



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Vėjo elektrinių panaudojimo elektros sistemos balansavimui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Jaunius Sabaliauskas**

Projekto autorius

**Prof. Saulius Gudžius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Vėjo elektrinių panaudojimo elektros sistemos balansavimui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Jaunius Sabaliauskas**

Projekto autorius

**Prof. Saulius Gudžius**

Vadovas

**Prof. Audrius Jonaitis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Jaunius Sabaliauskas

## **Vėjo elektrinių panaudojimo elektros sistemos balansavimui tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Jaunius Sabaliauskas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Sabaliauskas, Jaunius. Vėjo elektrinių panaudojimo elektros sistemos balansavimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: vėjo elektrinės, menčių kampo pasukimas, sistemos balansavimas, elektros sistema.

Kaunas, 2024, 45 p.

## Santrauka

Mano baigiamojo darbo tikslas yra išnagrinėti vėjo elektrinių, o tiksliau menčių pasukimo kampo, daromą įtaką galios balansavimui elektros sistemoje, nagrinėjant tiek galimybes prisidėti prie trūkstamos galios užtikrinimo, tiek prie balansavimo žemyn, kai tinkle generuojama perteklinė galia.

Šiame darbe vienas iš mano išsikeltų uždavinių yra išnagrinėti elektros sistemos balansavimo vėjo elektrinėmis galimybes, pristatyti skirtingus vėjo elektrinių generatorių tipus. Bus apžvelgiami sistemos balansavimo vėjo elektrinėmis būdai, taip pat palyginami skirtingų vėjo elektrinėse naudojamų generatorių tipai.

Dar viena tema, kurią nagrinėju šiame darbe, yra teorinės menčių pasukimo kampo galimybes vėjo elektrinėse sistemos galios balansui palaikyti bei PI ir PID valdiklių panaudojimas jose. Kai galios paklausa sistemoje išauga, vėjo elektrinės gali pradėti sukintis kiek greičiau kontroliuojamos savo menčių pasukimo kampa, taip sudarydamos palankesnes sąlygas vėjui sukintis mentes. Taip pat menčių pasukimo kampas gali būti naudojamas ir palaikyti vėjo elektrinių generuojamą galią aukščiausiam taške. Be kita ko, jis gali būti panaudojamas ir balansavimui žemyn, kai yra generuojama perteklinė galia ir visi energijos kaupikliai yra pilnai užpildyti. Darbe taip pat palyginami PI ir PID valdiklių panašumai, skirtumai, veikimo principai.

Projektinėje dalyje modeliuojamas vėjo elektrinių parkas su menčių pasukimo kampo galimybe MATLAB Simulink programiniame pakete. Šiame darbe tiriama, kiek sumodeliuotame vėjo elektrinių parke galima keisti menčių pasukimo kampa pri skirtingų vėjo greičių, siekiant išlaikyti vėjo elektrinių didžiausią galimą generaciją ar balansuoti žemyn.

Darbo pabaigoje pateikiu išvadas ir viso darbo apibendrinimą, gautus rezultatus.

Sabaliauskas, Jaunius. Research of Use of Wind Power Plants for Balancing Electric System. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, engineering science.

Keywords: wind power plants, pitch angle control, electrical system, power balance.

Kaunas, 2024, 45 p.

### **Summary**

The aim of this work is to examine the influence of wind power plants, blade pitch angle control to be more accurate, on power balancing in the electrical system, examining both the possibilities of contributing to the provision of missing power and to down-balancing when excess power is generated in the network.

In this paper, one of the tasks I set is to examine the possibilities of balancing the electrical system with wind power plants, also to make an overview of different types of wind power generators. The methods of system balancing in wind farms will be reviewed, as well as a comparison of different types of generators used in wind farms.

Another topic that I examine in this paper is the theoretical possibilities of the pitch angle control in wind power plants to maintain the power balance of the system and also the use of PI and PID controllers in them. When the demand for power in the system increases, the wind turbines can start spinning a little faster by controlling the pitch angle of their blades, thus making it easier for the wind to spin the blades. Also, the pitch angle control can be used to maintain the power generated by wind farms at the highest point. Among other things, it can also be used for balancing down when excess power is generated and all energy storages are fully charged. The work also compares the similarities, differences, and principles of operation of PI and PID controllers.

The project part simulates an offshore wind farm with the pitch angle control option in the MATLAB Simulink software package. This paper investigates the extent to which the generated power can be changed at different wind speeds and blade angles in a simulated wind farm.

At the end of the work, I present the conclusions and a summary of the entire work, the obtained result.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas.....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Elektros sistemos balansavimas vėjo elektrinėmis .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Vėjo elektrinių klasifikacija.....</b>	<b>12</b>
2.1. Klasifikacija pagal sukimosi ašį. ....	12
2.2. Klasifikacija pagal veikimo vietą. ....	12
2.3. Klasifikacija pagal generatoriaus tipą. ....	13
<b>3. Menčių pasukimo kampo įtaka vėjo elektrinių energijos generacijai .....</b>	<b>14</b>
<b>4. Menčių pasukimo kampui valdyti naudojamos technologijos .....</b>	<b>16</b>
<b>5. PI, PID valdikliai menčių pasukimo kampui reguliuoti .....</b>	<b>17</b>
5.1. PI valdiklis.....	17
5.2. PID valdiklis.....	17
<b>6. Dirbtinis intelektas VE menčių pasukimo kampui valdyti.....</b>	<b>20</b>
6.1. Apytikslės logikos metodas (FL).....	20
6.2. Dirbtinis neuroninis tinklas (ANN).....	21
<b>7. Vėjo elektrinių kuriamos problemos tinklui bei vartotojams .....</b>	<b>22</b>
<b>8. Vėjo elektrinių generuojamos galios priklausomybė nuo kitų dydžių .....</b>	<b>23</b>
<b>9. MATLAB Simulink modelis .....</b>	<b>26</b>
<b>10. Modeliavimas esant nominaliam arba arti nominalaus vėjo greičiui.....</b>	<b>30</b>
<b>11. Modeliavimas esant avariniam vėjo greičiui.....</b>	<b>33</b>
<b>12. Modeliavimas balansavimui žemyn .....</b>	<b>37</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>42</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>43</b>

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. PI ir PID valdiklių parametrų palyginimas .....	19
2 lentelė. Paviršiaus šiurkštumo ilgio priklausomybė nuo vietovės .....	25

## Paveikslų sąrašas

1 pav. PI valdiklio veikimo schema.....	17
2 pav. PID valdiklio veikimo schema.....	19
3 pav. FL veikimo principas .....	20
4 pav. ANN taikymas.....	21
5 pav. Pagrindinė blokinė modelio schema .....	27
6 pav. Vėjo elektrinių parko modelio blokinė schema .....	28
7 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė prie 9 m/s.....	29
8 pav. Vėjo greičių pasiskirstymas atskiruose trijuose vėjo elektrinių zonose (VE nominalus greitis 9 m/s).....	30
9 pav. Menčių pasukimo kampas prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 9 m/s).....	31
10 pav. Aktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 9 m/s).....	31
11 pav. Reaktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių .....	32
12 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė prie 15 m/s.....	33
13 pav. Vėjo greičių pasiskirstymas atskiruose trijuose vėjo elektrinių zonose (VE nominalus greitis 15 m/s).....	34
14 pav. Menčių pasukimo kampas prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 15 m/s).....	35
15 pav. Aktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių ir menčių pasukimo kampų (VE nominalus greitis 9 m/s) .....	35
16 pav. Reaktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 9 m/s).....	36
17 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė prie nominalaus 15 m/s vėjo greičio .....	37
18 pav. Vėjo greičių pasiskirstymas balansavimo žemyn modeliavimui (VE nominalus greitis 15 m/s).....	38
19 pav. Menčių pasukimo kampas modeliuojant balansavimą žemyn (VE nominalus greitis 15 m/s).....	39
20 pav. Aktyviosios galios pokytis modeliuojant balansavimą žemyn (VE nominalus greitis 15 m/s).....	40
21 pav. Reaktyviosios galios pokytis modeliuojant balansavimą žemyn (VE nominalus greitis 15 m/s).....	40



## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

MPK – menčių pasukimo kampas;

VE – vėjo elektrinė;

SE – saulės elektrinė;

VG – vėjo greitis;

MPPT – optimalios galios taško sekimas;

HAVE – Horizontalios ašies vėjo elektrinės;

VAVE – vertikalios ašies vėjo elektrinės;

DFIG – dvigubo maitinimo indukcinis generatorius;

PMSG – nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius;

PI – proporcinio integralo valdiklis;

PID – proporcinio integralo išvestinis valdiklis;

FL – apytikslės logikos metodas;

ANN – dirbtinis neuronų tinklas;

STATCOM – statinis sinchroninis kompensatorius;

RLC filtras – R (varža), L (induktorius) ir C (kondensatorius) sujungti nuosekliai arba lygiagrečiai;

## Ivadas

Šiuo metu atsinaujinanti energetika pasaulyje išgyvena tikrą pakilimo amžių. Didžioji dalis valstybių stengiasi įvertinti galimybes pasigaminti visą reikiamą elektros energiją vien iš atsinaujinančių išteklių, taip tampant energetiškai nepriklausomomis. Šiam siekiui įtaką daro ir valstybėms sudarytas žaliasis kursas, kuriame numatoma iki 2050 metų kardinaliai sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį. Taip pat žaliosios energetikos plėtrą skatina ir „FIT for 55“ projektas (numatoma, kad iki 2030 metų ES išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis bus sumažintas bent 55 procentais). Diegiant atsinaujinančios energijos elektrines didžiausiu iššūkiu taps sistemos galios balansas, kadangi daugėjant gaminamos energijos kiekiui iš saulės, vėjo elektrinių valstybės taps priklausomomis nuo meteorologinių sąlygų. Valstybės susidurs su galios balanso užtikrinimo problema, nes saulės šviesa ir vėjo greitis nėra pastovūs dydžiai. Galios balansas – suvartojamos ir pagaminamos elektros energijos sąryšis, kuriuo apibrėžiama, kad kiekvienu momentu pagaminama elektros energija būtų lygi suvartojamai elektros energijai. Šiuo atveju, plėtojant žaliąją energetiką, elektrinių rezerviniai galingumai yra labai riboti, todėl būtina kombinuoti visų tipų atsinaujinančią energiją su jos kaupikliais, tik taip bus užtikrinamas sklandus elektros energetikos sistemos darbas ateityje. Bene svarbiausias vėjo elektrinių privalumas, lyginant su saulės elektrinėmis, yra tas, kad jos gali pakankamai ženkliai prisidėti prie sistemos balansavimo, kadangi jos turi besisukančių dalių ir inercijos. Kai galios paklausa sistemoje išauga, vėjo elektrinės gali pradėti sukintis kiek greičiau kontroliuodamos savo menčių pasukimo kampą. Neskaitant šio kampo pasukimo privalumo, vėjo elektrinės turi dar vieną esminį teigiamą aspektą. Jas galima statyti jūroje. Tokiu atveju generacija bus net didesnė nei sausumoje, kadangi jūrinėje dalyje vėjo greičiai yra ženkliai didesni, o Lietuvai tai yra ypač svarbu, nes mūsų šalis nepasižymi dideliais vėjo greičiais sausumoje. Nors yra ir kitų metodų, orientuotų į vėjo elektrinių inercijos valdymą ir dažnio palaikymą, tokių kaip MPPT taikymas (optimalios galios taško sekimas), kuris taip pat naudojamas palaikyti dažniui ir kompensuoti galios poreikį, taip pat rotoriaus kampo metodas ir kiti, aš pasirinkau nagrinėti MPK (menčių pasukimo kampo) daromą įtaką dėl to, kad jis gali užtikrinti stabilaus pirminio dažnio palaikymą tinkle ir prisidėti prie galios mažinimo, jeigu to reikia balansavimui žemyn.

Mano baigiamojo darbo tikslas – išnagrinėti vėjo elektrinių menčių pasukimo kampo įtaką galios balansavimui elektros sistemoje, nagrinėjant tiek galimybes prisidėti prie trūkstamos galios užtikrinimo, tiek prie balansavimo žemyn, kai tinkle generuojama perteklinė galia.

Savo baigiamajame darbe išsikėliau tris uždavinius:

- 1) išnagrinėti elektros sistemos balansavimo vėjo elektrinėmis galimybes, pristatyti skirtingus vėjo elektrinių generatorių tipus.
- 2) ištirti teorines menčių pasukimo kampo galimybes vėjo elektrinėse bei palyginti PI ir PID valdiklių panaudojimą jose.
- 3) sumodeliuoti vėjo elektrinių parką su menčių pasukimo galimybe MATLAB „Simulink“ programiniame pakete bei ištirti, kiek sumodeliuotame vėjo elektrinių parke galima keisti menčių pasukimo kampą prie skirtingų vėjo greičių, siekiant atlikti sistemos balansavimą.

## 1. Elektros sistemos balansavimas vėjo elektrinėmis

Visų pirma reikėtų suvokti, kas yra elektros sistemos galių balansas. Bendruoju atveju tai yra privaloma sąlyga, jog pagaminamas ir suvartojamas elektros energijos kiekis kiekvienu laiko momentu būtų lygūs. Tai reiškia, kad tinkle negali būti patiekama mažiau elektros energijos nei jos reikia vartotojams, lygiai taip pat, kaip ir negali būti gaminama daugiau nei jos reikia, bet kurio laiko momentu. Tik esant balansui elektros sistemoje bus užtikrinta stabili įtampa, dažnis, vartotojai nepatirs nepatogumų. Šiandien tinklo balansavimas atliekamas įvairiais metodais, priklausomai nuo to, kaip staigiai reikia padidinti / sumažinti pagaminamos ir atiduodamos į tinklą elektros energijos kiekį. Balansavimas gali būti atliekamas įvairiais kaupikliais, o taip pat hidroakumuliacinėmis elektrinėmis, vėjo elektrinėmis ir kitais įrenginiais, jeigu staiga išaugo elektros energijos poreikis. Lygiai taip pat šie įrenginiai gali būti naudojami ir atsiradus energijos pertekliui. Tuo atveju perteklinė elektros energija gali būti naudojama užkrauti kaupiklius, pumpuoti vandenį siurbliais į aukštesnę baseiną hidroakumuliacinėse elektrinėse arba pasinaudojant menčių pasukimo kampu priletinti vėjo elektrinių sukimąsi.

Kadangi savo baigiamajame darbe aš nagrinėju sistemos balansavimą vėjo elektrinėmis, apie tai pakalbėsiu plačiausiai. Bendruoju atveju, kaip ir minėjau prieš tai, vėjo elektrinės gali būti panaudojamos tiek balansavimui aukštyne, kuomet didinamas atiduodamos elektros energijos į tinklą kiekis, arba balansavimui žemyn, kuomet vėjo elektrinėms mažinamas elektros energijos kiekis tinkle. Lyginant su saulės elektrinėmis, vėjo elektrinės turi besisukančių dalių, todėl turi plačias panaudojimo galimybes sistemos balansavimui. Tai yra vienas iš esminių vėjo elektrinių privalumų, lyginant su saulės elektrinėmis. Savaimė suprantama, kad visos elektros sistemos subalansuoti vien tik vėjo elektrinėmis nepavyks, tačiau jos gali atlikti ženklų vaidmenį jas kombinuojant su kitais balansavimui skirtais įrenginiais, tokiais kaip kaupikliai. Galios balansavimas vėjo elektrinėmis gali būti atliekamas keliais būdais. Vienas iš jų yra generatoriaus rotoriaus srovės keitimas (rotoriaus sukimosi greičio keitimas, kuomet vėjo elektrinės generatoriaus sukimosi dažnis gali skirtis nuo tinklo esančio dažnio, t. y. nebūti lygus 50 Hz). Kitas būdas yra menčių pasukimo kampo (angl. „pitch angle“) panaudojimas vėjo elektrinių mentėms valdyti, taip didinant ar mažinant generuojamą galią. Kadangi vėjo elektrinių rotoriaus kampo metodo panaudojimas priklauso nuo to, koks generatorius yra naudojamas, savo darbe atliksiu elektros sistemos balansavimo tyrimą pasinaudojant menčių pasukimo kampu, kadangi principas yra panašus daugelyje vėjo elektrinių ir šiandien ši technologija yra naudojama beveik visose vėjo elektrinėse (svarbu paminėti, kad sklandžiam sistemos balansavimui privalu naudoti abu šiuos balansavimo metodus, jeigu yra tokia galimybė). Darydamas savo baigiamojo darbo tyrimą atliksiu teorinę apžvalgą su keliais scenarijais, kuriuose galima pasinaudoti menčių pasukimo kampu sistemos balansavimui vėjo elektrinėmis. Atlikęs teorinę menčių pasukimo kampo apžvalgą, detaliai aprašęs MPK naudojimą ir galimybes, toliau savo baigiamajame darbe „SIMULINK“ aplinkoje atliksiu įvairius vėjo elektrinių parko modeliavimus prie skirtingų vėjo greičių, taip siekdamas išsiaiškinti balansavimo galimybes prie skirtingų sąlygų. Tyrimo metu bandysiu išsiaiškinti, ar taikant menčių pasukimo kampo keitimą galima išlaikyti vėjo elektrinių darbą normaliu režimu esant ribiniam vėjo greičiui, kai daroma prielaida, jog būtina, kad vėjo elektrinės ir toliau generuotų galią į tinklą bei nebūtų visiškai atjungiamos, taip siekiant palaikyti balansą tinkle esant galios deficitui. Taip pat sumodeliuosiu scenarijų, kurio metu taikant menčių pasukimo kampo keitimą vėjo elektrinės turės atlikti balansavimą žemyn su sąlyga, kad visi elektros energijos kaupikliai jau užpildyti. Bus stebima kiek ženkliai gali būti mažinama į tinklą atiduodama generuojama galia prie skirtingų vėjo greičių. Iš gautų modeliavimo rezultatų bus galima matyti kaip

ženkliai vėjo elektrinės gali prisidėti prie elektros sistemos balansavimo nepriklausomai nuo kitų balansavimo įrenginių.

## **2. Vėjo elektrinių klasifikacija**

### **2.1. Klasifikacija pagal sukimosi ašį.**

Horizontalios ašies vėjo elektrinės (HAVE). Labiausiai paplitusios ir pritaikytos didesniems aukščiams ir vėjo greičiams, dėl to gali generuoti ir didesnę galią. Be kita ko, horizontalios ašies vėjo elektrinės yra ir paprastesnės, jų veikimas grindžiamas slėgių skirtumu prieš rotorį ir už jo. Svarbiausias dalykas norint išlaikyti šias elektrines efektyviomis, kad šio tipo VE mentės išlaikytų kampą su vėjo kryptimi (tam naudojamos posūkio sistemos visai turbinai pasukti ir menčių pasukimo sistema, kad pakreiptų tik pačias mentes). Atsižvelgiant į tai, jog HAVE tipo elektrinės turi sukintis prieš vėją, jų veikimas tampa komplikuoju esant gūsingam ir itin nepastovių krypčių vėjui.

Vertikalios ašies vėjo elektrinės (VAVE). Šio tipo vėjo elektrinės sukasi aplink vertikalų veleną, o pačios VE mentės išdėstytos statmenai velenui. Ko gero, esminis šio tipo elektrinių privalumas yra tai, kad jos gali generuoti elektros energiją nepriklausomai nuo to, iš kurios pusės pučia vėjas. Vadinasi joms nėra aktualus pasukimas. Šios elektrinės, kaip ir horizontalios ašies, turi generatorių elektros energijai gaminti bei pavarų dėžę, kuri padeda reguliuoti turbinos sukimosi greitį priklausomai nuo vėjo greičio. VAVE daugiausia naudojamos tik kaip alternatyvus elektros energijos šaltinis gyvenamosios paskirties pastatams arba kaip tyrimo objektas moksliniais tikslais. Pramoniniuose objektuose tokio tipo elektrinės sutinkamos itin retai.

### **2.2. Klasifikacija pagal veikimo vietą.**

Sausumos vėjo elektrinės. Tai patogiausias statyti VE variantas, kadangi vėjo greičio matavimai sausumoje yra paprastesni ir yra lengviau parinkti statybos vietą, taip pat nereikalingas papildomas komponentų gabenimas laivais. Be to, statybos ir priežiūra yra gerokai paprastesni. Tačiau dažnu atveju susiduriama su aplinkinių vietovių gyventojų nepasitenkinimu dėl gadinamo vaizdo ar net triukšmo, jeigu VE parkas yra įrengtas pakankamai nedideliu atstumu nuo privačios gyventojų valdos. Bene esminis tokių vėjo elektrinių minusas yra tai, jog sausumos vėjas nepasižymi dideliu stabilumu. Todėl generuojama galia pastoviai skirsis, o kartais elektros energija išvis bus negeneruojama. Be kita ko, užimamas ir žemės plotas, kuriame ateityje galėtų įsikurti pramonė ar gyventojai, o pastačius vėjo elektrines aplinkinis plotas dažniausiai lieka nenaudojamas arba naudojamas ūkiniais tikslais.

Jūrinės vėjo elektrinės. Šio tipo VE pasižymi didesniais aukščiais, didesne generuojama galia ir didesniu efektyvumu, kadangi jūroje vėjo greitis yra didesnis nei sausumoje. Taip pat statant tokio tipo vėjo elektrines aplink jas sudaroma apsaugos zona su ribota prieiga, todėl gali būti saugoma aplinkinė jūros ekosistema. Statant vėjo elektrines atviroje jūroje taip pat yra ir niuansų, tokių kaip sudėtingesnis įrengimas, brangesnis įrengimas, ilgesni pastatymo terminai, sudėtingesnė priežiūra, didesnė avarinio turbinos stabdymo tikimybė dėl didelių vėjo greičių, taip pat greitesnis VE

komponentų nusidėvėjimas dėl agresyvios aplinkos (drėgmė, druskos). Norint statyti vėjo elektrines atviruose vandenyse, taip pat reikalingas ir kabelių tiesimas iki sausumos, o tai sudaro papildomus laiko ir pinigų kaštus, mažina patikimumą.

### 2.3. Klasifikacija pagal generatoriaus tipą.

DFIG (dvigubo maitinimo indukcinis generatorius) – tai asinchroninio tipo generatorius, kurio apvijos sujungtos su keitikliu per šepečius ir slydimo žiedus. Šio tipo generatorius taip pavadintas dėl to, kad jis tiekia energiją tiek per rotorį (prijungta prie keitiklio per slydimo žiedus ir šepečius), tiek per statorių (statorius prijungtas prie tinklo), tokiu principu sudarant galimybes skirtis rotoriaus dažniui nuo tinklo dažnio. Šio tipo generatoriuje taip pat naudojamos pavaros, priešingai nei PMSG (nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius). Taikant šį generatorių tarp kintamosios įtampos tinklo ir rotoriaus yra naudojamas keitiklis AC – DC – AC (dar žinomas kaip „back to back“ keitiklis). Tokio tipo keitiklis valdo rotoriaus srovę, taip valdydamas rotoriaus dažnį ir į tinklą tiekiamas aktyviają ir reaktyviają galias. Esminis pliusas, kad tokio tipo generatorius gali tiek generuoti, tiek suvartoti reaktyviają galią, o tai reiškia, kad gali padėti palaikyti tinklo stabilumą. Dar vienas didelis tokio tipo generatorių pliusas yra tai, jog taikant juos vėjo elektrinėse rotoriaus srovės valdymas leidžia generatoriui išlikti sinchronizuotam su tinklu kintant vėjo greičiui. Be kita ko, šio tipo generatorius yra ir pigesnis, kadangi jam nereikia magnetų, o keitiklio srovė yra apie 3 kartus mažesnė, dėl to automatiškai mažėja ir keitiklio kaina, jau nekalbant apie jo dydį. Statoriaus ir rotoriaus, srauto ir įtampos lygtys DFIG (1,2,3 ir 4 formulės paimtos iš [3] šaltinio):

$$V_{sdq} = r_s \dot{i}_{sdq} + j \omega_e \varphi_{sdq} + \frac{d\varphi_{sdq}}{dt} \quad (1)$$

$$V_{rdq} = r_r \dot{i}_{rdq} + j \omega_{sl} \varphi_{rdq} + \frac{d\varphi_{rdq}}{dt} \quad (2)$$

$$\varphi_{sdq} = L_s \dot{i}_{sdq} + L_m \dot{i}_{rdq} \quad (3)$$

$$\varphi_{rdq} = L_r \dot{i}_{rdq} + L_m \dot{i}_{sdq} \quad (4)$$

Čia

$r_s, r_r$  - statoriaus varža ir rotoriaus varža;

$L_s, L_r$  - statoriaus induktyvumas ir rotoriaus induktyvumas;

$V_{sdq}, V_{rdq}$  – statoriaus ir rotoriaus įtampos;

$\dot{i}_{sdq}, \dot{i}_{rdq}$  – statoriaus ir rotoriaus srovės;

$\varphi_{sdq}, \varphi_{rdq}$  – statoriaus ir rotoriaus srautas;

$\omega_r$  – rotoriaus sukimosi greitis;

$\omega_{sl}$  – slydimas;

PMSG (nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius) – šio generatoriaus tipo vėjo elektrinė gautą mechaninę energiją perduoda per veleną ir naudojantis magnetinio lauko sukimosi šią energiją paverčia kintamąja elektros energija ir ją tiekia į tinklą. PMSG tipo generatorius turi tiesioginę pavarą, lėtą sukimosi greitį, jam taip pat nereikalinga pavarų dėžė, dėl to padidėja patikimumas. Šio tipo VE taip pat būdingas didelis efektyvumas ir sąlyginai nedidelis priežiūros kiekis, dėl to išlaidos priežiūrai sumažėja, taip pat dažnu atveju jų efektyviam veikimui reikalingas mažesnis sukimosi greitis, nes jos turi daugiau polių porų, tačiau neskaitant šių plusų PMSG taip pat turi ir trūkumų. Šio tipo VE reikalingas brangus keitiklis, kuris visą laiką sektų kintamą sukimosi greitį ir užtikrintų MPPT siekimą. PMSG tipo elektrinės valdymas taip pat nėra tradicinis, kadangi ji veikia be pavarų. Šiuo atveju generatorius kuria elektrinį sukimo momentą, o VE įsibėgėja, stabdo arba dirba pastoviu greičiu priklausomai nuo sukimo momentų skirtumų tarp elektrinio lauko sukimo momento ir VE mechaninio sukimo momento. Apibendrinant, DFIG pritaikytas dirbti prie kintamo vėjo ir naudoja pavaras, kai tuo tarpu PMSG dirba be pavarų. Nuolatinių magnetų sinchroninio generatoriaus įtampų lygtis išreiškiamos taip (5, 6 formulės paimtos iš [4] šaltinio):

$$V_{sd} = -R_s \cdot i_{sd} - L_d \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_e \cdot L_q \cdot i_q \quad (5)$$

$$V_{sq} = -R_s \cdot i_{sq} - L_q \cdot \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_e \cdot L_d \cdot i_d + \omega_e \cdot \Phi_f \quad (6)$$

čia:

$R_s$  - statoriaus varža;

$L_d, L_q$  - statoriaus induktyvumas;

$i_{sd}, i_{sq}$  - atitinkamai d ir q ašies statoriaus srovės;

$v_{sd}, v_{sq}$  - atitinkamai d ir q ašies statoriaus įtamos;

$\Phi_f$  – yra nuolatinis magnetinis srautas;

$\omega_e$  – elektrinio lauko sukimosi greitis;

### 3. Menčių pasukimo kampo įtaka vėjo elektrinių energijos generacijai

Dažnio ir įtamos stabilumas yra pagrindinės vėjo elektrinių, prijungtų prie elektros tinklo, problemos, kurias būtina spręsti siekiant visiškai pereiti prie žaliosios energetikos. Vienas iš šios problemos sprendimo būdų yra menčių pasukimo kampas ( angl. Pitch angle control) – MPK, tai yra svarbi VE darbo sudedamoji dalis, norint pasiekti, kad elektrinės efektyviai dirbtų esant nepastoviam vėjo greičiui. Taip pat šis valdymo metodas yra paprastas ir pigus, jam nereikalingas didelis papildomos ir brangios įrangos kiekis. Vėjo greičiui staiga sumažėjus ar viršijus ribines reikšmes, menčių pasukimo kampas šiek tiek pakeičiamas, kad vėjo elektrinės turbina atitinkamai pradėtų sukintis greičiau arba priešingai, lėčiau, kad būtų išvengta vėjo elektrinės sustabdymo dėl per didelio sukimosi greičio daromos žalos velenui ir turbinai. Paprastai tariant, MPK veikimą galima suskirstyti į tris pagrindines dalis atsižvelgiant į vėjo greitį:

- 1) Menčių pasukimo kampas esant **mažam** vėjo greičiui, kuris yra ne didesnis nei VE įsijungimo greitis (įprastai 4-6 m/s). Esant tokiam greičiui MPK pat gali padėti paleisti įrenginį arba palaikyti jį veikiantį esant nedideliam greičiui, jeigu rinkoje tuo metu vyrauja aukšta elektros energijos kaina. Svarbu paminėti, jog įprastai paleidinėti vėjo elektrinę prie itin mažų vėjo greičių yra nuostolinga atsižvelgiant į detalių nusidėvėjimą ir pagaminamos energijos kiekį.
- 2) Menčių pasukimo kampas esant **nominaliam** VE darbui pritaikytam vėjo greičiui, kuris yra didesnis už VE įsijungimo greitį, bet neviršija ribinio išsijungimo greičio (įprastai toks greitis nusakomas kaip 6-20 m/s). Esant tokiam greičiui MPK gali padėti išlaikyti vėjo elektrinės optimalų galios taško užtikrinimą, kad bet kuriuo laiko momentu kintant vėjo greičiui ši elektrinė vis tiek generuotų didžiausią galimą galią. Ne ką mažiau svarbus aspektas, kuris gali įtakoti galios balansą tinkle yra priverstinis generuojamos galios mažinimas vėjo elektrinėmis. Joms dirbant nominalia galia, galimas priverstinis jų pristabdymas keičiant menčių pasukimo kampą ir taip darant įtaką generuojamai galiai. Esant galios pertekliui tinkle tokiu būdu galima greitai ir efektyviai sumažinti perteklių per itin trumpą laiką, lyginant su kito tipo elektrinių galios mažinimu. Atkūrus balansą menčių pasukimo kampas galėtų leisti elektrinėms vėl generuoti nominalią galią.
- 3) Menčių pasukimo kampas esant **ribiniam** vėjo greičiui (įprastai tai daugiau nei 25 m/s). Šiuo atveju MPK gali būti naudingas tuo, kad nebūtina stabdyti visą vėjo elektrinę, galbūt užtenka tik pasukti mentes, jog turbinos sukimosi greitis sumažėtų, jeigu vėjo greitis yra arti ribinio arba labai nežymiai jį viršija.
- 4) Menčių pasukimo kampo naudojimas **balansavimui žemyn** (sistemos perteklinės galios mažinimui). Įgyvendinant FIT for 55 ir kitus žaliosios energetikos plėtros tikslus, vėjo elektrinių skaičius pasaulyje tik didės, tad natūralu, kad bus perteklinės generacijos dienu, kai energijos bus sugeneruojama daugiau nei jos reikia realiuoju laiku, o kaupikliai jau bus užpildyti, tad reikės kažką daryti su realiuoju laiku generuojama pertekline energija. Šioje situacijoje menčių pasukimo kampas galės stipriai prisidėti prie balansavimo žemyn, kadangi taikant MPK bus galima pristabdyti vėjo elektrinių turbinų sukimosi greitį ir taip mažinti generuojamą galią į tinklą, neatjunginėjant ištisų saulės ar VE parkų. Balansavimo žemyn perspektyva vėjo elektrinėse yra perspektyvi ir reikalinga nebe gamintojams, ji taps reikalinga valstybiniu lygmeniu, siekiant palaikyti galių balansą tarp skirtingų šalių.

Aktyviają galią taip pat galima reguliuoti ir per rotoriaus greičio reguliavimą keičiant rotoriaus srovę. Atsakas į dažnio pokytį tinkle bus itin greitas, tačiau MPK naudojimas galėtų padėti sudėtingose situacijose, kad rotoriaus srovės keitimas nesugebėtų užtikrinti sklandaus veikimo ir reikėtų didesnių galios keitimo galimybių.

#### 4. Menčių pasukimo kampui valdyti naudojamos technologijos

Savaime suprantama, jog vėjo greitis yra realiu laiku kintantis dydis, o nuo jo priklauso vėjo elektrinių generuojama galia. Ne paslaptis, jog būtent nuo vėjo greičio generuojama galia priklauso kubu (iš kur atsiranda ši priklausomybė, bus aptariama toliau darbe, (10) formulė). Žinant tai yra itin svarbu parinkti tinkamą atsaką į kintantį vėjo greitį technologiją, kadangi priklausomai nuo technologijos, skiriasi ir valdymo greitis, ir patikimumas bei kaina. Vėjo greitis gali keistis daugybę kartų per minutę, bene svarbiausias aspektas menčių pasukimo kampo valdymo technologijos pasirinkime yra veikimo greitis. Trumpai pristatysiu pagrindines technologijas.

Elektrinis menčių pasukimo kampo valdymas. „Jis susidaro iš elektromechaninės pavaros, pavarų dėžės, maitinimo bloko ir elektros energijos kaupiklio, kuris skirtas užtikrinti veikimą net ir dingus pagrindiniam maitinimui. Šio tipo technologijos pranašumas yra greitesnis atsakas ir didesnis efektyvumas, tačiau esminis niuansas yra jo kaina, jis yra brangesnis nei, pavyzdžiui, hidraulinis.“ [32].

Hidraulinis menčių pasukimo kampo valdymas. „Esminis privalumas yra tas, jog naudojant šią technologiją galima pašalinti sukimo momentų svyravimus. Veikimas paremtas menčių pasukimu, kai energija tam atlikti gaunama iš hidraulinio siurblio, kuris yra įmontuotas vėjo elektrinėje. Lyginant su elektriniu valdymu šis būdas yra saugesnis ir ilgaamžiškesnis dėl nelinejinių vėjo greičio charakteristikų, kadangi, kaip ir buvo minėta prieš tai, jis sumažina svyravimus. Didžiausias minusas yra didelės priežiūros ir eksploataavimo išlaidos.“ [32].

Menčių pasukimo kampo valdymas naudojant dirbtinį intelektą. Šio tipo valdymas suteikia itin greitą atsaką į vėjo greičių pasikeitimus. Labai stipriai apie tai nesiplėsiu, kadangi apie dirbtinio intelekto panaudojimą (angl. „fuzzy logic“, „artificial neural network“) MPK valdyti toliau darbe bus pateikiamas atskiras skyrius. Esminis niuansas, kurį norėčiau paminėti yra tai, jog šio tipo valdymas šiandien yra labiau naudojamas moksliniais tikslais. Jis nėra itin paplitęs praktikoje.

Konvencinis (PI ir PID valdiklių) menčių pasukimo kampo valdymas. Tai labiausiai paplitęs ir ištobulintas menčių pasukimo kampo valdymas, naudojamas ištisis dešimtmečius. Jis pagrįstas PI ir PID valdiklių taikymu. Esminis šios technologijos privalumas, lyginant su kitomis, yra didelis greitis ir maža kaina, taip pat paprastumas. Detaliai šio tipo valdiklių panaudojimą aptarsiu kitame skyriuje.

Yra ir kitų metodų menčių pasukimo kampui valdyti, tokių kaip pakartotinio pasileidimo valdiklių (angl. „reboost controller“) panaudojimas, tačiau į juos nesiplėsiu.



## 5. PI, PID valdikliai menčių pasukimo kampui reguliuoti

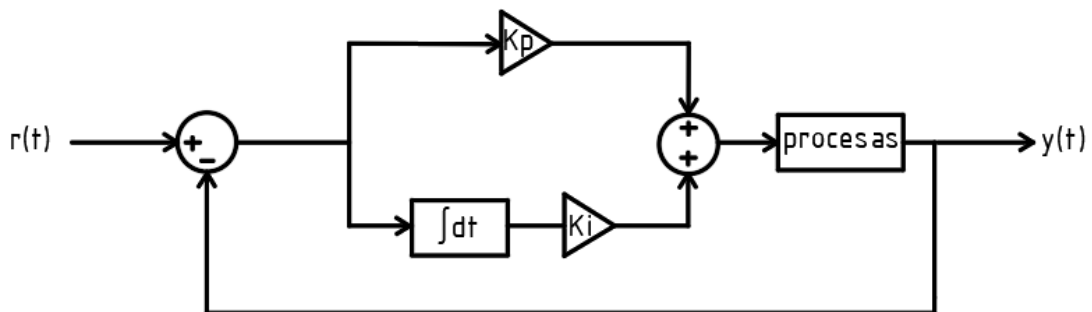
Žinant, kaip veikia MPK, svarbu suvokti, kad jis pats savęs nevaldo, tai daro kiti įrenginiai. Paprastai išėjimo galia, o taip pat ir menčių pasukimo kampas, būna reguliuojama su PI ir PID (PI - Proporcinio integralo valdiklis, PID - proporcinio integralo išvestinis valdiklis) valdikliais.

### 5.1. PI valdiklis

Šiandien labiausiai rinkoje paplitęs valdiklis dėl savo nedidelės kainos, paprasto surinkimo ir lengvo valdymo yra PI valdiklis. Šio tipo valdiklis tinka tuo atveju, kai valdomas objektas yra labiau tiesinis ir pokyčiai yra nuspėjami, apibrėžti, priešingu atveju tokio valdiklio naudojimas nėra tikslingas. Jis negali numatyti, kada įvyks klaida, ir taip sumažinti reakcijos laiką (PID valdiklis tai gali atlikti). Taip pat didelis šio valdiklio privalumas yra tai, jog jis slopina svyravimus ir trikdžius. PI tipo valdiklis gali pašalinti pastovios būsenos paklaidą. Tačiau integruoto režimo taikymas gali neigiamai paveikti sistemos stabilumą ir pačių reakcijų vyksmo greitį įrenginiuose. Paprastai tariant, PI tipo valdiklis plačiai naudojamas tada, kai:

1. nėra reikalavimo, kad procesų greitis būtų itin didelis;
2. kai yra žinoma, jog proceso metu susidaro trikdžiai ir svyravimai, kuriuos reikia slopinti;
3. kai yra žinoma, kad nebus didelių neapibrėžtumų ir procese yra tik talpinis arba indukcinis energijos kaupikliai;

1 pav. pateikiu PI valdiklio blokinę schemą, kurią vėliau bus galima palyginti su PID valdiklio veikimo schema.



1 pav. PI valdiklio veikimo schema

### 5.2. PID valdiklis

Šio tipo valdiklis naudojamas tada, kai reikalingas didelis greitis ir norima optimizuoti tam tikrą valdymo sistemą (PID valdiklis dar žinomas kaip inkrementinis valdiklis). Pagrindiniai šio valdiklio tipai yra lygiagretus, mišrus ir nuoseklusis valdikliai. Analizuojant PID privalumus, jis pasižymi ne tik dideliu greičiu, bet taip pat turi ir PI valdiklio privalumus (svyravimų pašalinimas, valdymo signalo padidinimas). PID valdiklį galima išskaidyti į tris dedamąsias, kur kiekviena raidė žymi atskirą atliekamą veiksmą: P (proporcinis valdiklis) sumažina proceso kilimo laiką  $K_p$ , bet jo nepanaikina. P valdiklis gali būti apibūdinamas kaip išėjimo vertė, kuri yra proporcinga paklaidai  $e(t)$ .

Jis duoda išėjimą, kuris yra proporcingas šiai paklaidai ir palygina norimą reikšmę su faktine gauta proceso reikšme. Tuomet gauta klaida padauginama iš proporcinės konstantos  $K_p$ , kad būtų gauta išvestis. I (integratorius) padaro taip, kad valdymo signalas tampa proporcingu paklaidos integralui ir pastoviosios būsenos paklaidai  $K_i$ . I iš esmės sumažins svyravimus ir trikdžius iki nulio (imtinai, kadangi visuomet pasitaiko išimčių). Paprastai tariant, I dalis reikalinga pašalinant pastoviosios būsenos paklaidą, ją integruojant tam tikrą laiko tarpą, kol šios klaidos reikšmė pasiekia nulį. Tuomet jis išsaugo tą laiko tarpo reikšmę, per kurią paklaida tapo lygi nuliui. D (išvestinė kontrolė) yra esminis PID skirtumas nuo PI valdiklio, D naudojama numatyti būsimą klaidą taikant veiksmus, pagrįstus signalo kitimo greičiu ir taip padidina viso valdiklio veikimo greitį. Išvestinė kontrolė į valdiklį taip pat įterpia ir  $K_d$  (išvestinį stiprinimą), o tai padidina sistemos stabilumą ir trumpalaikį atsaką. Kad ir kaip būtų, tačiau D niekada negali būti taikomas viena (išvestinė kontrolė). Ji taikoma tik kartu su PI valdikliu, kadangi taikant jį vieną jis būtų veiksmingas tik pereinamojo proceso metu, neapimdamas kitų valdiklio laikotarpių, kuomet valdiklis turėtų veikti. D išvestis priklauso nuo paklaidos kitimo greičio atžvilgiu, padauginto iš išvestinės konstantos  $K_d$ . Apibendrinus, PID valdiklis sumažina  $K_p$  (proceso kilimo laiką), padidina sistemos stabilumą ir užtikrina procesų kitimo numatymą  $K_d$  bei eliminuoja pastovios būsenos paklaidą  $K_i$ . Jau minėtasis P valdiklis gali tik stabilizuoti tam tikrus procesus, kai tuo tarpu PI valdikis gali slopinti svyravimus ir trikdžius, o PID valdiklis užtikrins daug didesnę greitį dėl savo gebėjimo numatyti svyravimus ir nepastovumus. Būtent todėl šio tipo valdiklis yra naudojamas vėjo elektrinėse, kadangi vėjo greičio, elektros rinkos paklausos svyravimus tiksliai apibrėžti yra praktiškai neįmanoma.

Bendroju atveju PID valdiklio valdymo signalas atsižvelgiant į laiką yra apskaičiuojamas kaip išvesties suminė vertė tarp  $K_p$ ,  $K_i$  ir  $K_d$  pagal 7 formulę (formulė paimta iš [14]):

1. proporcinio valdiklio dedamoji: paklaida, dauginta iš  $K_p$ ;
2. integralinė valdiklio dedamoji: suminė bendra paklaidą, dauginta iš  $K_i$ ;
3. išvestinė valdiklio dedamoji: paklaidos kitimo greitis, daugintas iš  $K_d$ ;

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (7)$$

čia:

$u(t)$  – valdymo signalas, gaunamas iš valdiklio momentu  $t$ ;

$e(t)$  – skirtumas tarp nustatytos ir išmatuotos verčių laiko momentu  $t$  (dar žinoma kaip valdymo paklaida);

$K_p$  – proporcinė konstanta (stiprinimas);

$K_i$  – integralinė konstanta (stiprinimas);

$K_d$  – išvestinė konstanta (stiprinimas).

Jeigu į PID valdiklį žiūrėti tik kaip į perdavimo funkciją, kurią jis atlieka, tuomet jo atliekamą darbą galime išreikšti pagal (8) formulę (formulė paimta iš [15]):

$$K(s) = K_p + K_d \cdot s + \frac{K_i}{s} \quad (8)$$

Čia:

$s$  – laiko tarpas tarp nustatytosios vertės ir išmatuoto proceso kintamojo momentu  $t$ ;

$K(s)$  – PID valdiklio perdavimo funkcija;

$K_p$  – P proporcinė perdavimo funkcija;

$\frac{K_i}{s}$  – I integralinė perdavimo funkcija;

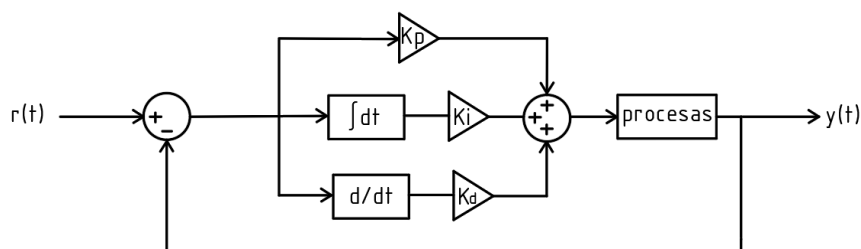
$K_d \cdot s$  – D išvestinė perdavimo funkcija.

Panašiu principu galima išsireikšti ir kitų valdiklių perdavimo funkcijas. Dabar, kai detaliai išnagrinėjau visus esminius PI ir PID valdiklių skirtumus ir privalumus, galiu pateikti jų apibendrinimą lentelės pavidalu.

**1 lentelė.** PI ir PID valdiklių parametrų palyginimas

	Pastoviosios būsenos paklaida	Greitis	Trikdžių sumažinimas	Talpinių procesų apdorojimas	Būsimos klaidos numatymas
PI valdiklis	Eliminuoja	Vidutinis	Ženklus	Gali apdoroti tik paprastus talpinius procesus	Ne
PID valdiklis	Eliminuota PI	Didelis	Sumažinta PI	Gali apdoroti aukštesnės eilės talpinius procesus	Taip

Taip pat, kaip ir minėjau prieš tai, pateikiu PID valdiklio veikimo schemą 2 pav. Kaip galime matyti, nuo PI valdiklio ji skiriasi papildoma atšaka su  $d/dt$  ir  $K_d$  koeficientu.



**2 pav.** PID valdiklio veikimo schema

Pirminiuose žingsniuose valdiklio  $y(t)$  išvestis grąžinama atgal ir lyginama su nustatyta verte  $r(t)$ , šiuo būdu gaunant klaidos signalą, kuris yra priklausomas nuo laiko:  $x(t) = r(t) - y(t)$ . Po to šis klaidos signalas sumažinamas ir paverčiamas valdymo signalu, kuris valdo sistemą. P valdiklis duoda išėjimą, kuris yra proporcingas paklaidai  $e(t)$  ir palygina norimą reikšmę su faktine gauta proceso reikšme. Tuomet gauta klaida padauginama iš proporcinės konstantos  $K_p$ , kad būtų gauta išvestis. I iš esmės sumažins svyravimus ir trikdžius iki nulio (imtinai, kadangi visuomet pasitaiko išimčių). Paprastai tariant, I dalis reikalinga pašalinant pastoviosios būsenos paklaidą, ją integruojant tam tikrą laiko tarpą, kol šios klaidos reikšmė pasiekia nulį. Tuomet jis išsaugo tą laiko tarpo reikšmę, per kurią

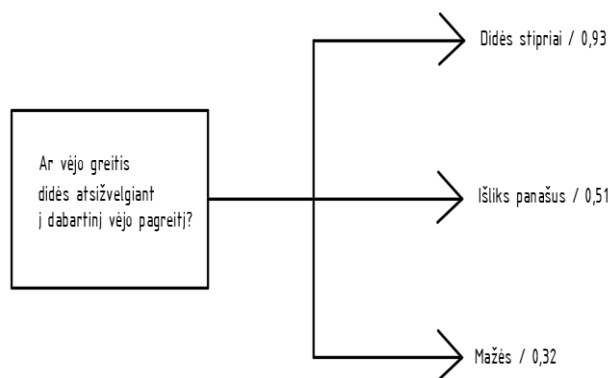
paklaida tapo lygi nuliui. D išvestis priklauso nuo paklaidos kitimo greičio atžvilgiu, padauginto iš išvestinės konstantos  $K_d$ .

## 6. Dirbtinis intelektas VE menčių pasukimo kampui valdyti

Be PI ir PID valdiklių taip pat yra ir kitų būdų valdyti menčių pasukimo kampą. Šiandien, kai dirbtinis intelektas yra taip stipriai pažengęs, būtent jis yra didžiausias konkurentas valdikliams, kadangi jo tikslumas gali būti itin didelis. Dirbtinis intelektas taip pat gali būti ir kombinuojamas su PI ir PID valdikliais, o ne tik naudojamas atskirai. Bendruoju atveju tikėtina, kad netolimoje ateityje jis gali išstumti valdiklius iš rinkos, kadangi šiuo metu atliekama daugybė tyrimų šioje srityje. Šie tyrimai apima tokius dirbtinio intelekto taikymo metodus kaip apytikslė logika (angl. „Fuzzy logic”, toliau FL), dirbtinis neuroninis tinklas (angl. „Artificial neural network”), sustiprintas mokymasis (angl. „Reinforcement learning”) ir kiti. Didžiausias šių metodų taikymo trūkumas yra tai, jog dirbtiniam intelektui apsimokyti yra reikalingi itin dideli kiekiai duomenų, tad, kaip ir minėjau prieš tai, iš pradžių aktualu taikyti dirbtinį intelektą su PI ir PID valdikliais kartu, kad jis turėtų duomenų, iš kurių galėtų apsimokyti. Toliau trumpai aprašysiu, kuo skiriasi kiekvienas iš prieš tai mano minėtų dirbtinio intelekto taikymo metodų.

### 6.1. Apytikslės logikos metodas (FL)

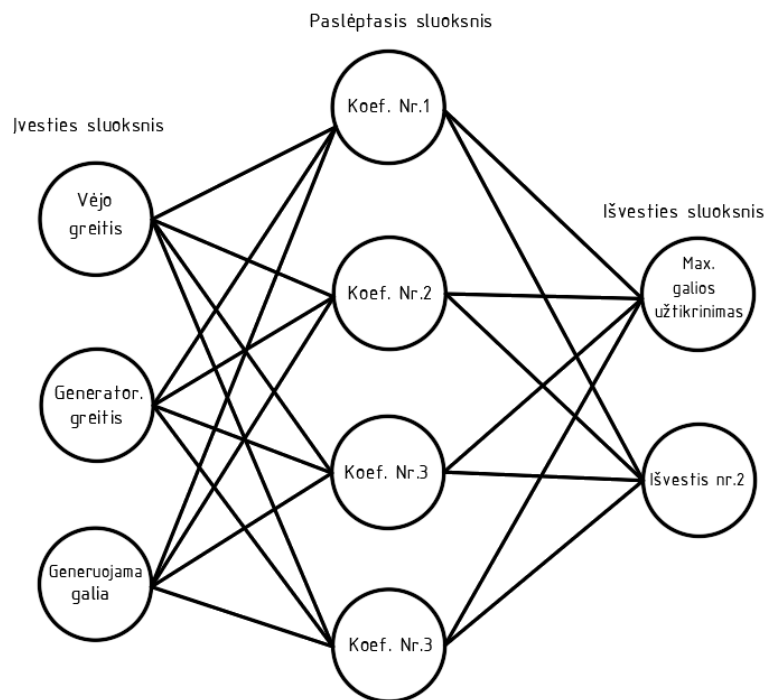
Tai yra samprotavimu pagrįstas metodas, kuris iš dalies atspindi žmogaus samprotavimą ir imituoja sprendimų priėmimą. Dirbtinis intelektas šiuo atveju turi galimybę įvertinti sprendimą ribose nuo 0 iki 1, kur 1 reiškia absoliučią tiesos reikšmę, o 0 reiškia absoliučiai klaidingą reikšmę. Svarbu paminėti, kad dirbtinis intelektas nepriskiria visų sprendimų 0 arba 1, yra ir tarpinės reikšmės, kurios rodo, kad tai yra iš dalies klaidinga arba dalinai teisinga. Iš dalies galima sakyti, kad FL metodas naudoja sprendimų medžio principą, tačiau FL tuo pačiu yra apribotas taisyklėmis, kurios parenkamos žmogaus. Apibendrinant, FL metodas gali būti plačiai naudojamas daugelyje sričių, o taip pat ir MPK valdyme, kadangi ji imituoja žmogaus mąstymą ir puikiai tinka dirbti su netiesinėmis problemomis. FL veikimo principas pateikiamas 3 pav., kaip galima matyti taikymo pavyzdyje, samprotavimas pagrįstas klausimu, ar vėjo greitis didės atsižvelgiant į dabartinį vėjo pagreitį, ir pateikiami trys sprendimo variantai.



3 pav. FL veikimo principas

## 6.2. Dirbtinis neuroninis tinklas (ANN)

Tai skaičiavimui ir prognozavimui skirtas modelis, kuris imituoja nervų ląstelių darbą žmogaus smegenyse. Kadangi šis metodas sugeba savarankiškai koreguotis, kai gauna naują įvestį, jis puikiai tinka nelineiniam modeliavimui ir prognozavimui, tad jis puikiai tinka menčių pasukimo kampui valdyti. Paprastai dirbtinį neuroninį tinklą sudaro trys sluoksniai. Pirmasis yra įvesties, kitas – paslėptasis sluoksnis, kuris imituoja neuronus. Paskutinis sluoksnis yra išvesties sluoksnis. ANN gali būti suvokiamas kaip svertinių koeficientų priklausomybė tarp skirtingų mazgų (šiuo atveju neuronų). ANN taikymą menčių pasukimo kampui valdyti galima apibūdinti gana nesudėtingai: įvesties kintamieji gali būti vėjo greitis, generatoriaus greitis ir generuojama galia. Tuomet išvestis gali būti maksimalaus galios taško užtikrinimas. ANN taikymas pateikiamas 4 pav., kaip galima matyti įvesties sluoksnyje, yra trys dydžiai: vėjo greitis, vėjo elektrinės generatoriaus sukimosi greitis ir jo generuojamos galios dydis. Paslėptajame sluoksnyje yra aprašomi pasirinkti ir įvertinti svertiniai koeficientai su skirtingomis reikšmėmis. Jas parenka pats žmogus, atsižvelgdamas į tai kiek kiekvienas iš koeficientų yra svarbus. Įvedamos reikšmės yra skaičiai nuo 0 iki 1. Išvesties sluoksnyje gaunamas didžiausios galimos generuoti galios užtikrinimas pasinaudojant dirbtinio intelekto vertinimu ir pasirinktai dar viena išvestis. Dažnu atveju realiame taikyme paslėptojo sluoksnio neuronų koeficientų būna ženkliai daugiau nei 4.



4 pav. ANN taikymas

Kaip jau minėta, yra ir kitų dirbtinio intelekto metodų, kurie gali būti taikomi menčių pasukimo kampui valdyti, tačiau kol kas jie yra labiau teoriniai nei praktiniai. Šiuo metu jie nėra naudojami masiškai ir labiau analizuojami moksliniais tikslais.

## 7. Vėjo elektrinių kuriamos problemos tinklui bei vartotojams

Kaip ir kiekvienas tipas elektrinių, taip ir vėjo elektrinės turi minusų, ne tik plusų. Kalbant apie vėjo elektrinių plėtros sukeltas problemas, mano nuomone esminės problemos yra šios:

1. Generacijos priklausomybė nuo meteorologinių sąlygų. Ta pati problema kaip ir su saulės elektrinėmis. Esminis niuansas – generacija priklausys nuo vėjo srautų pasiskirstymo toje vietovėje, ir nors išsivesti metinį ar mėnesinį vėjo greičio vidurkį tam tikroje vietoje yra įmanoma, tačiau jis niekad nebūna itin tikslus, kadangi vėjo greitis nėra pastovus ir pasikartojantis dydis, jis kinta laike ir nėra konstanta. Savaiame suprantama, kad jūroje vėjo greitis yra ženkliai didesnis nei sausumoje, todėl generacija ten yra kur kas didesnė ir stabilesnė nei žemyninėje dalyje. Tačiau susiduriama su kitomis problemomis, tokiomis kaip remonto, statybos problemos, nes įrangą reikia plukdyti laivais, o taip pat derintis ir prie jūros ar vandenyno sąlygų. Be to, jūrinės vėjo elektrinės pasižymi greitesniu nusidėvėjimu, korozija dėl druskos, esančios vandenyje. Lyginant su saulės elektrinėmis, vėjo elektrinės yra pranašesnės tuo, kad gali generuoti ir naktimis, nepriklausomai nuo to, ar šviečia saulė, tad siekiant išsikelti „FIT for 55“ ir Europos žaliojo kurso tikslų vėjo elektrinių plėtra tiek žemyninėje, tiek jūrinėje dalyse yra neišvengiamas procesas, norint vartotojus aprūpinti elektros energija ir naktį.
2. Perteklinė generuojama energija, kai jos nereikia. Savaiame suprantama, kad stipriai išplėtojus vėjo elektrinių skaičių bus dienų, kai jos generuos daug daugiau elektros energijos, nei yra poreikis. Tokiai problemai spręsti gali būti panaudojami kaupikliai, tačiau, kaip žinoma, ši technologija šiandien yra itin brangi ir labiau naudojama tiriamaisiais tikslais. Ir nors ateityje kaupiklių vis daugės ir technologija pils, kaupiklių talpa nėra beribė ir jie taip pat gali būti pilnai užpildyti esant perteklinei generacijai. Lietuvoje perteklinę energiją taip pat galima panaudoti Kauno hidroakumuliacinės elektrinės viršutinio rezervuaro užpildymui vandeniu. Tai irgi atliktą „kaupiklio“ vaidmenį. Tačiau svarbu suvokti, kad viršutinio baseino dydis nėra begalinis ir jį pumpuoti vandenį taip pat galima ne visados, yra ir gamtosauginiai ribojimai. Daugėjant atsinaujinančios energijos elektrinių pasaulyje, ši problema taps itin aktuali, kadangi kurs tinklo nebalansą, kurio su neatsinaujinančio kuro elektrinėmis buvo išvengiama gaminant tik tokį kiekį elektros energijos, kokio reikia. Šią problemą galima spręsti pasinaudojant menčių pasukimo kampo balansavimo žemyn galimybe, kurią nagrinėsiu savo darbe kituose skyriuose.
3. Pavojus gyvūnams. Nors ir stengiamasi ištirti vietas, kuriose bus statomos vėjo elektrinės, ir poveikį aplinkai minimalizuoti, tačiau jos vis tiek kenkia gamtai. Viena vertus, yra paukščiai, kurie žūsta atsitrenkę į vėjo elektrinės mentes, o, kita vertus, yra gyvūnai, kurie palieka savo gyvenamąsias vietas dėl keliamo triukšmo. Ši problema aktuali ir žmonėms, kadangi gyventojai skundžiasi VE keliamu triukšmu, kai jos statomos netoli gyvenviečių.

## 8. Vėjo elektrinių generuojamos galios priklausomybė nuo kitų dydžių

Paprastai tariant, vėjo elektrinių veikimas paremtas tuo, kad per vėjo elektrinės mentes tekanti oro masė lėtėja (oro masės greitis prieš mentes  $v_1$  yra didesnis nei greitis už menčių  $v_2$ ,  $v_1 > v_2$ , kuo šis skirtumas yra didesnis tuo generuojama energija yra didesnė), taip perduodant savo kinetinę energiją į turbiną ir ją paverčiant mechanine sukimosi energija, kurią generatorius paverčia į elektros energiją. Šią oro masę galima apibrėžti kaip oro tankį, kurio tam tikras tūris prateka pro vėjo turbiną per sekundę. Kinetinė energija, gaunama iš vėjo ir vėliau naudojama mechaninei energijai gali būti apibrėžiama (9) formule:

$$E = \frac{m}{2} (v_1^2 - v_2^2) \quad (9)$$

Čia:

$m$  – praeinančio vėjo srauto masė;

$v_1^2$  – vėjo greitis prieš mentes;

$v_2^2$  – vėjo greitis už menčių.

Visi žino, kad vėjo elektrinių generuojama galia yra tuo didesnė, kuo didesnis yra vėjo greitis. Savaiame suprantama, kad iki tam tikros ribos, kai pasiekiamas didžiausias įmanomas generuoti vėjo elektrinės galia, dar žinoma kaip nominali vėjo elektrinės galia. Energetikams tai yra savaiame suvokiamas dalykas, tačiau dauguma žmonių nesupranta, kad vėjo elektrinių generuojama galia yra proporcinga vėjo greičiui kubu. Tai reiškia, kad vėjo greičiui padidėjus du kartus, generuojama aktyvioji galia padidės net 8 kartus. Bendruoju atveju vėjo elektrinės galia apskaičiuojama pagal (10) formulę:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_p (\lambda, \beta) \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (10)$$

Čia:

$P$  – vėjo elektrinės generuojama galia;

$C_p$  – vėjo elektrinės našumo koeficientas;

$\beta$  – menčių pasukimo kampas;

$\lambda$  - antgalio greičio santykis;

$\rho$  – oro tankis;

$A$  – menčių plotas,  $m^2$ ;

$v$  – vėjo greitis.

$\lambda$  gali būti išskaičiuojama kaip santykis tarp vėjo turbinos sukimosi greičio  $\omega_t$ , padauginto iš turbinos mentės spindulio  $R$  ir padalinto iš vėjo greičio  $v$ ,  $\frac{R \cdot \omega_t}{v}$ . Svarbu paminėti, kad egzistuoja vėjo elektrinės efektyvumo riba, dar vadinama Betz'o efektyvumo riba, kuri apibrėžia, jog našumo koeficientas  $C_p$  negali būti didesnis nei 59,3% (šaltinis [23]). Šios teorinės ribos viršyti neįmanoma, ji pasiekama tuo atveju, kai pro vėjo elektrinių mentes praeinančio vėjo greitis sumažėja 2/3. Šiandien  $C_p$  dažniausiai būna 35 – 48 %. Norint pasiekti 100 % naudingumo koeficientą, būtų reikalinga, kad būtų panaudojama visa gaunama energija iš oro srauto, kas nėra įmanoma, kadangi turėtų būti uždengiamas visas sukimosi plotas. Tuomet nesusidarytų greičių skirtumas prieš mentes ir už menčių ir turbina nesisuktų pakankamu greičiu galiai generuoti.

Formulėje taip pat matoma ir menčių pasukimo kampo daroma įtaka. Įprastiniais atvejais menčių pasukimo kampo diapazonas yra  $0^\circ - 45^\circ$ , todėl (10) formulė gali būti apribojama viršutine energijos išėjimo riba ir apatine energijos išėjimo riba. Kai kalbame apie viršutinę energijos išėjimo ribą taikant MPK, tuomet formulę galime pavaizduoti taip:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p (\vartheta = 0) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (11)$$

Kuomet kalbama apie apatinę energijos išėjimo ribą su MPK, tuomet šią formulę galime užrašyti taip:

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot C_p (\vartheta = 45) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (12)$$

Atsižvelgus į 10, 11 ir 12 formules galima matyti, kad vėjo greičiui padidėjus du kartus, vėjo elektrinės generuojama galia padidės 8 kartus, o vėjo greičiui padidėjus tris kartus, generuojama galia išauga net 27 kartus. Ši formulė rodo, kad didžiausią įtaką generacijai daro būtent vėjo greitis, tačiau yra ir kitų svarbių aspektų, kuriuos žmogus gali kontroliuoti ir numatyti, priešingai nei vėjo greitį. Vienas iš jų yra menčių aprėpiamas plotas, formulėje pažymėtas  $A$  raide. Galima matyti, kad generuojama galia yra tiesiogiai proporcinga jam. Be kita ko, generuojama galia taip pat bus proporcinga ir  $C_p$  naudingumo koeficientui bei vėjo elektrinių aukščiui, kurio pagrindinėje formulėje nesimato, tačiau jis taip pat daro labai didelę įtaką projektuojant vėjo elektrines. Kadangi dideliame aukštyje tiek vėjo greičiai, tiek pats vėjo pastovumas yra didesni, būtent todėl stengiamasi statyti kuo aukštesnes vėjo elektrines, jeigu tai yra įmanoma. Be to, didelę įtaką daro ir mano baigiamajame darbe analizuojamas menčių pasukimo kampas, kurio pasukimo ribos yra nuo 0 iki 45 laipsnių ir tai sudaro viršutinę ir apatinę energijos išėjimo ribas (11 ir 12 formulės). Įtaką daro ir kiti dalykai, kuriuos žmogus gali parinkti ar valdyti (vietovės šiurkštumo koeficientai ir t. t.). Prieš tai minėtas paviršiaus šiurkštumo koeficientas, paprastai tariant, yra įvairūs objektai, kurie trukdo vėjui palaikyti trajektoriją. Tai gali būti medžiai, kalnai, gyvenamieji ir negyvenamieji objektai, netgi aukšta žolė ar kiti augalai. Dėl šių objektų gali sumažėti vėjo greitis. Bendrai tariant, prie didesnio paviršiaus šiurkštumo (nelygumo) vėjo greitis bus mažesnis. Žinant tai, jog vietovės šiurkštumo koeficientas ir VE stiebo aukštis taip pat daro didelę įtaką vėjo elektrinės generuojamai galiai, kadangi nuo šių dviejų dydžių tiesiogiai priklauso pats svarbiausias kintamasis (vėjo greitis), tai šių dviejų dydžių daroma įtaka vėjo greičiui yra išreiškiamą taip:



$$v_p = v_z \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^n \quad (13)$$

Čia:

$v_p$  – perskaičiuotas vėjo greitis tam tikrame aukštyje pritaikius paviršiaus šiurkštumo koeficientą;

$v_z$  – žinomas vėjo greitis tam tikrame aukštyje tam tikroje vietovėje;

$h_1$  – aukštis, kuriame žinomas vėjo greitis;

$h_2$  – skaičiuojamos vėjo elektrinės stiebo aukštis;

$n$  – šiurkštumo laipsnio rodiklis (paviršiaus šiurkštumo ilgis).

Šiurkštumo klasę (paviršiaus šiurkštumo ilgį) galima apibrėžti atsižvelgiant į vietovę, priklausomai nuo to, ar ji yra žemyninėje dalyje, ar vandenyje, taip pat atsižvelgiant į toje vietovėje esančius objektus. Šiurkštumo klasių klasifikaciją pateikiu 2 lentelėje, ji paimta iš Romučio Juodsnučio baigiamojo darbo [25] (MAŽOSIOS VĖJO ELEKTRINĖS GALIOS KREIVĖS IR EFEKTYVUMO TYRIMAS).

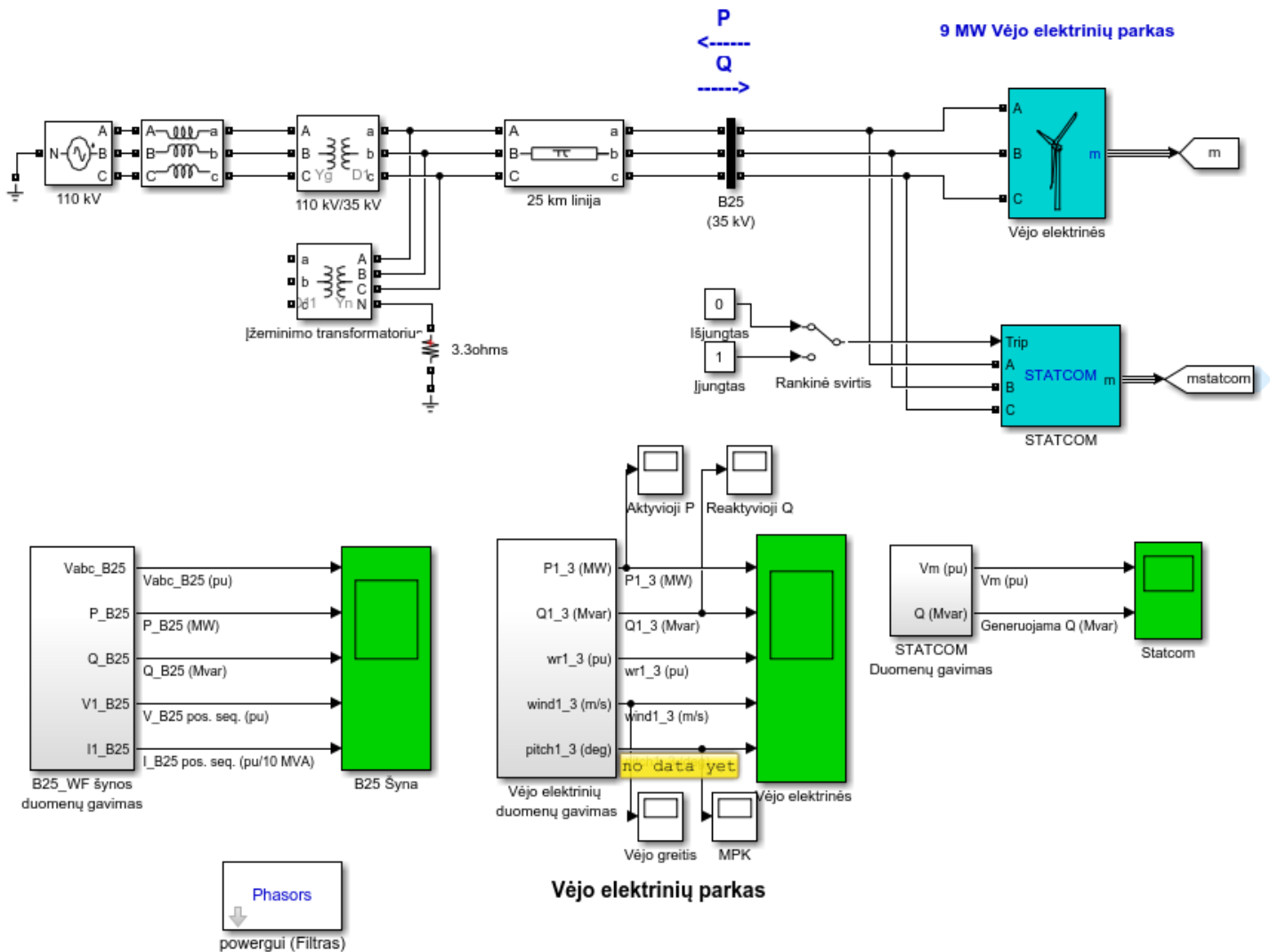
**2 lentelė.** Paviršiaus šiurkštumo ilgio priklausomybė nuo vietovės

<b>Paviršiaus šiurkštumo ilgis m</b>	<b>Paviršiaus aprašymas</b>	<b>Šiurkštumo klasė (vidutinis šiurkštumo ilgis)</b>
1,00	Miestas	3 (0,40 m)
0,80	Miškas	
0,50	Priemiesčiai	
0,30	Daug medžių	
0,20	Krūmai	
0,10	Laukai su pastatais, medžiais, žemės ūkio augalais	2 (0,10 m)
0,05–0,03	Atviri laukai (pavieniai pastatai, medžiai)	1 (0,03 m)
0,02	Oro uostų teritorijos su pastatais	
0,01–0,008	Atviros pievos	0 (0,0002 m)
0,005	Dirva (lygi)	
0,001	Sniegas (lygus)	
0,0003–0,0002	Smėlynai (lygūs)	
0,0001	Vandens telkiniai (ežerai, tvenkiniai, jūra)	

## 9. MATLAB Simulink modelis

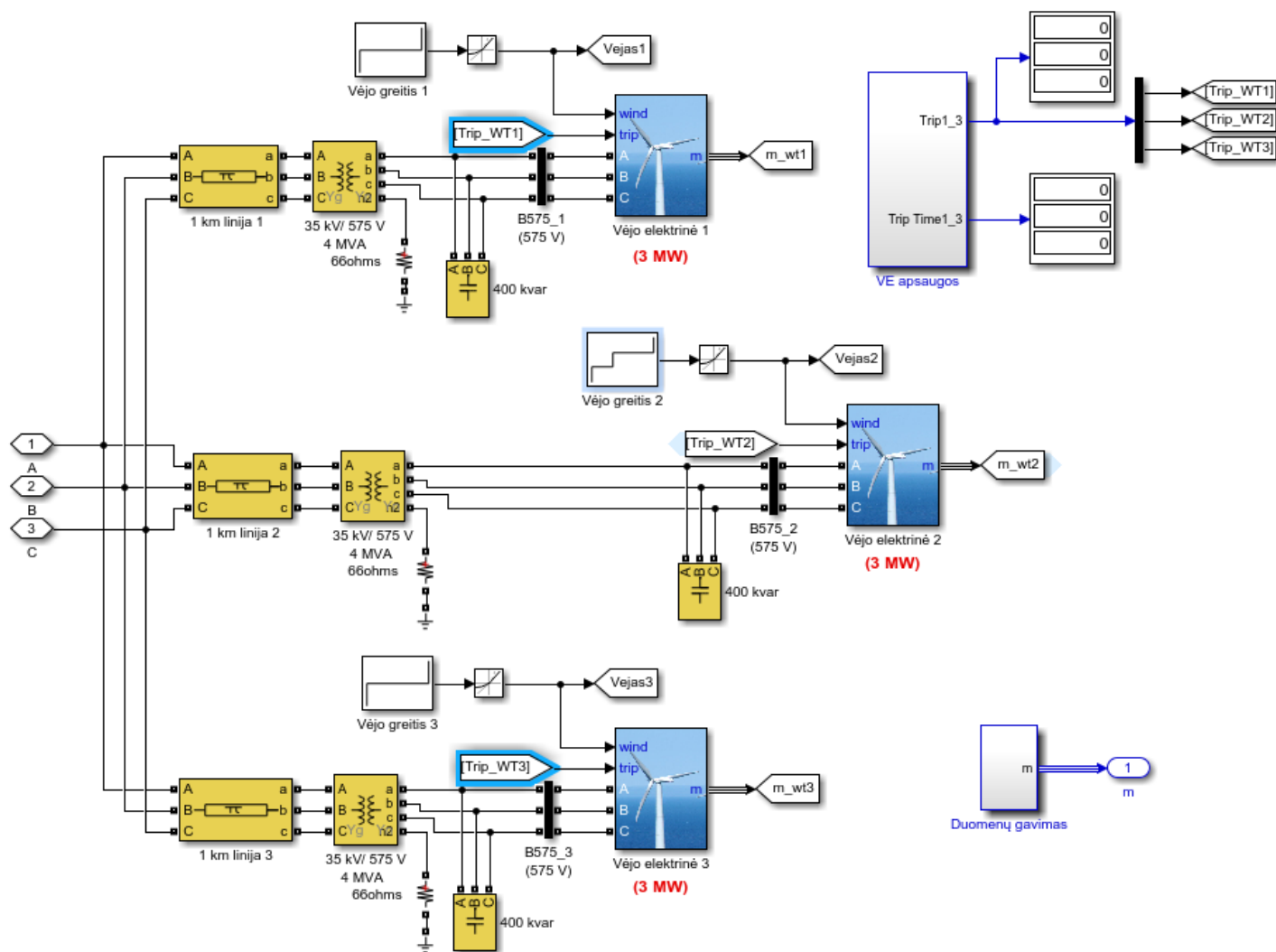
Kadangi šis darbas yra tiriamasis, tam reikalinga tam tikra modeliavimo aplinka, kad būtų galima atlikti išsikelto 3 uždavinio analizę („sumodeliuoti vėjo elektrinių parką su menčių pasukimo galimybe MATLAB „Simulink“ programiniame pakete bei ištirti, kiek sumodeliuotame vėjo elektrinių parke galima keisti menčių pasukimo kampą prie skirtingų vėjo greičių, siekiant atlikti sistemos balansavimą.“). Modeliavimui pasirinktas būtent „MATLAB Simulink“ programinis paketas dėl savo paprastumo, tikslumo ir prieinamumo energetikos sistemų tyrimui. Moksliniais tikslais naudoti tai yra itin puikus įrankis, kadangi jis nemokamas ir gali atlikti daugumą reikalingų modeliavimų, turi dideles bibliotekas. Ši modeliavimo aplinka paranki tuo, kad galimas didelis komponentų skaičius vienoje blokinėje schemoje, o patys elementai jau būna sukurti ir įdėti į bibliotekas. Jų kurti naujai nereikia, užtenka tik užsiduoti norimus parametrus ir tinkamai viską sujungti. Baigiamajame darbe atliksiu jau sukurtą vėjo elektrinių parko su menčių pasukimo kampo keitimo galimybėmis analizę, pritaikydamas modelį pagal savo reikmes, bus atliekamas tyrimas kaip ženkliai gali prisidėti MPK kai vėjo greitis yra nepakankamas vėjo elektrinėms dirbti, taip pat kokią įtaką jis darys išlaikant elektrinių darbą esant avariniam vėjo greičiui, siekiant ne visiškai išjungti vėjo elektrines, o pristabdyti jų sukimąsi. Dar vienas scenarijus, kurį nagrinėsiu yra galios perviršis, kuomet vėjo elektrinės turės prisidėti prie tinklo balanso užtikrinimo mažinant savo generuojamą galią, taip siekiant išvengti visiško tam tikrų elektrinių stabdymo, savo darbe šį procesą įvardinu kaip balansavimą žemyn. Atkreipsiu dėmesį, kad pats modelis buvo pakeistas nuo pradinio, šabloninio modelio, kuris yra viešai prieinamas SIMULINK aplinkoje, nes pradinis modelis buvo skirtas tirti trumpųjų jungimų įtaką elektros sistemai priklausomai nuo vietos, kurioje įvyksta avarija, pradinis modelis nenagrinėjo menčių pasukimo kampo įtakos elektros sistemai.

Šią blokinę schemą sudarys trys vėjo elektrinių parkus imituojantys blokai, kur kiekviename iš jų galima keisti galią ir MPK parametrus. Schemą taip pat sudaro STATCOM įrenginys (statinis sinchroninis kompensatorius, skirtas reaktyviajai galiai kompensuoti arba jai generuoti pasinaudojant galios elektronika, šiame modelyje jo galia yra 3 MW). STATCOM įrenginys taip pat gali būti valdomas rankine svirtimi ir laikomas arba įjungtas, arba išjungtas. Schemą taip pat sudaro daugybė transformatorių, skirtų paaukštinti įtampą, taip pat kabelinių bei ryšio linijų. Vienas pagrindinių transformatorių yra aukštinantys galios transformatorius sujungtas trikampis – žvaigždė principu ir esantis prieš apkrovą (paaukština įtampą iki 110 kV). Modelyje taip pat yra „Powergui“ blokas, kuris naudojamas įtampos, srovės, aktyvios ir reaktyviosios galių analizei ir stebėjimui, nurodo pastoviosios būsenos reikšmes. Naudojami „scope“ blokai (žaliai pažymėti blokai bei aktyvioji P, reaktyvioji Q, MPK ir vėjo greičio blokai, kurie leidžia nagrinėti pasirinktus parametrus. Schemoje taip pat yra ir trifazis abipusis induktyvumas, kuris skirtas subalansuoti tiekiamą galią bei indukuoti įtampą ir kitose fazėse, jeigu vienoje iš jų atsiranda įtampa. Taip pat yra ir įžeminimo transformatorius, sujungtas trikampis – žvaigždė principu, jame atsiranda neutralė, kurią galima įžeminti. Pagrindinė blokinė schema pateikiama 5 pav., o vėjo elektrinių parko schema – 6 pav.



5 pav. Pagrindinė blokinė modelio schema

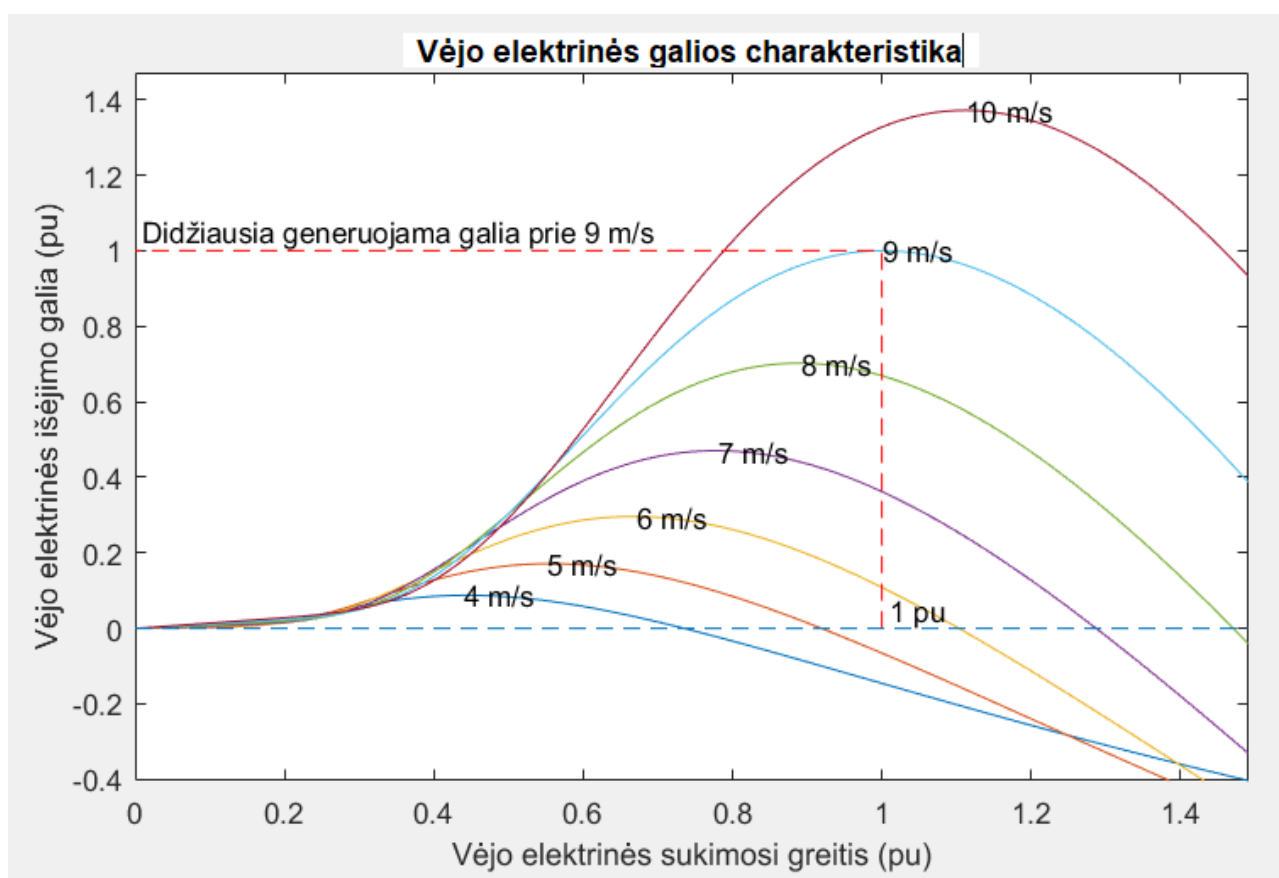
Iš 6 pav. taip pat galima matyti, kad schemoje yra vėjo greitį imituojantys blokai, jį reguliuojantys blokai, RLC filtrai (R (varžą), L (induktorius) ir C (kondensatorius), sujungti nuosekliai arba lygiagrečiai. Jie filtruoja aukšto ir žemo lygio dažnius, praleiddami pasirinktą dažnį). Taip pat blokinėje schemoje matomas ir „VE apsaugos“ blokas, kuriame sudėtos apsaugos, tokios kaip per didelė srovė, srovių nebalansas, per didelis ar per mažas vėjo elektrinių greitis ir t.t. “Trip time” ir “Trip” atitinkamai žymi, per kiek laiko buvo perduoti duomenys ir kokie duomenys tai buvo, kadangi modelis valdomas signalais. Kaip ir prieš tai buvusioje schemoje, taip ir šioje yra trifazės linijos, skirtos perduoti VE generuojamą elektros energiją. Taip pat yra ir aukštinantieji galios transformatoriai, kurie pakelia įtampą nuo 575V iki 35 kV (aukščiausia skirstomoji įtampa Lietuvoje). Visi šie komponentai sudaro veikiančią vėjo elektrinių parką (6 pav.), kuris vėliau jungiasi prie STATCOM įrenginio ir prie tinklo (5 pav.).



6 pav. Vėjo elektrinių parko modelio blokinė schema

Visas šis modelis, kaip ir minėjau prieš tai, yra perdarytas nuo pradinio, kadangi pradinis modelis buvo naudojamas sukurti trumpuosius jungimus įvairiose vietose ir tirti, kokią tai įtaką turės elektros sistemai. Mano atveju šis modelis buvo perdarytas taip, jog sukurtų pasirinktą vėjo greitį (kiekvienai iš turbinų, kiekvienoje modeliavimo dalyje, jis bus skirtingas tam, kad būtų galima matyti MPK ir generuojamos galios skirtumus prie skirtingo vėjo greičių, visų trijų vėjo elektrinių rezultatai bus pateikiami ant vieno grafiko, jog būtų galima palyginti). Sumodeliavus vėjo greitį toliau bus modeliuojami trys scenarijai: pirmasis, kai vėjo greitis bus arti nominalaus vėjo elektrinės, antrasis, kai vėjo greitis bus arti avarinio ir vėjo elektrinės vietoje visiško sustabdymo turėtų pristabdyti sukimąsi. Trečiasis scenarijus, kai VE bus naudojamos jau prieš tai minėtajam balansavimui žemyn. Visuose šiuose modeliavimuose bus stebimi keli parametrai: menčių pasukimo kampas, reaktyvioji ir aktyvioji galios. Pirmu ir antru scenarijumi tiriamasis modelis, pasinaudojant MPK, turėtų išlaikyti generuojamą aktyviają galią didžiausią (3 MW), o trečiu scenarijumi turėti sumažinti generuojamą galią iki užsibrėžtos ribos.

Prieš pradėdant modeliavimą pasirinkau, kad vėjo elektrinės didžiausią galią generuos prie 9 m/s vėjo greičio. Dažniausiai didelių vėjo elektrinių nominalus vėjo greitis būna 10-12 m/s, tačiau pagal tiriamąjį modelį jau buvo parinktas nominalus vėjo greitis 9 m/s (visoms trimis vėjo elektrinėms). Tad keliuose modeliavimuose (pirmasis ir antrasis scenarijai) nusprendžiau jį toki ir palikti, o modeliavime, kur tiriu menčių pasukimo kampo galimybes esant ženkliai didesniai vėjo greičiui nei nominalus VE, pasirinkau naudoti 15 m/s nominalų greitį, kadangi bus ženkliai didesni modeliuojami vėjo greičiai. Pateikiu pasirinktą vėjo elektrinės galios kreivę prie 9 m/s vėjo greičio (menčių pasukimo kampas tuo metu  $0^\circ$ ) :



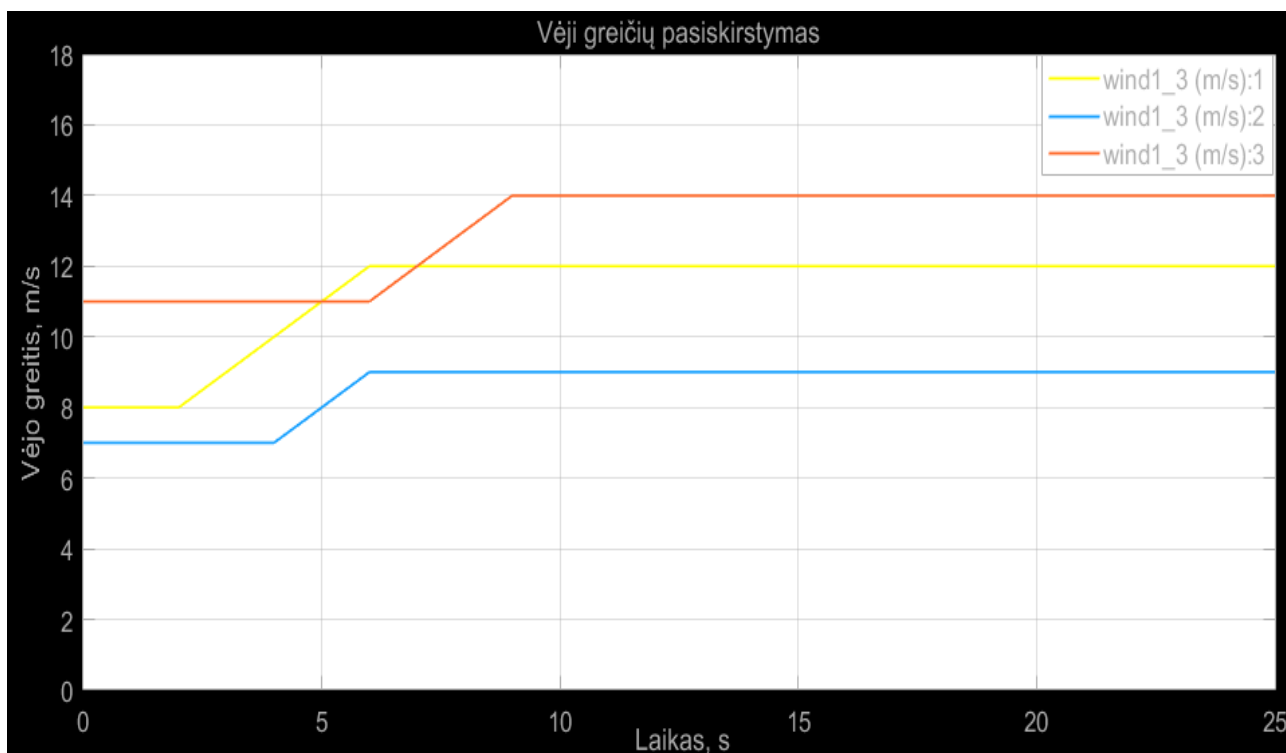
7 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė prie 9 m/s

Y ašyje galime matyti turbinos išėjimo galią santykiniais vienetais, o X ašyje – turbinos sukimosi greitį santykiniais vienetais. Galios charakteristika pateikiama prie  $0^\circ$  menčių pasukimo kampo. Pasirinkus VE nominalų vėjo greitį, toliau bus atliekamas pirmojo scenarijaus modeliavimas.

## 10. Modeliavimas esant nominaliam arba arti nominalaus vėjo greičiui

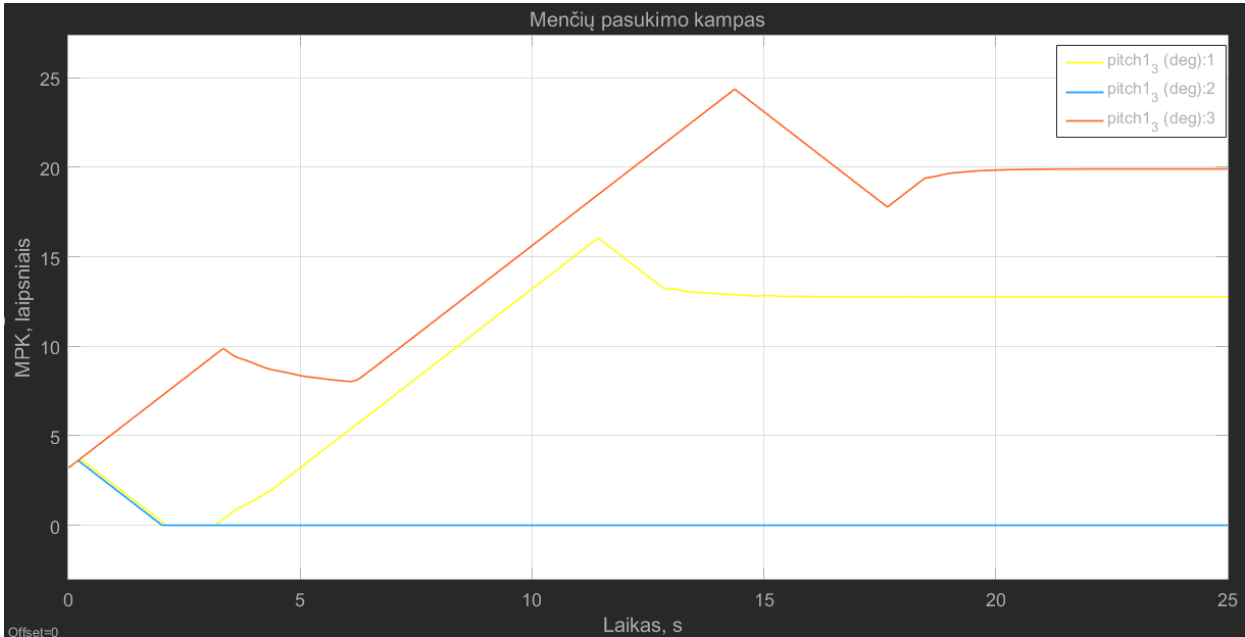
Atlikti modeliavimą su šiuo vėjo greičiu pasirinkau todėl, kad kiekviena vėjo elektrinė turi nustatytą / išmatuotą vėjo greitį, prie kurio ji dirba nominaliu režimu, t. y. generuoja nominalią galią prie to vėjo greičio (įprastai tai 10-15 m/s priklausomai nuo vėjo elektrinės galios ir jos aukščio, menčių ilgio). Nominalus vėjo greitis vėjo elektrinėms yra itin svarbus rodiklis, kadangi pagal šį vėjo greitį galima rinktis planuojamą statyti vėjo elektrinę, jos aukštį. Kaip žinoma, vėjo greitis nėra vienodas skirtingose vietovėse, taip pat skirtinguose aukščiuose (įprastai didesniame aukštyje ir vietovėse, esančiose prie jūrų ar vandenynų, jis yra didesnis ir gali skirtis net kelis kartus nuo žemyninės dalies). Tad, atlikus ankstesnių metų vėjo greičio pasiskirstymų analizę ar ilgalaikius matavimus toje vietovėje, galima tiksliau parinkti reikalingą vėjo elektrinę bei jos aukštį, taip optimizuojant visą projektą, jo kaštus. Bendruoju atveju kuo didesnis nominalus VE reikalingas vėjo greitis, tuo didesnė tikimybė, jog per metus bus mažiau dienų, kai VE generuos didžiausią įmanomą galią.

Modeliuojant vėjo elektrinės išskirstytos į tris parkus, kurių kiekvieno galios yra vienodos (po 3 MW), tačiau vėjo greičiai tose zonose parinkti skirtingi. Geltona kreivė žymi zoną, kurioje vėjo greitis siekia 8-12 m/s (pradinė vertė 8 m/s, tačiau po 6 s vėjo greitis pasiekia 12 m/s). Mėlyna kreivė žymi zoną, kurioje vėjo greitis 7-9 m/s (pradinė greičio vertė 7 m/s, tačiau po 6 s vėjo greitis pasiekia 9 m/s). Raudona kreivė žymi vėjo elektrinių parką su 11-14/s vėjo greičiu (pradinis vėjo greitis 11 m/s, tačiau po 9 s greitis pasiekia 14 m/s) (8 pav.).

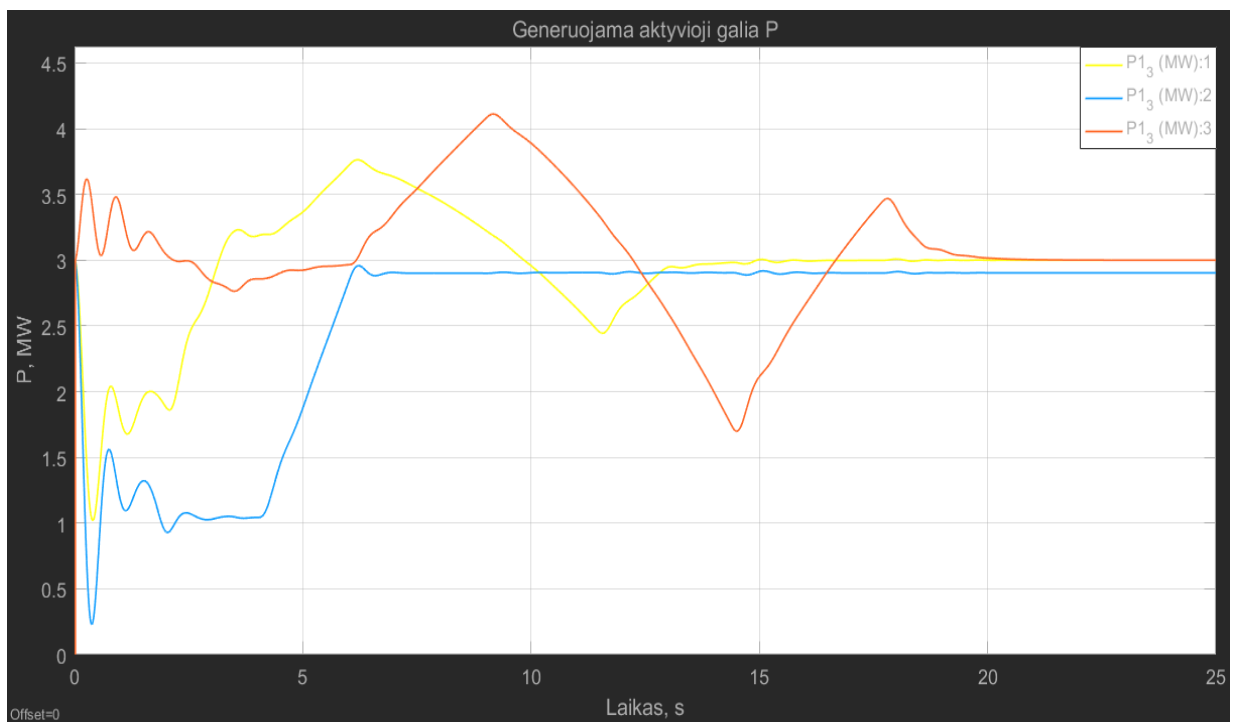


8 pav. Vėjo greičių pasiskirstymas atskiruose trijuose vėjo elektrinių zonose (VE nominalus greitis 9 m/s)

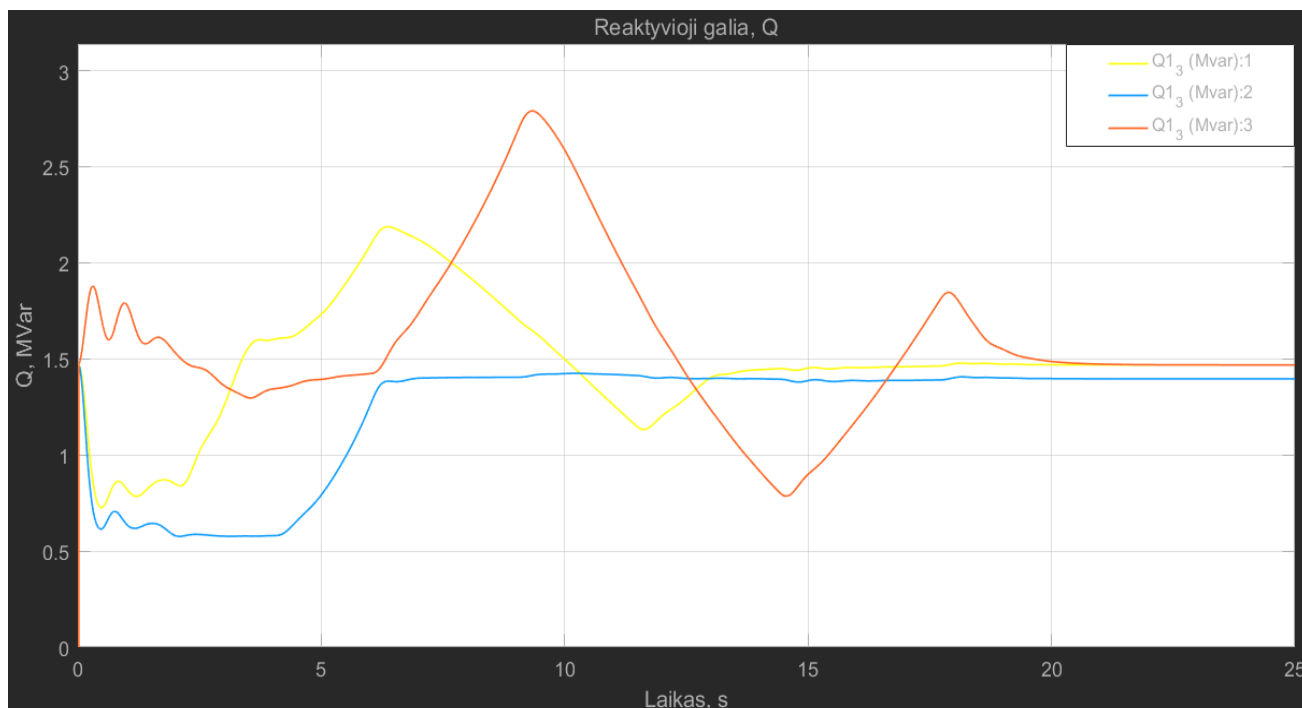
Atitinkamai kai vėjo greitis 9 m/s menčių pasukimo kampas neveikia ir kampas lygus nuliui, tačiau kai vėjo greitis pasiekia 12 m/s, pikinė menčių pasukimo kampo vertė siekia 16 laipsnių, jog pristabdyti vėjo elektrinės sukimą, o kai vėjo greitis pasiekia 14 m/s, menčių pasukimo kampas priartėja prie 24 laipsnių (9 pav.), siekiant pristabdyti turbiną, jos neišjungti avariniu būdu ir išlaikyti maksimaliai generuojamą galią. Atitinkamai ten, kur vėjo greičiai buvo didžiausi, aktyviosios ir reaktyviosios galių šuoliai ten taip pat buvo didžiausi (10 ir 11 pav.).



9 pav. Menčių pasukimo kampas prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 9 m/s)



10 pav. Aktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 9 m/s)



**11 pav.** Reaktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių

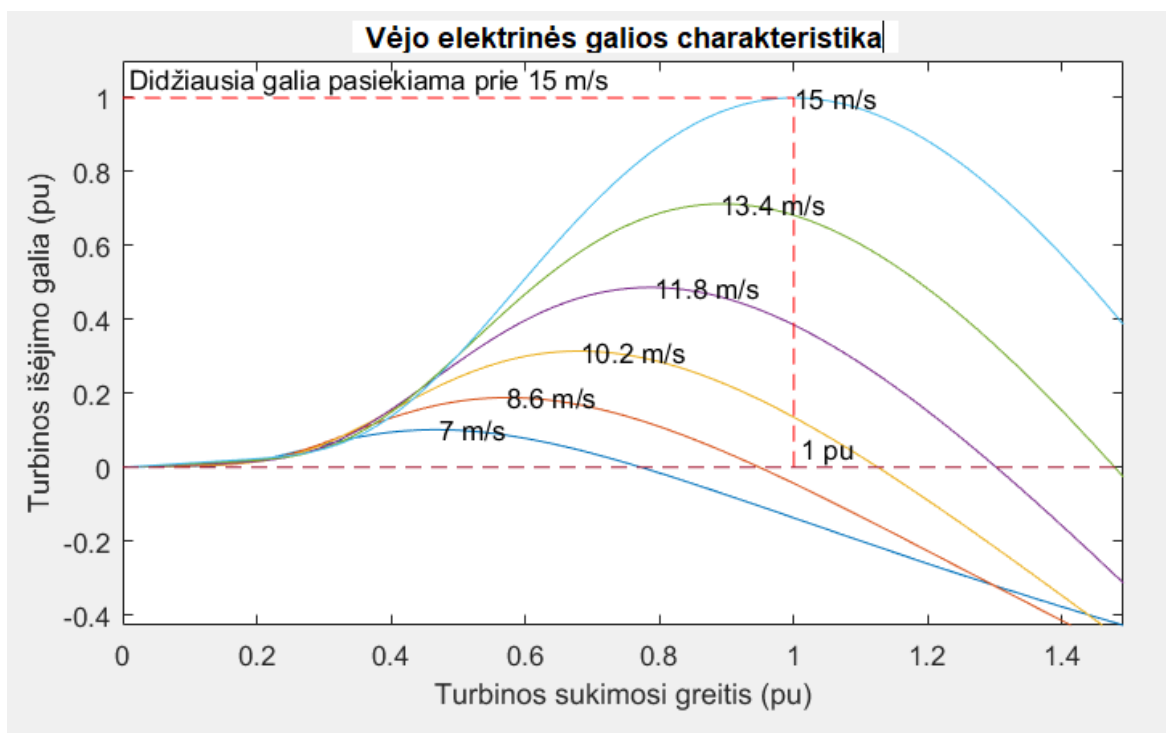
Atlikus šiuos modeliavimus galiu teigti, kad MPK padeda išlaikyti nominalią galią esant vėjo greičio pokyčiams, kurie nėra itin ženklūs ir nuo nominalios vertės skiriasi iki 5 m/s. Kaip galima matyti iš 9 pav., prie vėjo greičio 7-9 m/s (pradinė greičio vertė 7 m/s, tačiau po 6 s vėjo greitis pasiekia 9 m/s) MPK neveikia, tačiau iš 10 pav. matyti, jog yra generuojama didžiausia galima VE aktyvioji galia. Taip yra dėl to, jog užsiduotas nominalus vėjo greitis elektrinėms yra 9 m/s, o ši vėjo elektrinė būtent ir buvo modeliuojama zonoje, kurioje vėjo greitis siekia 9 m/s (mėlyna kreivė). Esant vėjo greičiui 8-12 m/s (pradinė vertė 8 m/s, tačiau po 6 s vėjo greitis pasiekia 12 m/s) galiu matyti, jog MPK suveikia ir vėjo greitis pasiekia 12 m/s, MPK siekia beveik 13 laipsnių (9 pav., geltona kreivė). Šiuo atveju generuojamoje aktyvioje galioje taip pat atsiranda šuoliai, kai vėjo greitis didėja, tačiau ji taip pat nusistovi ties nominalia VE 3 MW galia (10 pav.). Atliekant modeliavimą prie 11-14 m/s vėjo greičio (pradinis vėjo greitis 11 m/s, tačiau po 9 s greitis pasiekia 14 m/s) galiu matyti, jog MPK vertė prie 14 m/s siekia net 20 laipsnių (9 pav., raudona kreivė), kas rodo, jog siekiant išlaikyti vėjo elektrinės generuojamą didžiausią galią, mentės yra stipriai pasukamos. Generuojamos aktyviosios galios šuolis didėjant vėjo greičiui taip pat yra didžiulis, pikinė vertė šiek tiek viršija 4 MW (11 pav.), tačiau ties 20 sekunde taip pat nusistovi ties nominalia 3 MW aktyviąja galia. Atlikus visus šiuos modeliavimus galiu teigti, jog MPK suveikimas buvo korektiškas visose šiose vėjo greičių simuliacijose ir parodė, jog valdant mentes vėjo elektrinės generuojama galia yra išlaikoma nominali kintant vėjo greičiui.



## 11. Modeliavimas esant avariniam vėjo greičiui

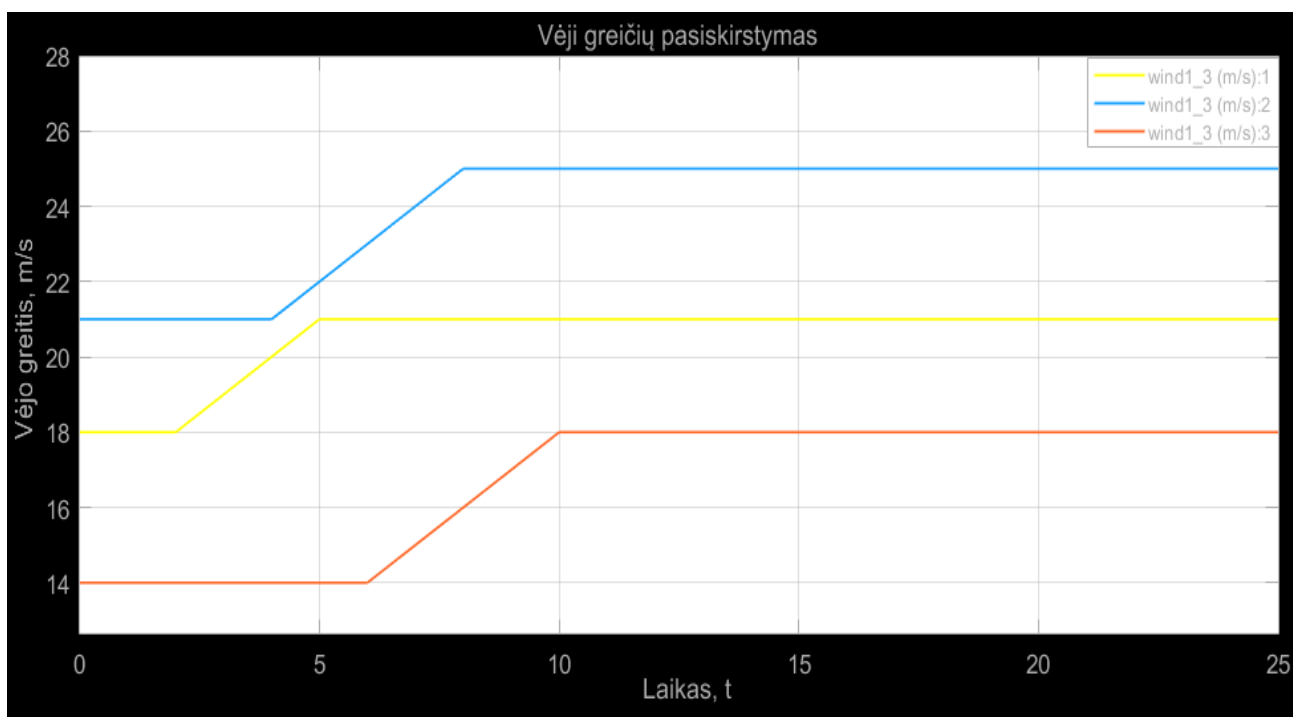
Atlikti šį modeliavimą pasirinkau dėl to, jog noriu ištirti, kaip veikia MPK esant vėjo greičiui, kuris artėja prie ribinio ir vėjo elektrinė turėtų būti išjungiamas, tačiau dėl MPK ji turėtų toliau veikti. Tai yra svarbu, nes tokiu atveju, kai vėjo greitis yra itin didelis, visas vėjo elektrinių parkas nebūtų išjungiamas, tik pristabdomas menčių sukimosi greitis, tačiau elektros energija toliau būtų generuojama. Šis modeliavimas yra aktualesnis jūrinėms vėjo elektrinėms, kadangi bent jau Lietuvos žemyninėje dalyje vėjo greitis prie ribinio (įprastai 25 m/s ir daugiau) priartėja itin retai (žinoma pasitaiko ir išimčių, vėjo greitis Lietuvoje yra siekęs ir 40 m/s [30]). Bendruoju atveju MPK suveikimas ir visiškas vėjo elektrinių parko neišjungimas yra naudingas finansiškai, kadangi vėjo elektrinės toliau gali generuoti nominalią galią ir tiekti elektros energiją į tinklą, taip generuojant pajamas ir pelną. Svarbu pabrėžti, kad į žalą, kurią VE gali patirti realybėje esant tokiai situacijai neatsižvelgiu, šios dalies tyrimo tikslas yra išnagrinėti, ar apskritai įmanoma išvengti visiško vėjo elektrinių išjungimo pasinaudojant menčių pasukimo kampu.

Šį modeliavimą pasirinkau atlikti su nominaliu 15 m/s greičiu vėjo elektrinėms. Nominalaus vėjo greičio VE padidinimas buvo atliktas todėl, jog buvo pastebėta, kad palikus 9 m/s nominalų greitį vėjo elektrinės prie ribinio vėjo greičio vis tiek yra atjungiamos apsaugų, kadangi neužtenka MPK, jog suvaldyti menčių sukimąsi, tad buvo priimtas sprendimas padidinti nominalų greitį iš 9 m/s į 15 m/s. Atlikus šį pakeitimą buvo apeitas pilnas vėjo elektrinių išjungimas dėl suveikusių apsaugų. Bendruoju atveju logikos ribos nėra pažeidžiamos, kadangi yra vėjo elektrinių, kurios nominalią galią generuoja ir prie šio nominalaus vėjo greičio. Galios kreivę, kai MPK lygus 0 laipsnių, pateikiu 12 pav.



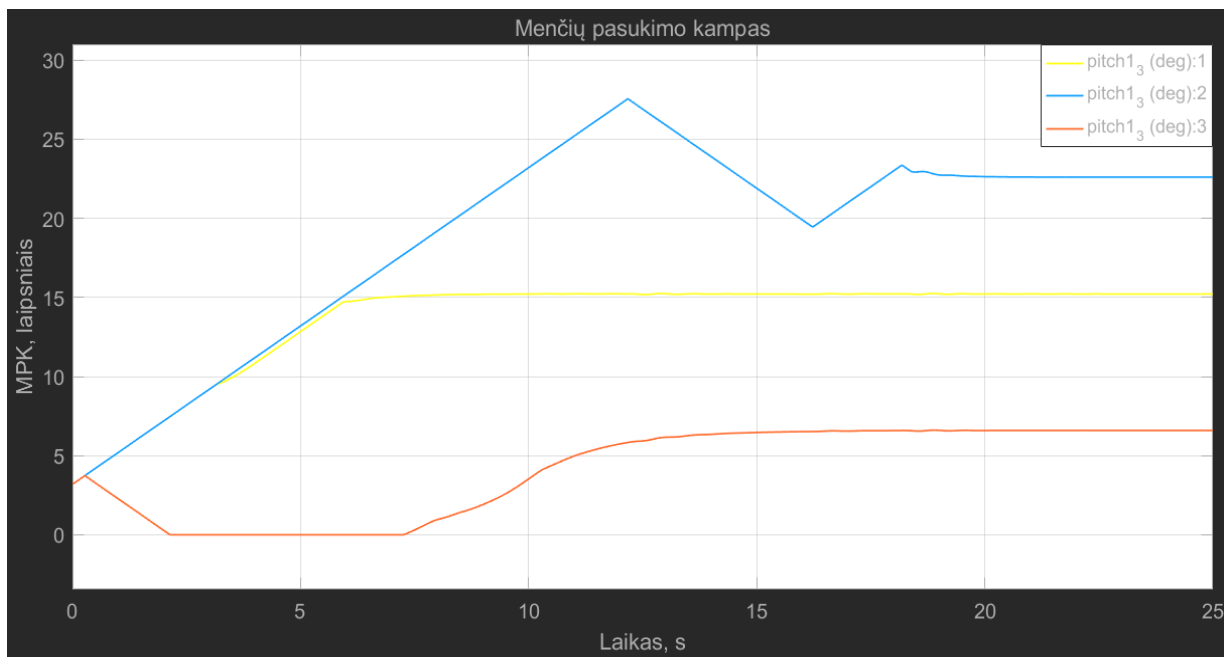
12 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė prie 15 m/s

Kadangi norima patikrinti, kokią įtaką menčių pasukimo kampas turės prie vėjo greičių, kurie artėja link avarinio išjungimo (dažniausiai 25 m/s) VE ribos, tai pasirinktos tokios vėjo greičių zonos: raudona kreivė žymi vėjo elektrinių parką su 14-18 m/s vėjo greičiu (pradinė vertė 14 m/s, tačiau po 10 s vėjo greitis pasiekia 18 m/s ir ties ją nusistovi). Geltona kreivė žymi zoną, kurioje vėjo greitis siekia 18-21 m/s (pradinė vertė 18 m/s, tačiau po 5 s vėjo greitis pasiekia 21 m/s ir ties ją nusistovi). Mėlyna kreivė žymi zoną, kurioje vėjo greitis 21-25 m/s (pradinė vertė 21 m/s, tačiau po 8 s vėjo greitis pasiekia 25 m/s ir ties ją nusistovi, ši reikšmė yra lygi avariniam vėjo greičiui). Vėjo greičių pasiskirstymas pateikiamas 13 pav.



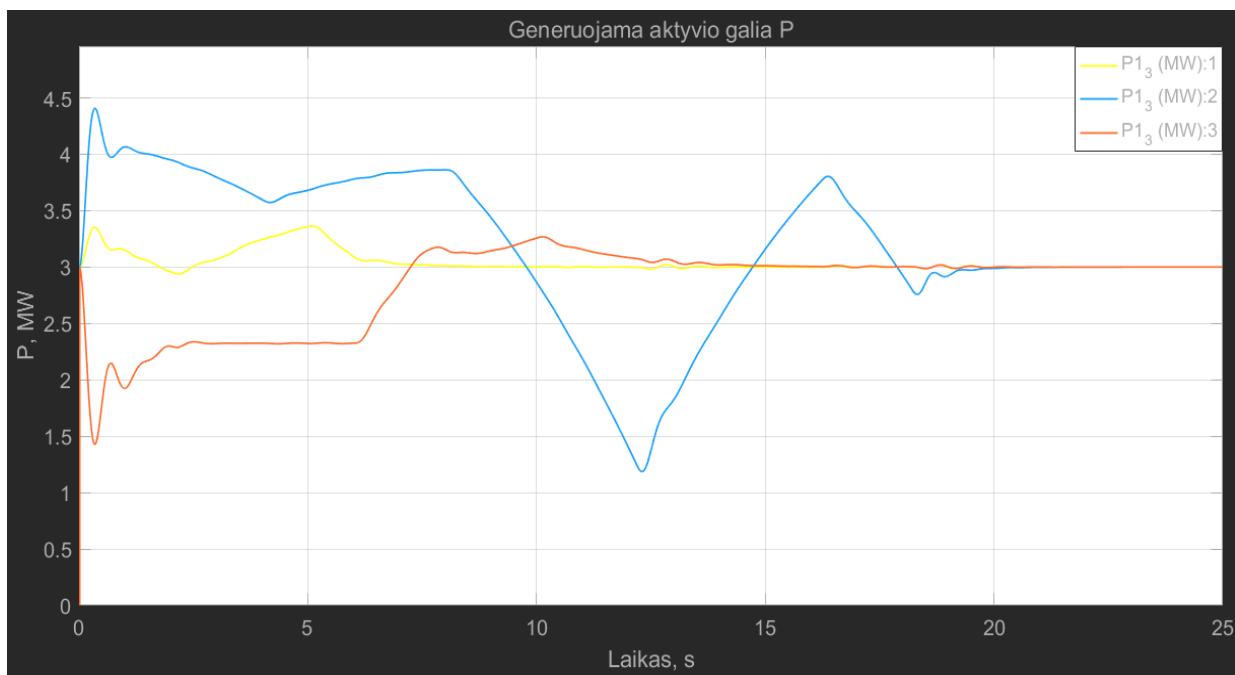
**13 pav.** Vėjo greičių pasiskirstymas atskiruose trijuose vėjo elektrinių zonose (VE nominalus greitis 15 m/s)

Esant tokiems greičiams ženkliai išauga menčių pasukimo kampo vertės. Esant 18 m/s vėjui (raudona kreivė, 13 ir 14 pav.), menčių pasukimo kampo nusistovėjęs dydis siekia arti 7 laipsnių, o pikinė vertė buvo panaši į nusistovėjusią. Prie 21 m/s vėjo greičio (geltona kreivė, 13 ir 14 pav.) nusistovėjusi vertė siekia 15 laipsnių, pikinė vertė taip pat artima nusistovėjusiai. Ties 25 m/s vėjo greičiu (mėlyna kreivė, 13 ir 14 pav.) MPK nusistovėjusi vertė siekia net 22,5 laipsnio, o pikinė vertė siekia net virš 27 laipsnių. Tai rodo ženklų menčių pasisukimą, dėl kurio vėjo elektrinė nėra visiškai išjungiamą, tiesiog pristabdomas jos sukimasis ir ji gali toliau generuoti elektros energiją į tinklą.



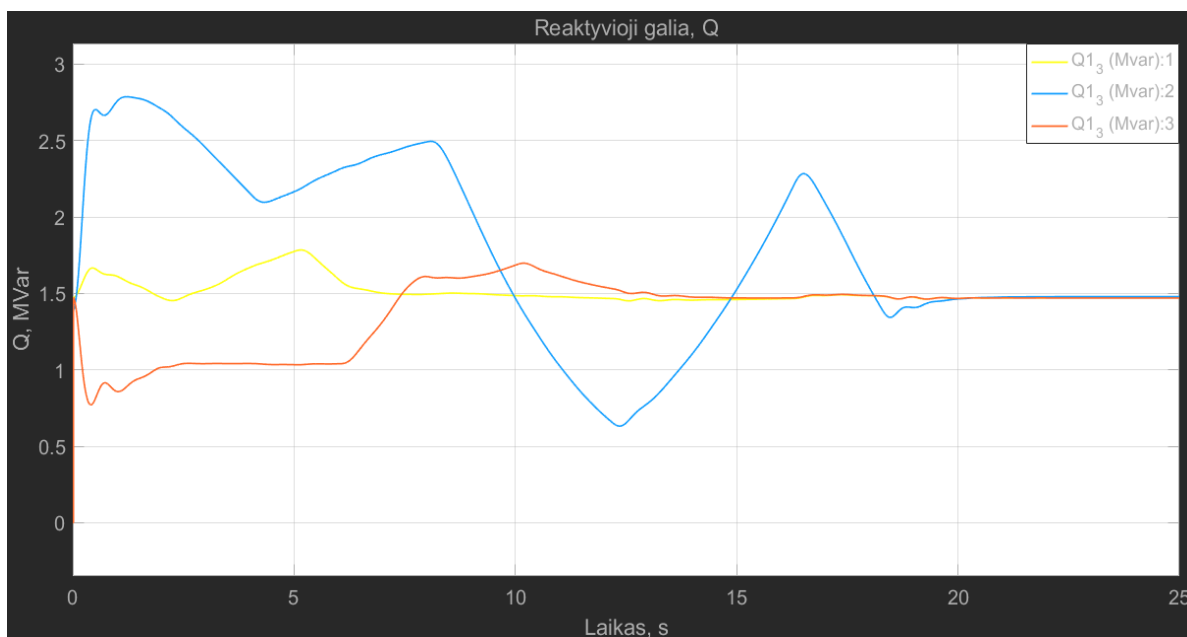
**14 pav.** Menčių pasukimo kampas prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 15 m/s)

Generuojamos aktyviosios galios šuoliai esant tokiam dideliame vėjo greičiui taip pat yra nemaži, ypač dideli aktyviosios galios šuoliai (15 pav.) yra esant 25 m/s vėjui (mėlyna kreivė), kai menčių pasukimo kampas yra itin didelis. Šiuo atveju generuojama galia siekia net arti 4,5 MW. Prie 18 ir 21 m/s vėjo greičių šie šuoliai nėra tokia dideli.



**15 pav.** Aktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių ir menčių pasukimo kampų (VE nominalus greitis 9 m/s)

Taip pat galime susieti ir reaktyviosios galios generaciją atsižvelgiant į esamas sąlygas. Matoma (16 pav.), kad tiek didžiausi šuoliai, tiek apskritai didžiausia generuojama reaktyvioji galia yra ties mėlyna kreivė, kuri žymi atitinkamai didžiausią vėjo greitį (21–25 m/s), o atitinkamai mažiausi reaktyviosios galios svyravimai yra su geltona kreive, kuri žymi vėjo greitį artimą avariniam, bet ne tokį didelį kaip kitos kreivės (19–21 m/s). Galima matyti, jog esant didžiausiam vėjo greičiui (25 m/s) didžiausia reaktyviosios galios pika siekia net arti 2,75 MVar, tačiau dėl MPK suveikimo yra mažinama, kol nusistovi ties 1,5 MVar.



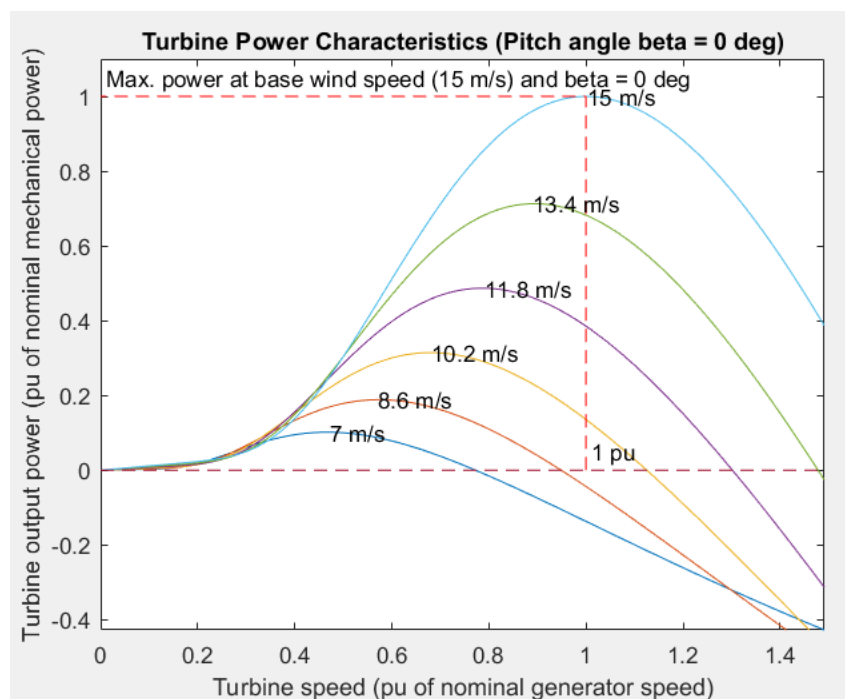
**16 pav.** Reaktyviosios galios priklausomybė prie skirtingų vėjo greičių (VE nominalus greitis 9 m/s)

Iš gautų rezultatų, matomų 13–16 pav., galima teigti, jog MPK panaudojimas esant labai dideliam vėjo greičiui yra veiksminga priemonė, apsaugoti vėjo elektrinę nuo priverstinio išjungimo, tiesiog sulėtinant jos sukimąsi ir leidžiant toliau generuoti elektros energiją į tinklą, taip gaunant pajamas ir uždirbant pilną. Savaiame suprantama, kad to daryti nerekomenduočiau prie 25 m/s vėjo greičio (visuose grafikuose ši kreivė žymima mėlyna spalva), nes MPK tokiu atveju artėja prie 30 laipsnių pikinės vertės (nusistovėjusi 22,5 laipsnio), generuojamos tiek reaktyviosios, tiek aktyviosios šuoliai yra labai dideli ir žala vėjo elektrinei gali būti didesnė nei nauda leidžiant generuoti energiją (žalos vertinimo prie šio vėjo greičio dirbant vėjo elektrinėms aš savo darbe nedariau, kadangi mano šios dalies tiriamojo darbo tikslas buvo išsiaiškinti, ar pasinaudojus MPK galima išvengti visiško vėjo elektrinių išjungimo prie avarinių vėjo greičių). Tačiau, kai kalbame apie vėjo greitį 18-20 m/s, MPK puikiai atlieka savo funkciją, pačios menčių pasukimo kampo vertės siekia 5-15 laipsnių (geltona ir raudona kreivės, 14 pav.), o aktyvioji ir reaktyvioji galia išlaikoma didžiausios galimos generacijos ribose (15 ir 16 pav.), išvengiant visiško vėjo elektrinių išjungimo. Bendruoju atveju naudoti tai praktikoje reikėtų tolimesnių tyrimų dėl vėjo elektrinėms daromos žalos, kadangi toks didelis menčių pasukimas gali lemti greitesnį vėjo elektrinių komponentų nusidėvėjimą. Mūsų šalies atžvilgiu šis modeliavimas yra aktualiausias numatomam jūrinių vėjo elektrinių parkui, kadangi žemyninėje dalyje vėjo greičiai priartėja prie avarinių itin retais atvejais, o atviroje jūroje ir dideliuose aukščiuose tikėtina, jog tai gali nutikti dažniau.

## 12. Modeliavimas balansavimui žemyn

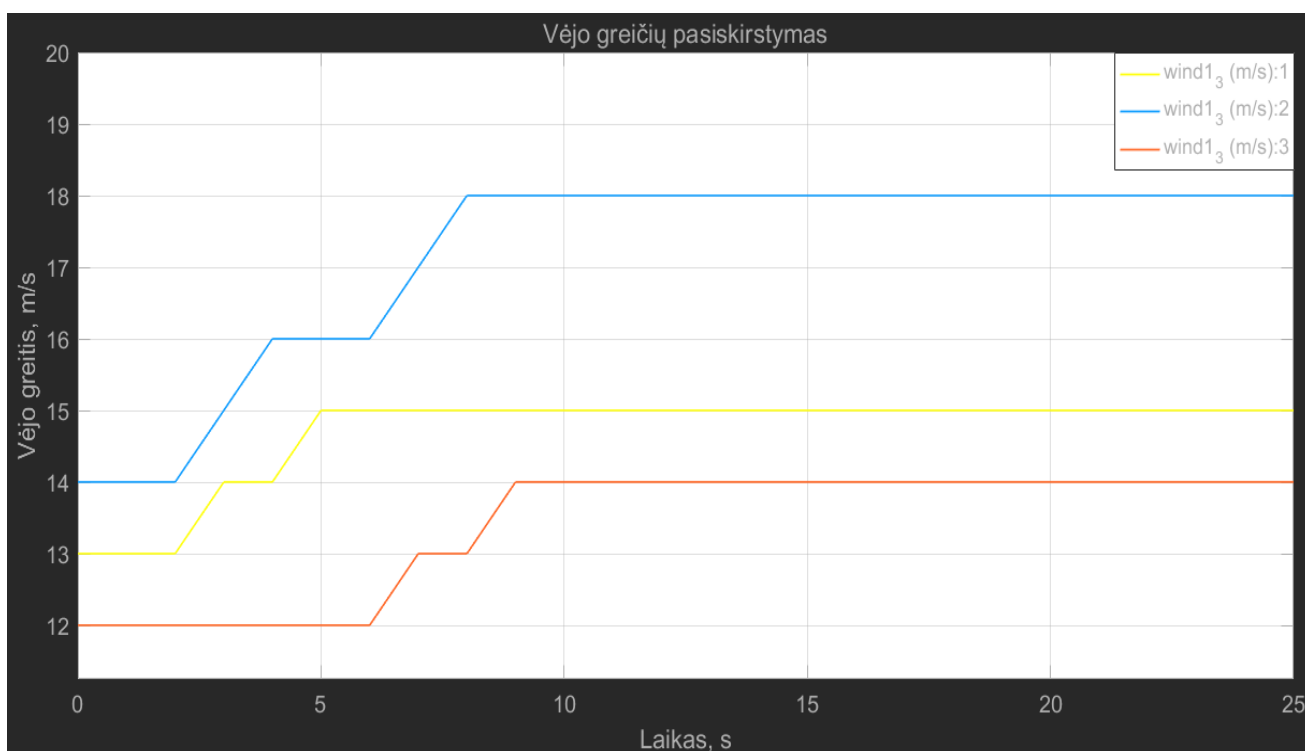
Kaip ir minėjau prieš tai, įgyvendinant FIT for 55 (iki 2030 m. bent 55 % sumažinti ES išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį [29]), Europos žaliojo kurso (iki 2050 m. tapti pirmuoju aplinkai taršos požiūriu neutraliu kontinentu [29]) ir kitus žaliosios energetikos plėtros tikslus, vėjo elektrinių skaičius pasaulyje tik didės, tad natūralu, kad bus perteklinės generacijos dienų, kai energijos bus sugeneruojama daugiau, nei jos reikia realiuoju laiku. Tokiu atveju, savaime suprantama, kyla mintis apie kaupiklius, tačiau kaupikliai lygiai taip pat gali būti užpildyti jeigu perteklinė generacija tęsiasi keletą dienų, tad reikės kažką daryti su realiuoju laiku generuojama pertekline energija. Šioje situacijoje menčių pasukimo kampas galės stipriai prisidėti prie „balansavimo žemyn“, kadangi taikant MPK bus galima pristabdyti vėjo elektrinių turbinų sukimosi greitį ir taip mažinti generuojamą galią į tinklą, neatjunginėjant ištisu saulės ar VE parkų dėl perteklinės generacijos. Balansavimo žemyn perspektyva vėjo elektrinėse yra perspektyvi ir reikalinga nebe gamintojams, ji taps reikalinga valstybiniui ir net kontinentiniui lygmeniu, siekiant palaikyti galių balansą tarp skirtingų šalių, ypač įgyvendinant išsikeltus žaliosios energetikos tikslus. Būtent todėl savo darbe nusprendžiau nagrinėti ir balansavimo žemyn galimybę su tikslu iširti, kiek ženkliai tai prisidėtų prie galios balanso užtikrinimo tinkle.

Šį modeliavimą pasirinkau atlikti su nominaliu 15 m/s vėjo greičiu vėjo elektrinėms. Galios kreivę pateikiu 17 pav.



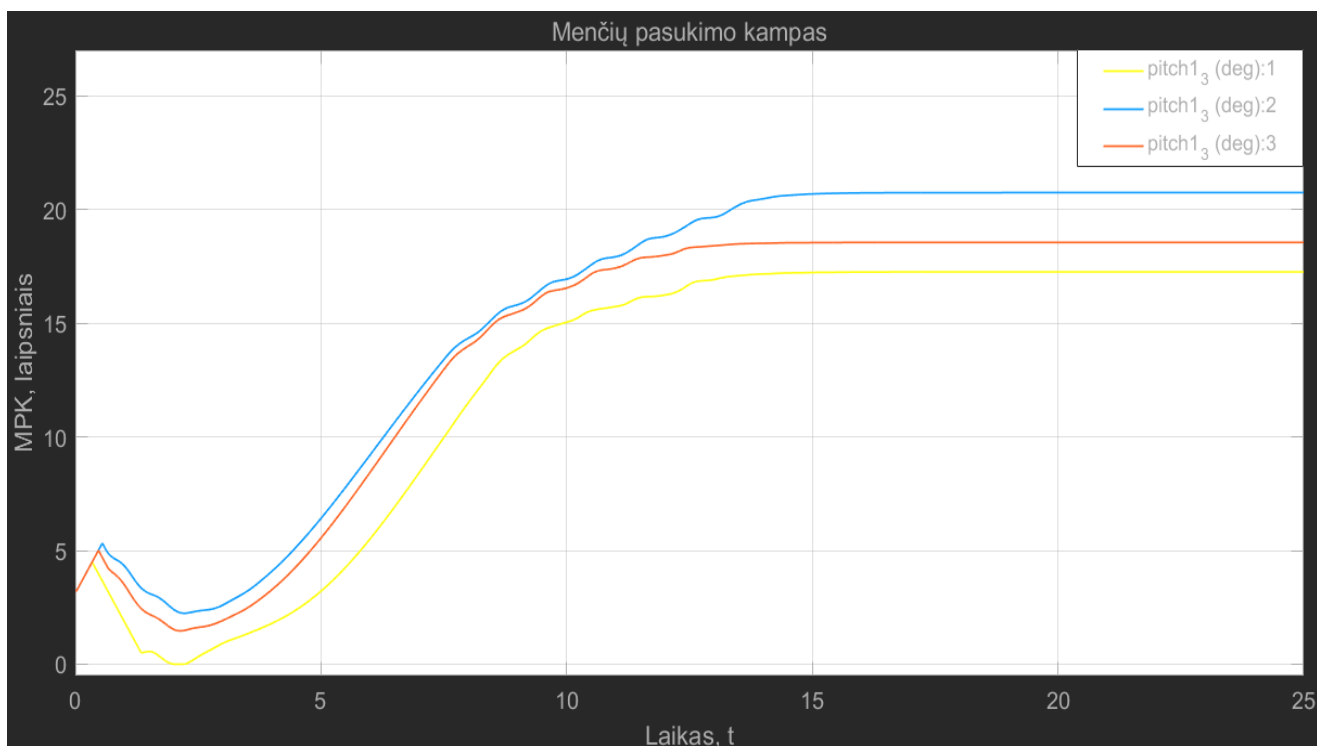
17 pav. Vėjo elektrinės galios kreivė prie nominalaus 15 m/s vėjo greičio

Vėjo greičius šiam modeliavimui pasirinkau taip pat skirtingus: pirmoji vėjo elektrinė dirba su vėjo greičiu 14-18 m/s, (pradinė vertė 14 m/s, tačiau po 8 s vėjo greitis pasiekia 18 m/s, mėlyna kreivė 18 pav.). Antroji elektrinė su 13-15 m/s vėjo greičiu (pradinė vertė 13 m/s, tačiau po 5 s vėjo greitis pasiekia 15 m/s, geltona kreivė 18 pav.). Trečioji elektrinė su 12-14 m/s vėjo greičiu, (pradinė vertė 12 m/s, tačiau po 9 s vėjo greitis pasiekia 14 m/s raudona kreivė 18 pav.). Vėjo greičiai specialiai pasirinkti tokie, jog vienas iš jų nesiektų nominalaus VE vėjo greičio, kitas būtų lygus nominaliam, o trečiasis būtų kiek didesnis nei nominalus, taip sudarant kiek įmanoma skirtingus scenarijus menčių pasukimo tyrimui.



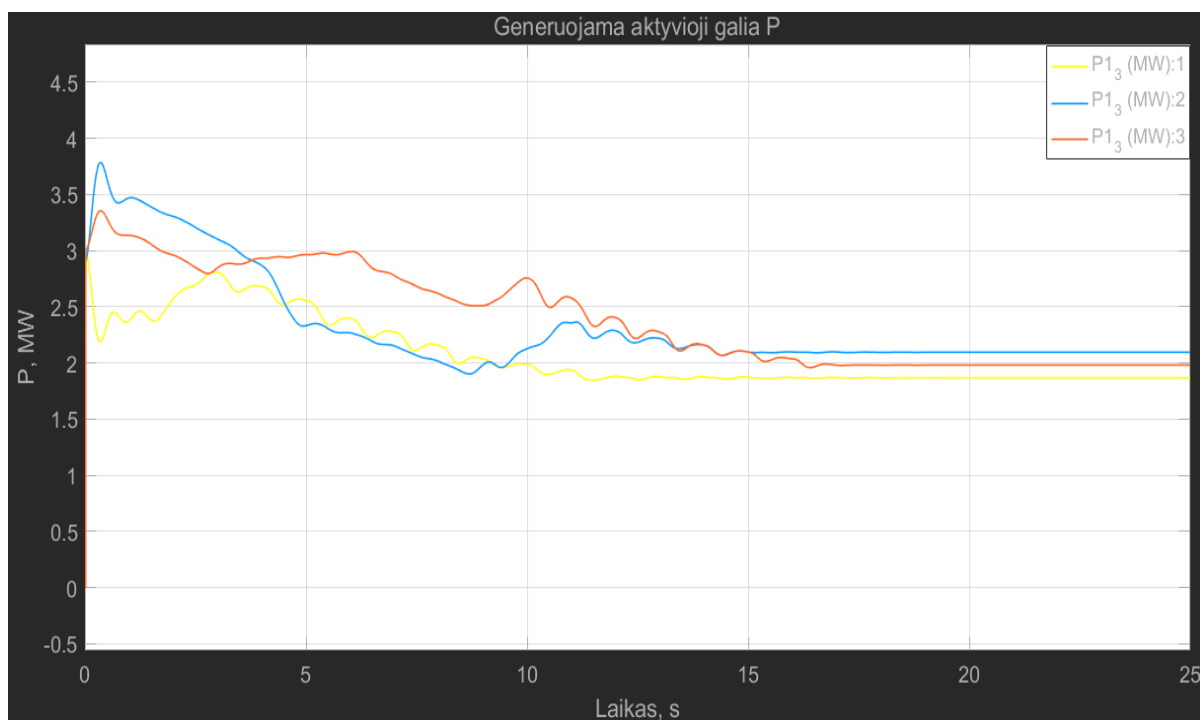
**18 pav.** Vėjo greičių pasiskirstymas balansavimo žemyn modeliavimui (VE nominalus greitis 15 m/s)

Susimodeliavus šiuos vėjo greičius pradedamas MPK modeliavimas (19 pav.). Užsibrėžta, kad priverstinai MPK kampas yra keičiamas po iki 2,5 laipsnių per sekundę greičiu iki tam tikrų nusistatytų ribų. Mėlynai kreivei (vėjo greitis 18 m/s) ši pasirinkta riba yra 21 laipsnis, geltonai kreivei (vėjo greitis 15 m/s) ši pasirinkta riba yra 17,5 laipsnių, o raudonai kreivei (vėjo greitis 14 m/s) ši pasirinkta riba siekia 18,5 laipsnių. Tokiu atveju nustačius priverstinį menčių pasukimą generuojama galia yra mažinama ir bus stebima, kokie yra galios pasikeitimo diapazonai, kiek ženkliai galima atlikti balansavimą žemyn.



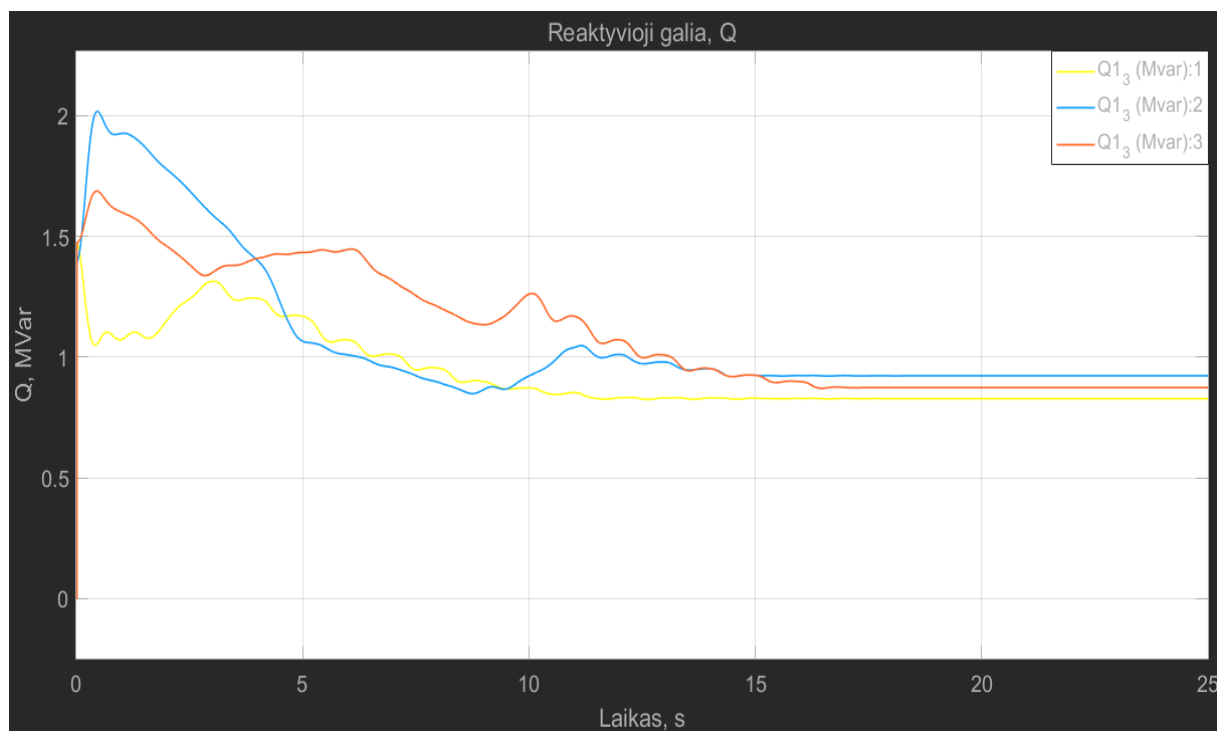
**19 pav.** Menčių pasukimo kampas modeliuojant balansavimą žemyn (VE nominalus greitis 15 m/s)

Toliau stebimi generuojamos galios pokyčiai (20 pav.). Kaip ir buvo galima tikėtis, ten kur vėjo greitis didžiausias (mėlyna kreivė 18 m/s, 18 pav.), pradinės generuojamos galios šuolis yra didžiausias ir siekia 3,5 MW (20 pav.). Tačiau ties laiku 14 s nusistovi 21 laipsnio MPK vertė ir generuojama galia tampa pastovi, 2,2 MW. Raudona kreivė su vėjo greičiu 14 m/s (18 pav.) nusistovi su 2 MW galia (20 pav.), o geltona kreivė esant 15 m/s vėjo (18 pav.) greičiui nusistovi su apytiksliai 1,9 MW galia (20 pav.). Tai reiškia, kad dėl balansavimo žemyn nuo nominalios galios (3 MW), generuojama galia yra primažinama 0,8–1,1 MW, kas procentiškai reiškia, kad generuojamą galią pasinaudojant MPK galima sumažinti net 27–37 %, užuot išjungus atskiras vėjo elektrines ar jų parkus, kai tinkle yra generuojamos galios perviršis ir visi kaupikliai yra užpildyti. Prie 18 m/s vėjo ir 21 laipsnio menčių pasukimo kampo generuojamą aktyviają galią pavyko sumažinti 26,7 %, prie 15 m/s vėjo greičio ir 17,5 MPK generuojamą galią pavyko sumažinti 36,7 %, o prie 14 m/s vėjo greičio ir 18,5 menčių pasukimo kampo generuojama aktyvioji galia sumažinama 33,3 %. Kaip jau minėta, šiandien tai nėra itin opi problema, tačiau po 2050 m., kai bus visiškai pereita prie atsinaujinančios energijos, tai taps itin aktualu ir menčių pasukimo kampo dėka bus galima mažinti vėjo elektrinių generuojamą galią ir tiekiamą elektros energiją į tinklą visiškai nestabdant jų veikimo. Kaip ir praeitame modeliavime, taip ir šiame noriu pabrėžti, jog ekonominis vertinimas nėra atliekamas ir tai yra tik tiriamojo pobūdžio modeliavimas, skirtas išsiaiškinti galimybę mažinti generuojamą galią pasinaudojus menčių pasukimo kampu to prirėkus.



**20 pav.** Aktyviosios galios pokytis modeliuojant balansavimą žemyn (VE nominalus greitis 15 m/s)

Lygiagrečiai keičiantis aktyviajai galiai, kinta ir reaktyvioji galia. Jos kitimo diapazoną ir šuolius galima matyti 21 pav.



**21 pav.** Reaktyviosios galios pokytis modeliuojant balansavimą žemyn (VE nominalus greitis 15 m/s)



Apibendrinant MPK panaudojimo balansavimui žemyn modeliavimo rezultatus galiu teigti, kad ateityje tai bus itin svarbus energetikos sistemos komponentas. Kai valstybės visiškai ar beveik visiškai pereis vien prie atsinaujinančių išteklių energijos (pagal dabartinius planus ES tai planuoja padaryti iki 2050m., [29]), bus itin svarbu ne tik užtikrinti, kad generuojama galia patenkintų vartotojų poreikius, tačiau lygiai taip pat svarbu bus užtikrinti ir galios balansą esant perteklinei generacijai, kur šiuo atveju balansavimas žemyn vėjo elektrinėmis pasinaudojant menčių pasukimo kampu leis išvengti tiek vėjo, tiek saulės elektrinių parkų pilno išjungimo, leidžiant ir toliau generuoti. Tai yra itin aktualu ir gaminantiems vartotojams, kadangi jiems taip pat gali kilti iššūkių su elektros energijos tiekimu į tinklą dideliais kiekiais, kai to tinklui paprasčiausiai nereikės. Bendrai tariant, visiškas perėjimas prie atsinaujinančios energijos elektros tinklams visoje Europoje sukurs daugybę iššūkių, o vienas iš jų bus balansavimas žemyn. Įgyvendinant „FIT for 55“ ir kitus žaliosios energetikos plėtros tikslus, vėjo elektrinių skaičius tiek Europoje, tiek pasaulyje tik didės. Tad savaimė suprantama, kad bus perteklinės generacijos dienų. Balansavimo žemyn galimybės vėjo elektrinėse yra perspektyvios ir reikalingos nebe gamintojams, jos taps reikalingos valstybiniu lygmeniu, siekiant palaikyti galių balansą tarp skirtingų šalių.

## Išvados

- 1) Baigiamajame darbe apžvelgtos elektros sistemos balansavimo galimybės vėjo elektrinėmis atsižvelgiant į tai, kad jos turi besisukančių dalių ir gali atlikti sistemos balansavimą tiek pasinaudojant menčių pasukimo kampo keitimu, tiek rotoriaus srovės keitimu, jeigu yra tokia galimybė. Apžvelgti skirtumai tarp DFIG ir PMSG vėjo elektrinių generatorių. PMSG generatoriaus tipo vėjo elektrinė gautą mechaninę energiją perduoda per veleną ir pasinaudojant magnetinio lauko sukimusi, šią energiją paverčia kintamąja elektros energija. DFIG – generatorius, kuris tiekia energiją tiek per rotorių (prijungta prie keitiklio per slydimo žiedus ir šepėčius), tiek per statorių (statorius prijungtas prie tinklo).
- 2) Darbo metu išnagrinėta, kad esant mažam vėjo greičiui (įprastai 4–6 m/s) MPK gali padėti paleisti vėjo elektrinę. Esant nominaliam vėjo greičiui (įprastai 6–20 m/s), MPK gali padėti išlaikyti didžiausią įmanomą vėjo elektrinės generaciją. Be kita ko, išsiaiškinta, kad menčių pasukimas taip pat naudojamas esant ribiniam vėjo greičiui (įprastai daugiau nei 25 m/s). Šiuo atveju MPK gali būti naudingas tuo, kad nebūtina stabdyti visos vėjo elektrinės, galima tik pristabdyti menčių sukimąsi. MPK taip pat gali būti naudojamas ir sisteminei perteklinei galiai mažinti. Vėjo elektrinių skaičius pasaulyje tik didės, tad natūralu, kad bus perteklinės generacijos dienų, o taikant MPK bus galima mažinti generuojamą galią į tinklą. Teorinėje dalyje taip pat pristatyti ir PI bei PID valdiklių skirtumai, kurie naudojami MPK valdyti. PI tipo valdikliu galima pašalinti pastovios būsenos paklaidą, tačiau integruoto režimo taikymas gali neigiamai paveikti reakcijų vyksmo greitį. Paprastai tariant, PI tipo valdiklis plačiai naudojamas tada, kai nereikalingas didelis greitis ir žinoma, kad proceso metu susidaro trikdžių. PID tipo valdiklis turi visus PI valdiklio privalumus bei turi didesnę reakcijos greitį.
- 3) Modeliuojant vėjo elektrinės buvo išskirstytos į tris vienodos galios parkus. Pirmojo modeliavimo atveju vėjo greitis yra artimas nominaliam vėjo elektrinei. Pirmame parke greitis siekia 8–12 m/s, antrame 7–9 m/s, o trečiame jis yra 11–14/s. Atitinkamai kai greitis 9 m/s, MPK lygus nuliui, tačiau kai vėjo greitis pasiekia 12 m/s, pikinė menčių pasukimo kampo vertė siekia 16 laipsnių, jog pristabdyti vėjo elektrinės sukimąsi. Kito modeliavimo metu vėjo greičiai buvo parinkti arti avarinių. Esant 18 m/s vėjui, menčių pasukimo kampo nusistovėjęs dydis siekia arti 14 laipsnių, prie 21 m/s vėjo greičio nusistovėjusi vertė 15 laipsnių, o ties 25 m/s vėjo greičiu MPK vertė siekia net 22,5 laipsnio, tačiau generuojama galia buvo išlaikoma apie 3 MW. Trečiajame modeliavime buvo imituojamas balansavimas žemyn. Pirmasis parkas dirba su 14–18 m/s, antrasis su 13–15 m/s, o trečiasis su 12–14 m/s vėjo greičiu. Buvo nusistatytos didžiausios galimos MPK vertės. Pirmajam parkui pasirinkta riba yra 21 laipsnis, antrajam ši riba yra 17,5 laipsnio, o trečiajam ši pasirinkta riba siekia 18,5 laipsnio. Pirmajame parke generuojama aktyvioji galia nusistovi ties 2,2 MW. Antrasis parkas nusistovi su 2 MW galia (20 pav.), o trečiasis nusistovi su apytiksliai 1,9 MW galia. Tai reiškia, kad dėl balansavimo žemyn nuo nominalios galios (3 MW), generuojama galia yra primažinama 0,8–1,1 MW. Vadinasi, procentiškai generuojamą galią pasinaudojant MPK šiuo atveju galima sumažinti net 27–37 %.

## Literatūros sąrašas

1. Xuejing Sun, Jianyang Zhu, Zongjin Li, „Rotation improvement of vertical axis wind turbine by offsetting pitching angles and changing blade numbers“, 2021 m., [žiūrėta 2023-01-09], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220322842>
2. „Onshore vs offshore wind energy: what’s the difference?“, 2022 m., [žiūrėta 2023-01-15], prieiga per internetą: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/onshore-vs-offshore-wind-energy>
3. Chia-Nan Wang, Wen-Chang Lin and Xuan-Khoa Le, „Modelling of a PMSG Wind Turbine with Autonomous Control“, 2014 m., [žiūrėta 2023-01-23], prieiga per internetą: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/856173/>
4. Camille Hamon, „Doubly-fed Induction Generator Modeling and Control in DigSilent Power Factory“, 2010 m., [žiūrėta 2023-01-23], prieiga per internetą: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:611644/FULLTEXT01.pdf>
5. M. Larbi, Hassaine Said, M.W. Benziane, „Experimental research and control of PMSG based wind turbine connected to grid“, 2015 m., [žiūrėta 2023-02-06], prieiga per internetą: [https://www.researchgate.net/publication/290494873\\_Experimental\\_research\\_and\\_control\\_of\\_PMSG\\_based\\_wind\\_turbine\\_connected\\_to\\_grid](https://www.researchgate.net/publication/290494873_Experimental_research_and_control_of_PMSG_based_wind_turbine_connected_to_grid)
6. Xilin Zhao, Zhenyu Lin, Bo Fu, Sili Gong, „Research on frequency control method for micro-grid with a hybrid approach of FFR-OPPT and pitch angle of wind turbine“, 2021 m., [žiūrėta 2023-02-17], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061520342150>
7. Wei Zhang, Kailun Fang, „Controlling active power of wind farms to participate in load frequency control of power systems“, 2017 m., [žiūrėta 2023-02-18], prieiga per internetą: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-gtd.2016.1471> ,
8. Rashad M. Kamel, „Standalone micro grid power quality improvement using inertia and power reserves of the wind generation systems“, 2016 m., [žiūrėta 2023-03-02], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811630516X>
9. Mostafa Karimpour, Robert Schmid, Ying Tan, „Exact output regulation for wind turbine active power control“, 2021 m., [žiūrėta 2023-03-24], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066121001398>
10. P. Sreenivas, V.S. Srinivasa Murthy, S. Vijaya Kumar, „Design and analysis of new pitch angle controller for enhancing the performance of wind turbine coupled with PMSG“, 2022 m., [žiūrėta 2023-04-05], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321072023> ,
11. K Smriti Rao, Ravi Mishra, „Comparative study of P, PI and PID controller for speed control of VSI-fed induction motor“, 2014 m., [žiūrėta 2023-04-14], prieiga per internetą: <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1402230.pdf>
12. Sandeep VM, „When and why to use P, PI, PD and PID Controller?“, 2021 m., [žiūrėta 2023-04-14], prieiga per internetą: <https://medium.com/@svm161265/when-and-why-to-use-p-pi-pd-and-pid-controller-73729a708bb5>
13. Scott Zhuge, „PID Control Theory“, 2020 m., [žiūrėta 2023-04-26], prieiga per internetą: <https://www.crystalinstruments.com/blog/2020/8/23/pid-control-theory>

14. Kamran Iqbal, „PI, PD, and PID Controllers“, 2020 m., [žiūrėta 2023-05-01], prieiga per internetą:  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Introduction\\_to\\_Control\\_Systems\\_\(Iqbal\)/03%3A\\_Feedback\\_Control\\_System\\_Models/3.3%3A\\_P%2C\\_P%2C\\_and\\_PID\\_Controllers](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Introduction_to_Control_Systems_(Iqbal)/03%3A_Feedback_Control_System_Models/3.3%3A_P%2C_P%2C_and_PID_Controllers)
15. Aimee Molineux, „What are the Principles of PID Controllers?“, 2023 m., [žiūrėta 2023-05-17], prieiga per internetą: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=22851>
16. Desborough Honeywell, „PID Control“, 2000 m., [žiūrėta 2023-05-24], prieiga per internetą: [https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa04/caltech/am04\\_ch8-3nov04.pdf](https://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa04/caltech/am04_ch8-3nov04.pdf)
17. Ahmet Selim Pehlivan, „Performance Comparison of Pitch Angle Controllers for 2MW Wind Turbine“, 2020 m., [žiūrėta 2023-09-11], prieiga per internetą: [https://research.sabanciuniv.edu/id/eprint/40834/1/ICSEEC2020\\_FullPaperTemplate\\_ASP\\_v2\\_07.09.2020.pdf](https://research.sabanciuniv.edu/id/eprint/40834/1/ICSEEC2020_FullPaperTemplate_ASP_v2_07.09.2020.pdf),
18. Fuzzy logic apibrėžimas, [žiūrėta 2023-09-17] veikimo principo išaiškinimas, prieiga per internetą:  
[https://www.tutorialspoint.com/artificial\\_intelligence/artificial\\_intelligence\\_fuzzy\\_logic\\_systems.htm](https://www.tutorialspoint.com/artificial_intelligence/artificial_intelligence_fuzzy_logic_systems.htm)
19. Fuzzy Logic paaiškinimas, 2023 m., [žiūrėta 2023-09-17], prieiga per internetą: <https://www.geeksforgeeks.org/fuzzy-logic-introduction/>
20. Ernesto Chavero-Navarrete, Mario Trejo-Perea, „Expert Control Systems for Maximum Power Point Tracking in a Wind Turbine with PMSG: State of the Art“, 2019 m., [žiūrėta 2023-09-29], prieiga per internetą“ [https://www.researchgate.net/figure/A-PID-controller-is-used-to-regulate-the-pitch-angle-and-perform-the-MPPT-an-ANN-is-used\\_fig2\\_333832692](https://www.researchgate.net/figure/A-PID-controller-is-used-to-regulate-the-pitch-angle-and-perform-the-MPPT-an-ANN-is-used_fig2_333832692)
21. „Windy physics: how is power of a wind turbine calculated?“, [žiūrėta 2023-10-04], prieiga per internetą: <https://thundersaidenergy.com/downloads/wind-power-impacts-of-larger-turbines/>
22. Marisa Blackwood, „Maximum Efficiency of a Wind Turbine“, 2016 m., [žiūrėta 2023-10-13], prieiga per internetą: <https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4865&context=ujmm>
23. Yu-Ting Wu, Teh-Lu Liao, „Power output efficiency in large wind farms with different hub heights and configurations“, 2018 m., [žiūrėta 2023-10-20], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118310012>
24. Romutis Juodsnukis, „MAŽOSIOS VĖJO ELEKTRINĖS GALIOS KREIVĖS IR EFEKTYVUMO TYRIMAS“, 2015 m., [žiūrėta 2023-10-28], prieiga per internetą: <https://portalcris.vdu.lt/server/api/core/bitstreams/4a44a1cf-084c-4a71-9c97-e4bd80bf403b/content>
25. GIEDRIUS GECEVIČIUS, „VĖJO ELEKTRINIŲ GENERUOJAMŲ GALIŲ PROGNOZĖS TIKSLUMĄ LEMIANČIŲ VEIKSNIŲ TYRIMAS, GIEDRIUS GECEVIČIUS“, 2018 m., [žiūrėta 2023-11-10], prieiga per internetą: <https://www.lei.lt/wp-content/uploads/2023/03/disertacija-giedrius-gecevicius.pdf>
26. Ulas Karaagac, Ilhan Kocar, „STATCOM integration into a DFIG-based wind park for reactive power compensation and its impact on wind park high voltage ride-through capability“, 2021 m., [žiūrėta 2023-11-14], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621003497>

27. Fangzhou Zhao, „Comparative study of battery-based STATCOM in grid-following and grid-forming modes for stabilization of offshore wind power plant“, 2022 m., [žiūrėta 2023-11-28],  
prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622005892>
28. Europos žaliasis susitarimas, [žiūrėta 2023-12-01], prieiga per internetą: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
29. Didžiausias vėjo greitis Lietuvoje, [žiūrėta 2023-12-01], prieiga per internetą: <https://www.meteo.lt/klimatas/ekstremalus-reiskiniai/meteorologiniai-rekordai-lietuvoje/>
30. Luanna Maria Silva de Siqueira, Wei Peng, „Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review“, 2021 m., [žiūrėta 2023-12-09], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21000207>
31. O. Apata, D.T.O. Oyedokun, „An overview of control techniques for wind turbine systems“, 2020 m., [žiūrėta 2023-12-21], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227620303045>
32. Ruban Periyamayagam Antonysamy, Young Hoon Joo, „Power maximization and regulation of the super-large wind turbine system using generalized predictive approach-based torque and pitch control“, 2023 m., [žiūrėta 2024-01-21], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061523004738>
33. George Duval, „What’s the Difference Between Vertical and Horizontal Wind Turbines?“, 2024 m., [žiūrėta 2024-02-09], prieiga per internetą: <https://todayshomeowner.com/eco-friendly/guides/vertical-vs-horizontal-wind-turbines/>
34. P.A. Costa Rocha, J.W. Carneiro de Araujo, R.J. Pontes Lima ir kiti, „The effects of blade pitch angle on the performance of small-scale wind turbine in urban environments“, 2018 m., [žiūrėta 2024-02-23], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218301142>
35. Jaejoon Lee, Eunkuk Son, Byungho Hwang, „Blade pitch angle control for aerodynamic performance optimization of a wind farm“, 2013 m., [žiūrėta 2024-03-16], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112005186>
36. Abdelhamid Nabeel, Ahmed Lasheen, Abdel Latif Elshafei, „Fuzzy-based collective pitch control for wind turbine via deep reinforcement learning“, 2024 m., [žiūrėta 2024-04-01], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057824001319>
37. Mohammed Avvad, K.C. Vishwanath, Abdul Razak Kaladgi ir kiti, „Performance analysis of aerofoil blades at different pitch angles and wind speeds“, 2021 m., [žiūrėta 2024-04-18], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321037950>
38. Shangmao Ai, Jiayin Su, Wei Meng, Yuning Yan, „Integrated control of blade pitch and generator speed for floating wind turbines“, 2024 m., [žiūrėta 2024-05-11], prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824004177>