgą  $F_D$  (kryptis lygiagreti su oro srauto kryptimi) (2 pav.). Pagal tai, kuri iš šių jėgų vyrauja, rotoriai skirstomi į keliamuosius ir stumiamuosius. Keliamieji ( $F_L > F_D$ ) rotoriai paprastai turi didesnę kampinę sukimosi greitį ir gana mažą sukimo momentą, o stumiamieji ( $F_L < F_D$ ) – atvirkščiai (1 lentelė). Praktikoje dažnai naudojami santykiniai dydžiai – kėlimo koeficientas  $C_L$  ir pasipriešinimo koeficientas  $C_D$ :

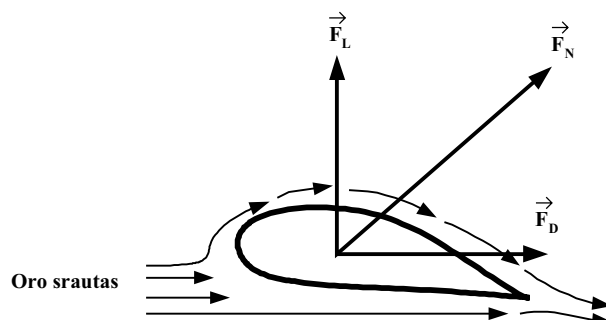
$$C_L = \frac{1}{2} \frac{F_L}{\rho V_1^2 A}, \quad (1)$$

$$C_D = \frac{1}{2} \frac{F_D}{\rho V_1^2 A}; \quad (2)$$

čia  $\rho$  – oro tankis,

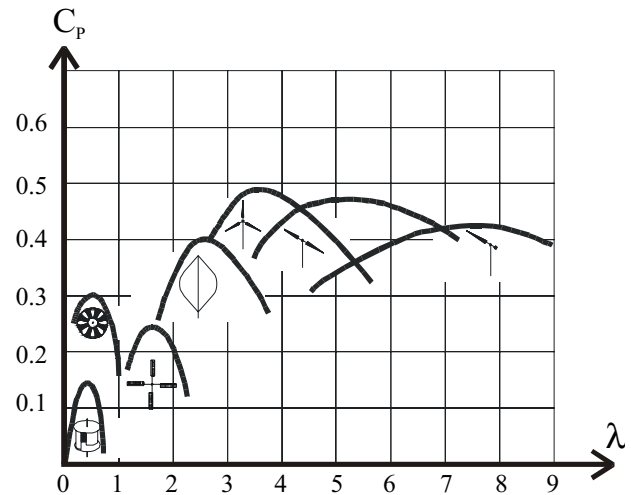
$V_1$  – oro srauto greitis prieš aerodinaminį profilį,  
 $A$  – aerodinaminio profilio plotas.

Mechaninė turbino veleno energija rotorius pavėrcia toli gražu ne visą pro jo skerspjūvio plotą



2 pav. Aerodinaminį profilį veikiančios jėgos

praeinančio oro srauto energiją. Didžiausias teorinis rotoriaus naudingumo koeficientas  $C_p$ , kuris apskaičiuojamas kaip veleno mechaninės energijos ir oro srauto kinetinės energijos santykis, gali būti 59% (Betzo riba). Jei apžvelgtume įvairių tipų rotorijų  $C_p$  priklausomybę nuo  $\lambda$  (3 pav.) [2], pamatytume, kad kaip tik rotoriuose, kuriuose vyrauja kėlimo jėga  $F_L$ , naudingumo koeficientas  $C_p$  yra didesnis. Santykinis rotoriaus greitis  $\lambda$  skaičiuojamas kaip rotoriaus mentės galo linijinio greičio santykis su vėjo greičiu. Matyti, kad kiekvieno tipo rotorius turi savąjį optimalų  $\lambda$ , kuriam esant jo naudingumo koeficientas didžiausias. Stumiamųjų rotorijų  $\lambda$  dažniausiai yra mažesnis už vienetą, taigi jų mentės galo linijinis greitis mažesnis už vėjo greitį. Tačiau jų sukimo momentas yra didelis. Propelerinių rotorijų mentės paprastai gaminamos iš stiklo plastiko, o tai gana brangi medžiaga. Ekonominiais sumetimais buvo pradėti naudoti vienamenčiai rotoriai, tačiau jų sukimosi dažnis gana didelis (optimalus santykinis greitis  $\lambda = 7,5$ ).



3 pav. Vėjo jėgainės naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinio rotoriaus greičio

Vadinas, mentės galo linijinis greitis būna 7–8 kartus didesnis už vėjo greitį, todėl iškyla mentės tvir-

1 lentelė. Vėjo jėgainių pagrindinės techninės charakteristikos

Rotoriaus tipas	Kampinis sukimosi greitis $\omega$	Naudingumo koeficientas $C_p$	Momentas M
Vienmentis propelerinis*	Didelis	0,42	Mažas
Dvimentis propelerinis*			
Trimentis propelerinis*			
Vertikalios ašies (Darrieus)*	"	0,40	"
Daugiamentis			
Plokščiamentis	Vidutinis	0,35	Vidutinis
Samčiamentis	Mažas	0,17	Didelis
	"	0,15	"

Pastaba: žvaigždute pažymėtuose rotoriuose ( $F_L > F_D$ ).

tumo problemų dėl per daug didelės išcentrinės jėgos. Šiuo metu vienamėnčių propelerinių rotorių atsisakoma ir naudojami 2 ir 3 menčių rotoriai.

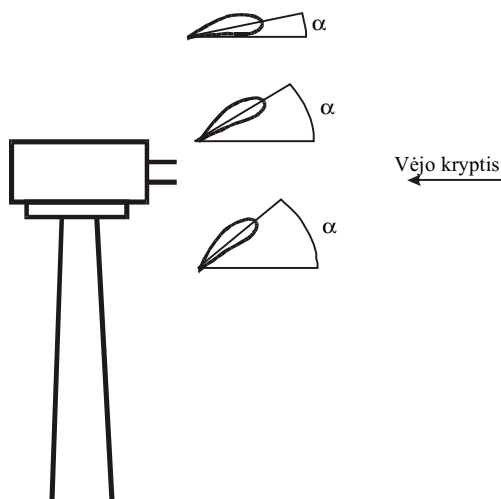
Paagal turimus duomenis (1 lentelė) galima įvertinti senovinio vėjo malūno plokščiamėnčio rotoriaus ir šiuolaikinės vėjo jėgainės propelerinių rotorių skirtumus. Jei plokščiamėnis rotorius sukimo momentą kurdavo daugiausia stūmimo jėga  $F_D$ , tai šiuolaikiniuose propeleriniuose rotoriuose didžiausią poveikį daro kėlimo jėga  $F_L$ , o tai lemia santykinį greitį  $\lambda$ , kuris šiuolaikiniuose rotoriuose jau yra daug didesnis. Propelerinių rotorių naudingumo koeficientas  $C_p$  yra 0,48 ir gerokai didesnis už plokščiamėnčių (0,17), o tai reiškia, kad šiuolaikiniai rotoriai naudingąją mechaninę energiją paverčia gerokai didesnę vėjo kinetinės energijos dalį.

Vėjo greitis ir kryptis yra nuolat kintantys dydžiai. Atsižvelgiant į vėjo greičio ir krypties pokyčius turbiną nuolat valdo pakopų valdymo sistema. Pagrindinė valdymo sistemos funkcija yra galios optimizavimo funkcija, t. y. iš pro turbinos rotoriaus plotą praeinančio oro srauto išgauti galią, artimą vardinei turbinos galiai. Kita valdymo sistemos funkcija – išlaikyti stabilų turbinos rotoriaus sukimosi greitį. Ši funkcija yra reikalinga tik tokio tipo turbinose, kurių generatoriaus apvijos (su generatoriumi per pavaru dėžę mechanškai sujungtas turbinos rotorius) prie elektros tinklo prijungtos tiesiogiai. Taigi generatoriaus ir jėgainės rotoriaus sukimosi dažnis turi būti suderintas su integruotos energijos sistemos elektros tinklo įtampos dažniu. Jėgainėse, kurių generatoriai prie elektros tinklo jungiami per elektroninį dažnio keitiklį (lygintuvo – inverterio sistema), rotoriaus sukimosi greičio stabilizavimas nereikalingas.

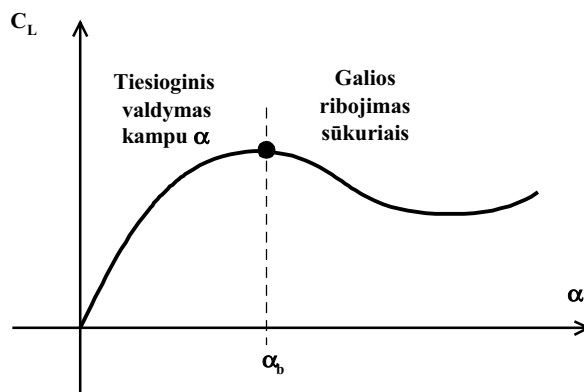
Moderniose vėjo jėgainėse dažniausiai naudojami šie mechaniniai turbinos galios ir sukimosi greičio valdymo būdai:

- valdymas keičiant kampą tarp oro srauto krypties ir aerodinaminio profilio ašies  $\alpha$  (pitch control);
- pasyvus valdymas oro sūkuriams, susidarantiems kitapus rotoriaus mentės (passive stall control);
- kompleksinis valdymas;
- valdymas keičiant kampą  $\delta$  tarp oro srauto krypties ir horizontaliosios turbinos ašies (yaw control).

Valdymas kampų tarp oro srauto krypties ir aerodinaminio profilio ašies  $\alpha$  (4 pav.) yra pagrįstas kėlimo jėgos priklausomybe nuo šio kampo (5 pav.). Keičiant kampą  $\alpha$  nuo nulio iki  $\alpha_b$ , kinta ir kėlimo jėga  $F_L$ . Tokiu būdu galima optimizuoti jėgainės generuojamą galią bei rotoriaus sukimosi dažnį. Tai leidžia maksimaliai panaudoti oro srauto energiją, kai jo greitis ne didesnis už vardinį, ir apriboti galią, kai oro srauto greitis padidėja, palyginti su pro-



4 pav. Vėjo jėgainės valdymas kampų tarp oro srauto krypties ir aerodinaminio profilio ašies  $\alpha$



5 pav. Kėlimo koeficiento priklausomybė nuo valdymo kampo

jektiniu. Kėlimo jėgos priklausomybė nuo kampo  $\alpha$  galima įvertinti pagal formulę:

$$F_L = \pi V_1^2 c \sin \alpha A;$$

čia  $V_1$  – oro srauto greitis prieš turbinos rotorių, (3)

$A$  – aerodinaminio profilio plotas;

$c$  – aerodinaminio profilio plotis;

$\alpha$  – kampas tarp aerodinaminio profilio ašies ir oro srauto judėjimo krypties.

Valdymas kampų  $\alpha$  pasižymi tikslumu. Be to, taikant šį metodą išlaikoma stabili rotoriaus mentės mechaninė apkrova [3]. Tačiau reikalingas papildomas rotoriaus menčių valdymo įrenginys.

Naudojant pasyvų valdymą sūkuriams rotoriaus mentė nejudamai įtvirtinama tam tikru kampų  $\alpha$ . Didėjant oro srauto greičiui auga ir kitapus rotoriaus mentės susidarantys oro sūkuriams, kurie slopina kėlimo jėgą ir tokiu būdu apriboja jėgainės galią. Taip pasiekama, kad jėgainės galia nebūtų didesnė už vardinę. Du trečdaliai pasaulyje gaminamų jėgai-

nių naudoja sukurinių valdymą. Pagrindinis šio metodo privalumas yra paprastumas, nes mentės nejudamai tvirtinamos prie jėgainės ašies. Tačiau esant mažiems oro srauto greičiams dėl sukurių prarandama dalis energijos. Be to, iškyla tam tikrų problemų dėl sukurių sukeliama vibracijų.

Kompleksinis valdymas jungia abu anksčiau minėtus būdus. Kol vėjo greitis nesiekia vardinio, naudojamas valdymas kampu  $\alpha$ . Kai vėjo greitis didesnis už vardinį, prasideda galios ribojimas sukuriais.

Jėgainės rotorius ir horizontaliosios ašys (6 pav.) nuolat orientuojamos pagal vėjo kryptį. Keičiant kampą tarp oro srauto krypties ir horizontaliosios jėgainės ašies  $\delta$  galima reguliuoti ir turbinos galią. Valdymas kampu  $\delta$  yra labiau teorinis, kadangi susijęs su gana nemažomis valdymo mechanizmo energijos sąnaudomis, nes nuolat kintant vėjo greičiui tenka sukinėti visą nemažai sveriančią jėgainę. Praktikoje jis taikomas tik ne didesnėms kaip 1 kW galios jėgainėms.

Pagrindiniai šiuolaikinių vėjo jėgainių gamintojai yra danai. Jų rinką sudaro 35 šalys, iš kurių didžiausios yra Vokietija, Indija, Olandija, Kinija, Ispanija, Didžioji Britanija ir Švedija. Vėjo jėgainių rinka 1993–1998 m. išaugo perpus ir sparčiai didėja toliau. Šiuo metu Danijoje veikia 4800 vėjo jėgainių. Per 80% jų priklauso vėjo energetikos kooperatyvams arba individualiems fermeriams.

Europos Sąjungoje numatoma skatinti vidutinės klasės vėjo jėgainių masinę gamybą. Šiuo metu vyksta konkurencinė kova tarp dviejų vėjo jėgainių koncep-

cijų. Pirmoji koncepcija – tai  $\alpha$  kampu valdomos vėjo jėgainės su daugiapoliu sinchroniniu generatoriumi, kuris jungiamas prie integruotos energijos sistemos per tarpinį dažnio keitiklį, sudarytą iš lygintuvo ir tiristorinio inverterio. Plačiausiai taikoma šios koncepcijos jėgainė yra „Enercon E-40“. Nors šios koncepcijos jėgainėse ir yra papildoma grandis (dažnio keitiklis) elektrinėje dalyje, tačiau iškrenta viena mechaninių grandžių – pavarų dėžė. Rotorius su generatoriumi jungiamas tiesiogiai. Tai leidžia sumažinti turbinos masę, nes dažnio keitiklis montuojamas žemėje, ir išplėsti rotoriaus sukimosi dažnio reguliavimo ribas, nes generatoriaus sukimosi dažnio nereikia derinti, pvz., su elektros tinklo įtampos dažniu. Antroji koncepcija – taip pat  $\alpha$  kampu valdomos jėgainės su tiesiogiai prie tinklo jungtu asinchroniniu generatoriumi. Plačiausiai taikoma šios koncepcijos jėgainė yra „Vestas V-39“. Šioje koncepcijoje nenaudojamas brangiai kainuojantis dažnio keitiklis, bet rotorius su generatoriumi jungiamas per mechaninę pavarų dėžę. Tai sumažina jėgainės kainą, bet gerokai susiaurina rotoriaus sukimosi dažnio reguliavimo ribas, kurios priklauso nuo asinchroninio generatoriaus slydimo, ir šitaip sumažina rotoriaus sukimosi dažnio optimizavimo pagal galią galimybes.

## IŠVADOS

1. Dėl didesnio naudingumo koeficiento šiuolaikinėse vėjo jėgainėse naudojami keliamosios jėgos rotoriai, kurių  $F_L > F_D$ .

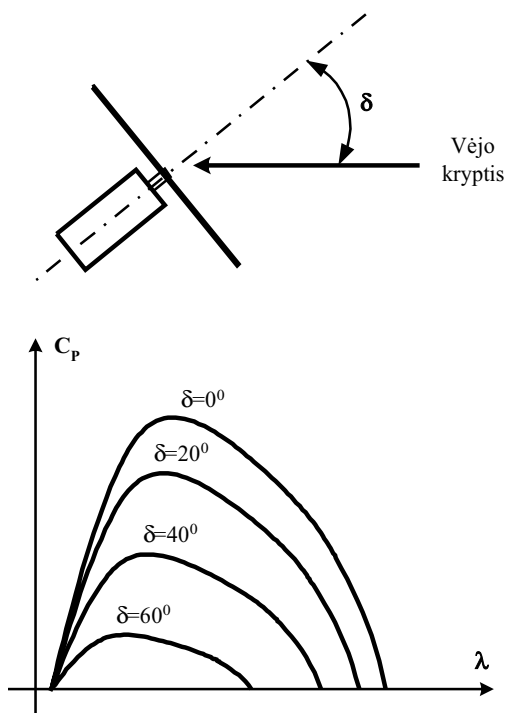
2. Nors daugumoje iki šiol įrengtų vėjo jėgainių naudojamas pasyvus valdymas sukuriais, tačiau tobulėjant hidraulinei ir elektromechaninei mentės kampo valdymo įrangai, plinta ir valdymas kampu tarp oro srauto krypties ir aerodinaminio profilio ašies.

3. Perspektyvoje vis didesnę rinkos dalį užims vidutinės klasės vėjo jėgainės, kurių pagrindą sudaro dvi konkuruojančios koncepcijos – jėgainė su daugiapoliu sinchroniniu generatoriumi jungiama prie tinklo per elektroninį dažnio keitiklį ir jėgainė su tiesiogiai prie elektros tinklo jungiamu asinchroniniu generatoriumi bei mechanine pavarų dėže.

Gauta  
2000 12 11

## Literatūra

1. Paknys L. Transporto priemonių aerodinamikos pagrindai. Kaunas, 1999. P. 48–50.
2. Walker J. F. Wind Energy Technology. Chichester: Wiley, c 1997. 21 p.
3. Freris L. L. Wind energy conversion systems. New York, 1990. P. 275–297.



6 pav. Jėgainės galios valdymas kampu  $\delta$

**Gytis Petrauskas**

**SPECIAL PROPERTIES AND DEVELOPMENT OF  
MODERN WIND TURBINES**

**S u m m a r y**

The development of wind turbines from the ancient windmills till the modern wind turbines and their classification are discussed. Methods of wind turbine control are analysed and compared. Prognoses of the development of wind turbines are done.

**Key words:** windmill, wind turbine, pitch control, stall control, yaw control, renewable energy

**Гитис Пятраускас**

**СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
СОВРЕМЕННЫХ ВЕТРОВЫХ ТУРБИН**

**Р е з ю м е**

В статье обсуждается развитие ветровых сооружений, начиная со старинной ветровой мельницы и кончая современными ветровыми турбинами для производства электроэнергии. Обсуждаются и сравниваются их свойства и методы управления, делается прогноз направлений их развития.

**Ключевые слова:** ветровая энергетика, ветровая турбина, возобновляющиеся источники энергии