



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

Tautvydas Skipitis

**VĖJO JĖGAINĖS PARAMETRŲ MODELIAVIMAS MATLAB/SIMULINK
PROGRAMINIŲ PAKETU**

**MODELING WIND TURBINE PARAMETERS IN THE
MATLAB/SIMULINK PROGRAMMING ENVIRONMENT**

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H62002

Elektros energetikos technologijos specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Tautvydas Skipitis

**VĖJO JĖGAINĖS PARAMETRŲ MODELIAVIMAS MATLAB/SIMULINK
PROGRAMINIŲ PAKETU**

**MODELING WIND TURBINE PARAMETERS IN THE
MATLAB/SIMULINK PROGRAMMING ENVIRONMENT**

Baigiamasis magistro darbas

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H62002

Elektros energetikos technologijos specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

dr. Ričardas Masiulionis

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas dr. Aušra Žemienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2017

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa, valstybinis

kodas 621H62002

Elektros energetikos technologijos specializacija

Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei) **Tautvydui Skipičiui**

Baigiamojo darbo tema: Vėjo jėgainės parametrų modeliavimas MATLAB/Simulink programiniu paketu

patvirtinta 2016 m. lapkričio 9 d. dekanų potvarkiu Nr. 401el

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2017 m. gegužės 26 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Sudaryti mokslinės medžiagos ir technologinių pasiekimų vėjo energetikoje apžvalgą. Apžvelgti naudojamą vėjo jėgainių schemas, tipus, techninius sprendimus, naudojamus metodus modeliuojant vėjo jėgainių parametrus ir darbo režimus programiniu paketu MATLAB/Simulink.

Sudaryti didelės galios horizontalios ašies vėjo jėgainės modelį. Ištirti jėgainės darbo režimus keičiant tam tikrus vidinius parametrus bei modeliuojant skirtingas aplinkos sąlygas.

Atlikti gautų rezultatų analizę, pateikti išvadas ir pasiūlymus.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas **dr. Ričardas Masiulionis**

.....

(Parašas)

(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....

(Parašas)

Tautvydas Skipitis

(Vardas, pavardė)

.....

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Elektronikos fakultetas

Elektrotechnikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk.

Data-....-....

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Vėjo jėgainės parametrų modeliavimas MATLAB/Simulink programiniu paketu**

Autorius **Tautvydas Skipitis**

Vadovas dr. **Ričardas Masiulionis**

Kalba

☒ X

lietuvių

☐

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama galimybė modeliuoti vėjo jėgainės išorinius ir vidinius parametrus naudojant MATLAB/Simulink programinį paketą. Darbe siūloma naudoti Simulink išorinį plėtinį FAST, skirtą išplėsti modeliavimo galimybes. Darbe siekiama išnagrinėti pagrindinius jėgainės darbo režimus bei pasiūlyti optimalius techninius sprendimus. Darbe išnagrinėti ir pateikti vėjo jėgainių parametrai ir jų modeliavimo metodai, sudarytas ir pateiktas kompiuterinis didelės galios jėgainės modelis su modifikacijomis ir jų analize. Pateiktos išvados ir pasiūlymai.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros šaltinių ir duomenų analizė, vėjo jėgainės modelio sudarymas ir analizė, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas, priedai.

Darbo apimtis – 74 p. teksto be priedų, 50 iliustr., 16 lent., 31 bibliografinis šaltinis.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: FAST, MATLAB, modeliavimas, parametrai, Simulink, vėjo jėgainė

Vilnius Gediminas Technical University

Electronics faculty

Department of **Electrical Engineering**

ISBN ISSN

Copies No.

Date-....-....

Electrical Energetics Systems Engineering study programme master thesis.

Title: **Modeling Wind Turbine Parameters in the Matlab/Simulink Programming**

Environment

Author **Tautvydas Skipitis**

Academic supervisor **dr. Ričardas Masiulionis**

Thesis language

☐

Lithuanian

☒

Foreign (English)

Annotation

An opportunity to model wind turbine internal and external parameters using MATLAB/Simulink programming environment is analyzed. Simulink tool FAST is suggested for detailed analysis of wind turbine. The aim of the master thesis is to investigate the main wind turbine operating modes and suggest optimal technical solutions. Wind turbine parameters and modeling methods are analyzed and presented, power plant model with some modifications and their analysis for high power wind turbine is composed. Conclusions and suggestions are offered.

Structure: introduction, literature review, investigation, conclusions and suggestions, references, appendixes.

Thesis consist of: 74 p. text without appendixes, 50 pictures, 16 tables, 31 bibliographical entries.

Appendixes included

Keywords: FAST, MATLAB, modeling, parameters, *Simulink*, wind turbine

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

Elektros energetikos sistemų inžinerijos studijų programa,
valstybinis kodas 621H62002,

Tautvydas Skipitis, 20103159

EETfm-15 grupė

**BAIGIAMOJO DARBO
SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2017 m. gegužės 26 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis magistro darbas tema „Vėjo jėgainės parametru modeliavimas MATLAB/*Simulink* programiniu paketu“ patvirtintas 2016 m. lapkričio 9 d. dekanų potvarkiu Nr. 401el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: dr. Aušra Žemienė.

Mano darbo vadovas: dr. Ričardas Masiulionis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

TURINYS

SIMBOLIŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS.....	9
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	10
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	12
SANTRUMPOS.....	13
IVADAS.....	14
1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ IR DUOMENŲ ANALIZĖ.....	15
1.1. Vėjo energetikos istorija	15
1.2. Vėjo energijos ištekliai	15
1.3. Vėjo parametrai ir klasifikacija	17
1.4. Vėjo jėgainės veikimo principai	18
1.5. Vėjo jėgainių tipai	19
1.6. Vėjo jėgainių komponentai	21
1.7. Vėjaračiai	22
1.8. Vėjaračio sūkių reguliavimo metodai	23
1.8.1. Aktyvus vėjaračio sūkių reguliavimo metodas	23
1.8.2. Pasyvūs vėjaračio sūkių reguliavimo metodai	25
1.9 Elektros generatoriai	26
1.9.1. Sinchroniniai WRSG ir PMSG generatoriai	27
1.9.2. Asinchroninis SCIG generatorius	28
1.9.3. Asinchroniniai WRIG generatoriai	28
1.9.4. Kiti galimi generatorių tipai	29
1.9.5. Ekvivalentinė grandinė asinchroniniams generatoriams	29
1.10. Įtampų keitikliai	31
1.11. Transformatoriai	32
1.12. Vėjo jėgainės efektyvumo ir galios parametrai	32
1.13. Maksimalios galios taško sekimo metodai	34
1.14. Pavarų mechanizmai	35
1.15. MATLAB/Simulink modeliavimo aplinka.....	35
1.16. Simulink modeliavimo aplinkos pritaikymo galimybės tiriant vėjo jėgaines	36
1.16.1. WTIG modeliavimo blokas	36
1.16.2. WTDFIG modeliavimo blokas	39
1.16.3. Keičiamo vėjaračio menčių žingsnio modeliavimo blokas	39
1.16.4. Elektrotechnikos modeliavimo biblioteka SimPowerSystems	41

1.17. FAST modeliavimo įrankis MATLAB/ <i>Simulink</i> aplinkoje.....	41
1.17.1. Modeliavimo įrankio FAST principai ir metodika.....	42
1.17.2. Aerodinaminiai nustatymai	43
1.17.3. Vėjo parametrų nustatymai	44
1.17.4. Vėjaračio mentės aerodinaminių profilių nustatymai	44
1.17.5. Generatorių tipai ir jų modeliavimo principai.....	45
2. VĖJO JĖGAINĖS MODELIO SUDARYMAS IR ANALIZĖ.....	48
2.1. Vėjo jėgainės modelio sudarymo struktūra	48
2.2. Aerodinaminė dalis	49
2.3. Mechaninė dalis	49
2.4. Generatoriaus modelis	50
2.4.1. SIG generatorius.....	51
2.4.2. <i>Simulink</i> asinchroninės mašinos modelis	52
2.4.3. FAST asinchroninės mašinos modelis	54
2.5. Bendras modelis.....	56
2.6. Darbo režimai, išvestis ir rezultatai	56
2.6.1. Jėgainės paleidimas	57
2.6.2. Apkrovos prijungimas	61
2.6.3. Apkrovos režimai	62
2.6.4. Apkrovos atjungimas ir jėgainės sustabdymas.....	64
2.6.5. Gedimų atvejų modeliavimas.....	65
2.7. Jėgainės modifikacijos	67
IŠVADOS	70
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	72
PRIEDAI	75
A priedas	75
B priedas.....	77
C priedas.....	77

SIMBOLIŲ AIŠKINAMASIS ŽODYNAS

β – vėjaračio menčių žingsnio kampas [laipsn.];

ε – elektrovara [V];

λ – santykinis dydis, nusakantis menčių galų greičio ir vėjo greičio santykį TSR, (-);

ρ – oro tankis [kg/m^3];

ω – kampinis dažnis [rad/s];

v – vėjo greitis [m/s];

f – dažnis [Hz];

B – magnetinė indukcija [T];

C – kondensatoriaus talpa [F];

C_D – pasipriešinimo koeficientas;

C_L – keliamosios jėgos koeficientas;

C_p – galios koeficientas;

I_c – kondensatoriaus srovė [A];

P – galia [W];

Q – reaktyvioji galia [VAR];

S – pilnutinė galia [VA];

T_m – sukimo momentas [Nm];

X_c – kondensatoriaus varža [Ω].

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Vėjo energijos ištekliai pasaulyje. Vidutinis vėjo greitis 80 metrų aukštyje	16
2 pav. Vidutinis metinis vėjo greitis (m/s) ir vyraujančios vėjo kryptys Lietuvos teritorijoje	16
3 pav. Vėjo greičio priklausomybė nuo aukščio virš žemės paviršiaus	17
4 pav. Vėjo jėgainės principinė schema	19
5 pav. Vertikalios (a) ir horizontalios (b) ašies vėjo jėgainių schemas.....	20
6 pav. Pagrindiniai vėjo jėgainės komponentai.....	22
7 pav. Vėjo jėgainėse naudojami vėjaračio aerodinaminiai profiliai	22
8 pav. Žingsnio kampo reguliavimo schema.....	24
9 pav. Menčių atakos kampo priklausomybė nuo oro srauto dedamosios ir žingsnio	24
10 pav. Aktyvaus ir pasyvaus sūkių reguliavimo metodų galios kreivių palyginimas	25
11 pav. Vėjo jėgainėse naudojamų elektros generatorių klasifikavimo schema.....	26
12 pav. Thevenin vienos fazės ekvivalentinės grandinės schema.....	30
13 pav. Įvairių vėjaračių galios koeficiento priklausomybė nuo TSR	33
14 pav. Momento priklausomybė nuo sūkių prie skirtingų apkrovų.....	34
15 pav. MATLAB ir <i>Simulink</i> kompiuterinės modeliavimo aplinkos	35
16 pav. Vėjo turbinų blokai <i>Simulink</i> programinėje aplinkoje.....	36
17 pav. Vėjo turbinos asinchroninio generatoriaus WTIG principinė schema	37
18 pav. Vėjaračio menčių žingsnio valdymo principinė schema	37
19 pav. Dvigubo maitinimo vėjo turbinos elektros generatoriaus (WTDFIG) principinė schema	39
20 pav. Keičiamo turbinos menčių žingsnio modeliavimo blokas (<i>Wind Turbine</i>)	39
21 pav. Pagrindinis <i>SimPowerSystems</i> galios nustatymų blokas <i>powergui</i>	41
22 pav. <i>Simulink</i> ir FAST aplinkų vėjo jėgainės modeliavimo parametrų apimties ribos	42
23 pav. Pagrindiniai įrankio FAST blokai, pirminio modelio branduolys.....	43
24 pav. Tipas 1: Fiksuoto greičio vėjo jėgainės schema	45
25 pav. Tipas 2: Kintamo greičio vėjo jėgainės schema	46
26 pav. Tipas 3: Dvigubo maitinimo asinchroninio generatoriaus vėjo jėgainės schema	46
27 pav. Tipas 4: Pilnai konvertuojamo generatoriaus vėjo jėgainės schema	47
28 pav. <i>Simple Induction Generator</i> elektros generatoriaus modelio schema.....	52
29 pav. SIG generatoriaus modelio momento priklausomybė nuo generatoriaus sūkių.....	52
30 pav. Asinchroninės mašinos galios parametrų modeliavimo schema	53
31 pav. Asinchroninės mašinos modelio momento priklausomybė nuo generatoriaus sūkių.....	54
32 pav. Asinchroninės mašinos modelio schema, pritaikyta asinchroninio generatoriaus skaičiavimams atlikti.....	55

33 pav. Asinchroninės mašinos modelio momento priklausomybė nuo generatoriaus sūkių.....	55
34 pav. Bendra jėgainės modelio schema <i>Simulink</i> aplinkoje	56
35 pav. Nulinio atakos kampo skaičiavimo algoritmas (<i>Zero attack calculator</i> blokas pagrindiniame modelyje).....	57
36 pav. Nustatyto fiksuoto atakos kampo skaičiavimo algoritmas (<i>Pitch controller start (REF ATT)</i> blokas pagrindiniame modelyje)	57
37 pav. Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių charakteristikos prie skirtingų fiksuotų atakos kampų (laipsniais) esant 12 m/s vėjo greičiui	58
38 pav. Momento charakteristikos vėjaračio įsisukimo metu prie skirtingų fiksuotų atakos kampų (laipsniais) esant 12 m/s vėjo greičiui	58
39 pav. Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių charakteristikos prie skirtingų fiksuotų atakos kampų esant 15 m/s vėjo greičiui	60
40 pav. Momento charakteristikos vėjaračio įsisukimo metu prie skirtingų fiksuotų atakos kampų esant 15 m/s vėjo greičiui.....	60
41 pav. Apkrovos prijungimo schema naudojant galios signalų perjungimą	61
42 pav. Apkrovos prijungimo charakteristika nustatytoms sąlygoms (vėjo greitis 18 m/s)	62
43 pav. Žingsnio kampo kontrolės blokas (<i>Pitch controller (REF PWR)</i> blokas pagrindiniame modelyje).....	62
44 pav. Jėgainės darbo režimas esant tolygiai kintamam vėjo greičiui	63
45 pav. Jėgainės darbo režimas esant šuoliškai kintamam vėjo greičiui	64
46 pav. Apkrovos atjungimo ir rotoriaus sustabdymo modelio rezultatai esant 18 m/s vėjo greičiui	65
47 pav. Jėgainės charakteristikos dingus apkrovai ir užstrigus menčių žingsnio valdymui esant 15 m/s vėjo greičiui	66
48 pav. Jėgainės menčių galų greičio charakteristikos dingus apkrovai ir užstrigus menčių žingsnio valdymui esant skirtingiems menčių žingsnio kampams	67
49 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo vėjo greičio su skirtingais TSR nominaliam vėjo greičiui.....	68
50 pav. Galios priklausomybė nuo vėjo greičio nustatytiems TSR (nominaliam vėjo greičiui)	69

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Vėjo klasifikavimas pagal Boforto skalę.....	17
2 lentelė. Vėjo klasifikacija pagal IEC standartą	18
3 lentelė. „Vestas” vėjo jėgainių modeliai pagal IEC vėjo klases	18
4 lentelė. Ekvivalentinės schemos parametrų reikšmės	30
5 lentelė. <i>Simulink</i> bloko WTIG išėjimo signalų reikšmės	38
6 lentelė. Pagrindiniai aerodinaminiai modelio nustatymai	43
7 lentelė. Vėjo charakteristikų protokolo pavyzdys	44
8 lentelė. Vėjo jėgainės V66/1650 pagrindiniai duomenys.....	49
9 lentelė. Mechaninio perdavimo nustatymai FAST įvesties protokole V66.fst	50
10 lentelė. Masės ir inercijos nustatymai FAST įvesties protokole V66.fst	50
11 lentelė. SIG generatoriaus modelio pagrindiniai parametrai FAST įvesties protokole V66.fst....	51
12 lentelė. Asinchroninės mašinos vidiniai parametrai.....	53
13 lentelė. Asinchroninės mašinos vidiniai parametrai pagal ekvivalentinę schemą	54
14 lentelė Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių laiko ir maksimalaus momento charakteristikos prie skirtingų atakos kampų esant 12 m/s vėjo greičiui	59
15 lentelė. Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių laiko ir maksimalaus momento charakteristikos prie skirtingų atakos kampų esant 15 m/s vėjo greičiui	59
16 lentelė. Reikiami dydžiai galios koeficiento skaičiavimams ir simuliacijos kritiniai taškai.....	68

SANTRUMPOS

AC – kintamoji srovė (angl. *Alternating current*)
DC – nuolatinė srovė (angl. *Direct current*)
DFIG – dvigubo maitinimo asinchroninis generatorius (angl. *doubly-fed induction generator*)
FAST – nuovargio, aerodinamikos, struktūrų ir turbulencijos modelis (angl. *Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence model*)
HAWT – horizontalios ašies vėjo turbina (angl. *Horizontal axis wind turbine*)
HSS – aukštų sūkių velenas (angl. *High-speed shaft*)
HVG – aukštos įtampos generatorius (angl. *High-Voltage generator*)
IEC – Tarptautinė Elektrotechnikos Komisija (angl. *International Electrotechnical Commission*)
IGBT – izoliuotos užtūros dvipolis tranzistorius (angl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*)
LSS – žemų sūkių velenas (angl. *Low-speed shaft*)
MATLAB – matricų laboratorijos programinė įranga (angl. *Matrix Laboratory*)
MPPT – maksimalios galios taško sekimas (angl. *Maximum power point tracking*)
NREL – Tarptautinė atsinaujinančios energijos laboratorija (angl. *National Renewable Energy Laboratory*)
ODE – tiesinės diferencialinės lygtys (angl. *Ordinary differential equations*)
OSIG – kintamo greičio asinchroninis generatorius (angl. *Opt-Slip induction generator*)
PID – proporcinis-integralinis-diferencialinis reguliatorius (angl. *Proportional–integral–derivative controller*)
PMSG – nuolatinių magnetų generatorius (angl. *Permanent magnet generator*)
PU – nominali vertė prilyginta vienetui (angl. *Per unit*)
RMS – vidutinė kvadratinė šaknis (angl. *Root mean square*)
RPM – apsisukimai per minutę (angl. *Revolutions per minute*)
SCIG – narvelinis asinchroninis generatorius (angl. *Squirrel cage induction generator*)
SIG – paprastasis asinchroninis generatorius (angl. *Simple induction generator*)
SRG – jungiklinis reaktyvūs generatorius (angl. *Switch reluctance generator*)
STATCOM – statinis sinchroninis kompensatorius (angl. *Static synchronous compensator*)
SVC – statinis reaktyviosios galios kompensatorius (angl. *Static VAR compensator*)
TSR – menčių galų ir vėjo greičių santykis (angl. *Tip speed ratio*)
TFG – skersinio srauto generatorius (angl. *Transverse flux generator*)
WRIG – asinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi (angl. *Wound-rotor induction generator*)
WRSG – sinchroninis generatorius su faziniu rotoriumi (angl. *Wound-rotor synchronous generator*)
WTIG – vėjo jėgainės asinchroninis generatorius (angl. *Wind turbine induction generator*)

IVADAS

Energetika yra vienas iš svarbiausių sektorių, lemiančių pramonės pažangą, ekonomikos augimą bei gyvenimo kokybę. Tobulėjant pasauliui auga ir suvartojamos energijos poreikis. Šiuo metu didžioji sukuriamos energijos dalis yra gaunama deginant iškastinį kurą, todėl nerimą kelia didėjanti aplinkos tarša, klimato pokyčiai bei kitos ekologinės problemos (masinis miškų kirtimas bei radiacinė tarša). Kadangi iškastinio kuro kiekis yra ribotas ir jo atsargos nuolat senka, atsiranda būtinybė ieškoti alternatyvių energijos gavimo šaltinių.

Saulės, vėjo, vandens bei geoterminės energijos šaltiniai yra neišsenkantys ir atsinaujinantys, jie yra perspektyviausi sprendžiant su pasaulio energetika susijusias problemas. Minėtų šaltinių panaudojimas taip pat nesukelia didelių ekologinių problemų bei klimato pokyčių. Būsimi mokslo atradimai bei technologijų pasiekimai ateityje gali leisti įvaldyti termobranduolinę reakciją, kaip švarų ir neišsenkanti energijos šaltinį, tačiau šiuo metu tai dar yra neįmanoma.

Vėjo energetika yra viena iš perspektyviausių ir sparčiai tobulėja. Naujoms vėjo jėgainėms kurti pritaikomos naujausios technologijos, mokslo bei pramonės pasiekimai. Šiame amžiuje sparčiai ištobulintos kompiuterinės technologijos leidžia atlikti pakankamai tikslius bei sudėtingus skaičiavimus, modeliavimus, simuliacijas bei leidžia suprojektuoti ir patikrinti sudėtingas valdymo sistemas. Vėjo jėgainės projektavimą, gamybą bei panaudojimą lemia daug išorinių bei vidinių veiksnių, kuriuos sudėtinga numatyti bei įvertinti, tačiau esminės sistemos charakteristikas galima sumodeliuoti naudojant kompiuterines programas bei atlikti analizę, kuri padėtų efektyviau suprojektuoti vėjo jėgainę.

Projektuojant ir statant vėjo jėgaines bei jungiant į skirstomuosius tinklus, reikalingi sudėtingi skaičiavimai, kurie leistų įvertinti būsimų jėgainių darbo režimus, generuojamą galią, netolygumus, aplinkos poveikį, geografinės vietovės įtaką, energetinės infrastruktūros galimybes bei ekonominę naudą. Šis įvertinimas ir sistemos modeliavimas aktualus tiek projektuojant vėjo jėgaines, tiek jų sistemas integruojant į skirstomuosius tinklus.

Daugelis pasaulyje naudojamų vėjo jėgainių buvo kuriamos, kai dar pakankamai nebuvo ištobulintos kompiuterinės projektavimo programos. Vėjo jėgainių parametrų bei darbo režimų ištobulinimas leistų paspartinti vėjo energetikos pažangą.

Šio baigiamojo magistro darbo **tikslas** yra surinkti, susisteminti ir pateikti pagrindinius vėjo jėgainių veikimo principus, inžinerinius aspektus, parametrų modeliavimo galimybes bei naudojant MATLAB/Simulink programinį paketą sudaryti didelės galios vėjo jėgainės modelį; taip pat ištirti šios jėgainės darbo režimus, pateikti išvadas, pasiūlymus ir rekomendacijas.

1. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ IR DUOMENŲ ANALIZĖ

1.1. Vėjo energetikos istorija

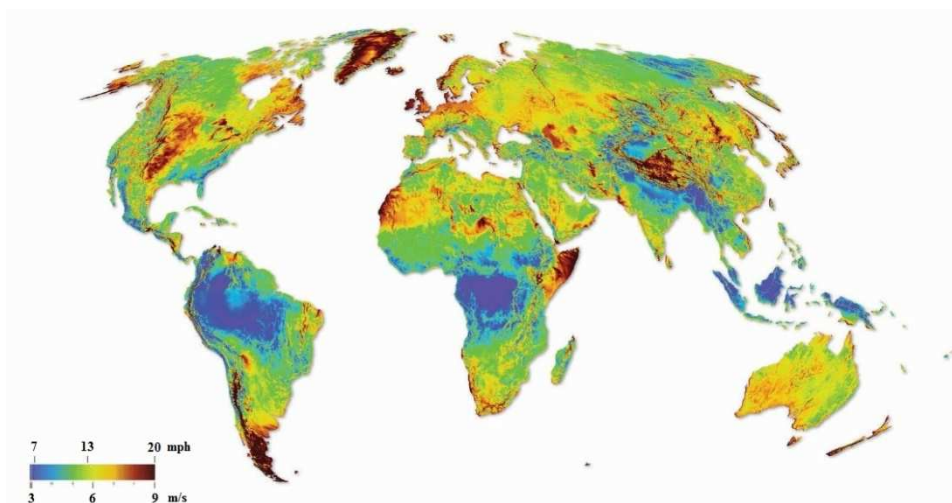
Vėjo energiją žmogus stengėsi įvaldyti nuo senų laikų – laivyboje, žemės ūkyje, pramonėje. Nėra istorinių duomenų, kur buvo pradėti statyti pirmieji vėjo malūnai pasaulyje, tačiau yra žinoma, kad Lietuvos pajūrio krašte jie buvo naudojami nuo XIV amžiaus, o XIX a. vėjo malūnai buvo paplitę visame regione. 1914–1921 metų kartografinės medžiagos duomenimis, Lietuvoje buvo apie 1000 vėjo malūnų, didžioji dalis – Klaipėdos krašte. Šie vėjo malūnai, kaip ir vandens malūnai, rotorius sukimo judesį tiesiogiai naudojo įvairioms mašinoms ir įrenginiams įkrauti – girmoms, valcams, lentpjūvėms, keltuvams, presams, kalvėms ir pan (Andrejevas 1982).

Lietuvos vėjo elektrinių asociacijos duomenimis (LVEA. Vėjo elektrinių parkai) pirmoji Lietuvoje vėjo jėgainė 1991 m. buvo statoma Prienų rajone. Jėgainės elektros galia turėjo siekti 60 kW, tačiau dėl lėšų stokos ir techninių nesklandumų nebuvo iki galo baigta. Vėliau 1993 m. tokio pat galingumo vėjo jėgainė buvo pastatyta ir išbandyta Kaune. Pirmoji pramoninė vėjo jėgainė buvo pastatyta tik 2002 m. Skuode. Pirmoji parodomoji vėjo jėgainė pradėjo veikti 2004 m. Kretingos rajone Vydmantų miestelyje. Šios jėgainės galia siekė 600 kW ir per mažiau nei metus pagamino 1,2 MWh elektros energijos. Pirmasis vėjo jėgainių parkas buvo pastatytas tik 2006 m. taip pat Kretingos raj.. Šio parko galingumas siekė 16 MW ir per metus pagamindavo iki 44 mln. kWh elektros energijos. Parke veikė šešios Danijos kompanijos „Vestas“ vėjo jėgainės „V100 2,75-3“. Vėliau buvo pradėti statyti ir kiti vėjo jėgainių parkai Vakarų Lietuvoje. 2010 m. pradėtas eksploatuoti 17 vėjo jėgainių parkas, kurio bendra galia siekia 34 MW. Per metus parkas pagamina 86 mln. kWh elektros energijos. Parke naudojamos vokiečių „Enercon E-82“ modelio vėjo jėgainės.

Po pirmojo 2016 m. pusmečio pasaulyje visų veikiančių vėjo jėgainių pagamintos energijos bendra galia pasiekė 456 GW. Iš jų 21,714 GW buvo instaliuota per pastaruosius šešis mėnesius. Metinis vėjo energijos galios augimas siekia 16 % per metus. Šiuo metu vėjo energetika gali patenkinti iki 5 % viso pasaulio elektros energijos poreikio. Vėjo energetika išlieka viena perspektyviausių ir pažangiausių elektros energetikos pramonės šakų pasaulyje (WWEA 2016).

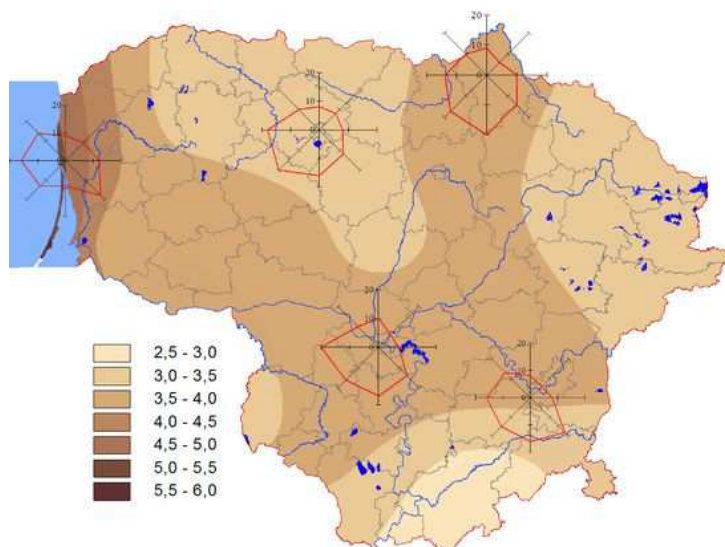
1.2. Vėjo energijos ištekliai

Vėjo energija – tai saulės energijos forma. Oro judėjimas atsiranda dėl meteorologinių reiškinių – saulei netolygiai šildant skirtingas Žemės vietas. Įvairiuose pasaulio regionuose vyrauja skirtingos vėjo srovės. Dėl Žemės sukimosi apie savo ašį didelę įtaką vėjo srovėms daro Corioli pagreičio reiškinys (Dronkers 2017). Vidutiniai vėjo greičiai pasaulyje pavaizduoti 1 paveiksle.



1 pav. Vėjo energijos ištekliai pasaulyje. Vidutinis vėjo greitis 80 m aukštyje (Vaisala Corp 2015)

Remiantis Lietuvos energetikos instituto ir meteorologinių stočių vėjo greičio matavimo rezultatais matyti, kad Lietuvoje vidutinis metinis vėjo greitis yra 4–6,5 m/s, pajūrio ruože 10 metrų ir didesniame aukštyje siekia 5–6 m/s. Pajūrio ruožas iki 10 km yra tinkamas statyti didelės galios (per 100 kW) elektros jėgaines. Taip pat didėjant aukščiui, didėja ir vėjo greitis. Rytinėje Lietuvos dalyje vidutinis vėjo greitis siekia tik 3–4,5 m/s, todėl šios vietovės tinkamos mažos galios (per 10 kW) vėjo jėgainėms, skirtoms vietiniams energijos poreikiams tenkinti.

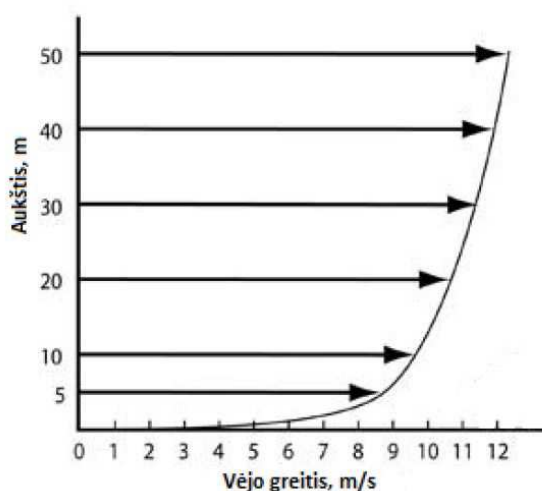


2 pav. Vidutinis metinis vėjo greitis (m/s) ir vyraujančios vėjo kryptys (Lietuvos meteorologijos tarnybos duomenys. Klimato norma, 1961-1990 m.)

Lietuvos teritorijoje didžiausias užfiksuotas vėjo greitis yra apie 40 m/s. Didžiausias vėjo greitis Lietuvos pajūryje svyruoja nuo 12 m/s iki 26 m/s, vyrauja vakarų, šiaurės vakarų bei pietvakarių krypties vėjai. Vidutinio vėjo greičio ir vyraujančios krypties žemėlapis pateiktas 2 paveiksle.

1.3. Vėjo parametrai ir klasifikacija

Aukštuose atmosferos sluoksniuose vėjas yra homogeniškas, tačiau iki maždaug kilometro aukščio yra stipriai veikiamas Žemės paviršiaus vietinių sąlygų. Įvairios kliūtys, kliūčių oro pralaidumas, reljefas, pastatai, vandens telkiniai ir kiti veiksniai mažina vėjo greitį bei sukelia turbulenciją, kuri stipriai pasireiškia audros metu. Didėjant aukščiui Žemės paviršiaus įtaka oro srautui mažėja. 3 paveiksle pavaizduota vėjo greičio priklausomybė nuo aukščio.



3 pav. Vėjo greičio priklausomybė nuo aukščio virš žemės paviršiaus (Kytra 2006)

Boforto skalė – empirinė vėjo intensyvumo skalė, sukurta 1805 m. airių mokslininko admiralo sero *Franko Boforto* (*Francis Beaufort*). Vėjo klasifikavimas pagal Boforto skalę skirstomas į trylika vėjo stiprumų ir pateiktas 1 lentelėje (Huler 2004).

1 lentelė. Vėjo klasifikavimas pagal Boforto skalę (sudaryta autoriaus remiantis Huler 2004)

Boforto balai	Vėjo greitis, m/s	Aprašymas	Sąlygos sausumoje
0	0–0,2	Tyka (štilis)	Ramu. Dūmai kyla vertikalčiai.
1	0,3–1,5	Tylus	Vėjo judėjimas pastebimas dūmuose.
2	1,6–3,3	Lengvas	Vėjas juntamas neapdengtu odos paviršiumi.
3	3,4–5,4	Silpnas	Lapai ir mažos šakelės nuolat juda.
4	5,5–7,9	Vidutinis	Dulkės ir popierius pakeliami. Pradedama judėti mažos šakos.
5	8,0–10,7	Gaivus	Maži medžiai siūbuoja.
6	10,8–13,8	Stiprus	Juda didelės šakos. Girdimas laidų švilpimas.
7	13,9–17,1	Beveik audra	Visi medžiai juda. Reikia pastangų eiti prieš vėją.
8	17,2–20,7	Audra	Lūžta šakelės. Mašinos kelyje sunku vairuoti.
9	20,8–24,4	Stipri audra	Lengvi statinių pažeidimai.
10	24,5–28,4	Štormas	Medžiai išraunami su šaknimis. Žymūs statinių pažeidimai.
11	28,5–32,6	Stiprus štormas	Išplitę statinių pažeidimai.
12	32,7–40,8	Uraganas	Žymūs ir paplitę pastatų pažeidimai.

Vietovėse, kur vyksta tropiniai ciklonai, naudojama išplėsta Boforto skalė. Pagal šią skalę vėjo stiprumas apskaičiuojamas naudojant empirinę formulę:

$$v = 0.836 \cdot B^{3/2}, \quad (1)$$

kur v – vėjo greitis [m/s]; B – Boforto skalės balas.

Vėjo klasifikavimą, skirtą vėjo jėgainėms projektuoti, nustato Tarptautinės elektrotechnikos komisijos (IEC) nustatytas standartas IEC 61400. Šis standartas nustato reikalavimus vėjo jėgainėms projektuoti ir gaminti. Išskirtos septynios vėjo klasės, kurios pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Vėjo klasifikacija pagal IEC standartą (IEC 61400-1)

Vėjo klasė/turbulencija	Vidutinis metinis vėjo greitis, m/s	Didžiausias galimas vėjo gūsis per 50 metų, m/s (mph)
Ia Didelis vėjas/didelė turbulencija 18 %	10	70 (156)
Ib Didelis vėjas/maža turbulencija 16 %	10	70 (156)
Ila Vidutinis vėjas/didelė turbulencija 18 %	8,5	59,5 (133)
Ilb Vidutinis vėjas/maža turbulencija 16 %	8,5	59,5 (133)
IIla Silpnas vėjas/didelė turbulencija 18 %	7,5	52,5 (117)
IIlb Silpnas vėjas/maža turbulencija 16 %	7,5	52,5 (117)
IV	6	42,0 (94)

3 lentelė. Vestas vėjo jėgainių modeliai, atitinkantis IEC vėjo klases (Vestas annual report, 2016)

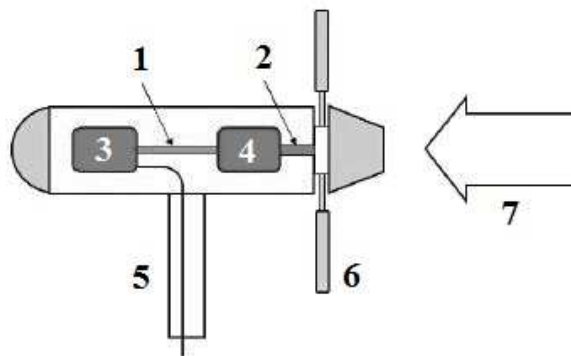
Jėgainės modelis	IEC-I	IEC-II	IEC-III
V52/0,85 MW	x	x	
V60/0,85 MW		x	x
V82/1,65 MW		x	x
V80/2,0 MW	x		
V90/1,8 MW		x	
V90/2,0 MW			x
V100/1,8 MW			x
V90/3,0 MW	x	x	
V112/3,0 MW		x	x

Skirtingoms vėjo klasėms yra parenkamos atitinkamus parametrus turinčios jėgainės. Danų kompanijos „Vestas“ antžeminių ir jūroje eksploatuojamų vėjo jėgainių modelių atitikimas IEC vėjo klasėms pateiktas 3 lentelėje.

1.4. Vėjo jėgainės veikimo principai

Vėjo jėgainės veikimas pagrįstas aerodinaminiais dėsniais, kurie plačiausiai pritaikomi aviacijos inžinerijoje. Aptekėdamas sparno profilį oro srautas sukuria jėgą, kuri priverčia turbinos

rotorių suktis. Ši jėga atsiranda dėl skirtingo slėgio vektorių, veikiančių aptekantį profilį bei atakos kampo. Skirtingi sparno profiliai ir vėjaračio mentės geometrijos sąlygoja skirtingas jėgas, veikiančias turbinos mentis. Aerodinaminės jėgos spaudžia mentis ir turbina pradeda suktis, taip sukurdamą ašinio veleno sukimo judesį. Toliau sukimo judesys, priklausomai nuo jėgainės mechaninės schemos, gali būti perduodamas į elektrą gaminantį generatorių tiesiogiai arba per mechaninę greičių pavarą. Generatoriuje sugeneruota elektros energija toliau, priklausomai nuo jėgainės, transformuojama ir jungiama prie apkrovos – tiekama vartotojui (į elektros tinklą, tarpinę pastotę ar konkretų techninį įrenginį). Principinė vėjo jėgainės veikimo schema pavaizduota 4 paveiksle (Karabanov 2014).



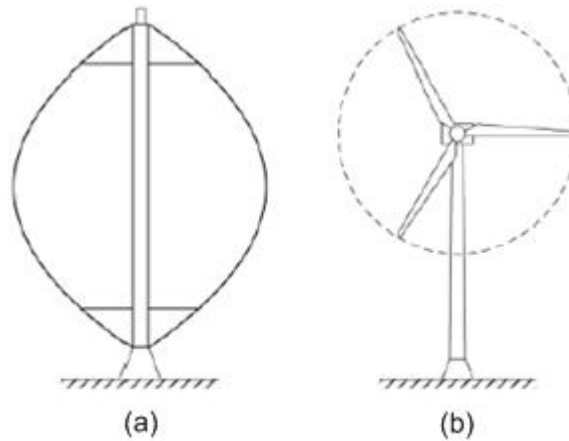
4 pav. Vėjo jėgainės principinė schema: 1 – antrinis (aukšto greičio) velenas, 2 – pirminis (žemo greičio) velenas, 3 – elektros generatorius, 4 – mechaninė greičių pavarą, 5 – elektros energijos linija, 6 – vėjaratis (oro sraigtas), 7 – vėjo srauto kryptis (Karabanov 2014)

Vėjo jėgainės skirstomos bei klasifikuojamos pagal daugelį kriterijų: aukštį, galią, vėjaračio naudingąjį plotą, rotoriaus ašies padėtį, naudojamų generatorių tipus, perdavimo pavaros naudojimą, galios kontrolės metodus, nuolatinį arba kintamą greitį, keičiamą menčių žingsnį, prisitaikymą prie vėjo greičio ir krypties, paskirtį, vėjo klasę bei sujungimo metodus. Vėjo energetikoje vienas iš svarbiausių uždavinių yra kuo efektyvesnis energijos panaudojimas, t. y. per kuo trumpesnę laiką tarpą sukurti kuo daugiau elektros energijos. Vienas plačiausiai taikomų metodų energetikoje – maksimalios galios taško sekimo metodas (MPPT), kuris šiuo atveju taikomas vėjo jėgainės kontrolei reaguojant į įvairius veiksnius, pavyzdžiui, vėjo greitis ar elektros tinklo apkrova (Ganjefard 2014).

1.5. Vėjo jėgainių tipai

Pagrindiniai vėjo jėgainių tipai skirstomi pagal vėjaračio orientaciją erdvėje – į horizontalios (HAWT) ir vertikalios (VAWT) ašies (5 paveikslas). Labiausiai paplitusios horizontalios ašies vėjo jėgainės dėl greitaeigiškumo, mažo svorio, efektyvumo bei ekonominio naudingumo. Šio tipo vėjo

jėgainės veikimo principas pagrįstas oro sraigto sukimu vėjui pučiant statmenai į vėjaratį. Oro srautas įsuka rotoriaus veleną, kuriuo sukimo judesys perduodamas į generatorių per mechaninę pavarą arba tiesiogiai. Generatorius gamina elektros energiją, kuri toliau transformuojama ir paskirstoma vartotojams (Howell 2010).



5 pav. Vertikalios (a) ir horizontalios (b) ašies vėjo jėgainių schemos

Horizontalios ašies vėjo jėgainės privalumai ir trūkumai:

Privalumai:

- Greitai įdiegti;
- Nedidelio svorio;
- Mažesnės instaliavimo sąnaudos išgaunamai galiai;
- Galimybė keisti sraigto menčių žingsnį.

Trūkumai:

- Sudėtingas didelių gabaritų komponentų transportavimas;
- Reikalingas vėjaračio pasukimo mechanizmas į vėjo srauto kryptį;
- Sudėtingas statybų procesas (reikalingi aukšti kranai);
- Dideli stiprumo ir atsparumo klimato sąlygoms reikalavimai;
- Kenkia kraštovaizdžiui, sukelia šviesos atspindžius, pavojus paukščiams.

Vertikalios ašies vėjo jėgainės dar skirstomos į Savonijaus rotorius ir ortogonalinius vėjaratus. Savonijaus rotoriaus tipo vėjo jėgainės yra panašios į vėjo greičio matavimo prietaisus anemometrus. Ortogonalinis vėjaratis turi mentis su aerodinaminiais profiliais (Nuaimi 2005).

Vertikaliuosios vėjo jėgainės privalumai ir trūkumai:

Privalumai:

- Efektyvus veikimas esant mažam ir dideliame vėjo greičiui;
- Paprasta ir ilgaamžė konstrukcija;
- Mažas skleidžiamas triukšmas;
- Neaukšta konstrukcija;
- Nereikalinga orientacija į vėjo kryptį.

Trūkumai:

- Neefektyvi energijos gavyba;
- Ant žemės pastatytą jėgainę veikia mažesnio greičio vėjas, nei didesniame aukštyje;
- Lėtaeigiškumas.

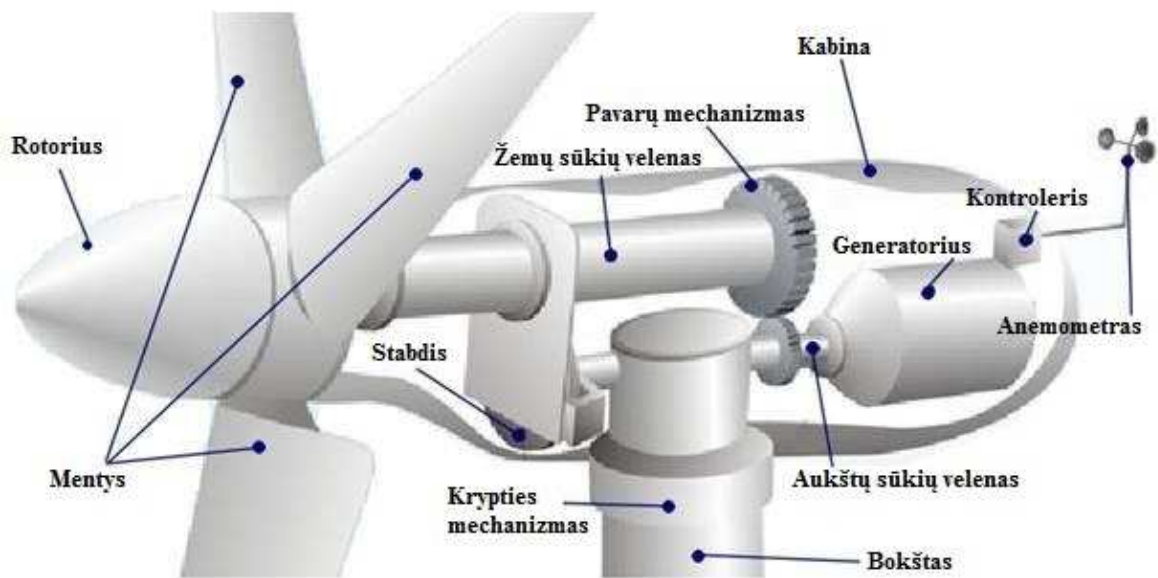
1.6. Vėjo jėgainių komponentai

Pagrindiniai komponentai, sudarantys vėjo jėgainės sistemą yra sparnuotės dalis (vėjaratis), mechaninė greičių pavara (ne visada naudojama), stabdis bei generatorius. Toliau seka kiti elektros įrenginiai pritaikantys elektros energiją vartotojams (transformatoriai, keitikliai, akumulatoriai, integravimo į tinklą, paskirstymo sistemos ir pan.)

Didelės galios vėjo jėgainėse naudojami kintamos srovės tiek sinchroniniai tiek asinchroniniai generatoriai. Mažos galios jėgainėse naudojami ir nuolatinės srovės generatoriai, o sinchroniniai – retai. Asinchroniniai generatoriai dirba efektyviai tik prie didelių apkrovų. Dažnai vėjo jėgainės gaminamos su dviem skirtingais generatoriais, pritaikytais mažai ir didelei galiai, kurie perjungiami priklausomai nuo vėjo greičio. Tokiose jėgainėse vėjaračio sūkliai yra pakankamai maži, todėl reikalinga greičių pavara, padidinanti sukimosi greitį nuo 16–18 iki 1200–1500 sūkių per minutę. Tačiau tam tikruose vėjo jėgainių tipuose pavarų mechanizmai nėra naudojami ir pagrindinis velenas jungiamas tiesiai į generatorių.

Paleidžiant vėjo jėgainę, sustabdant bei prijungiant/atjungiant apkrovą sukimo momentas staigiai padidėja arba sumažėja, todėl siekiant sušvelninti pereinamuosius procesus naudojami spyruokliniai slopintuvai, kurie jungia vėjaračio rotorius veleną su pavarų mechanizmu (Ragheb 2014).

Pagrindiniai vėjo jėgainės komponentai pavaizduoti 6 paveiksle.

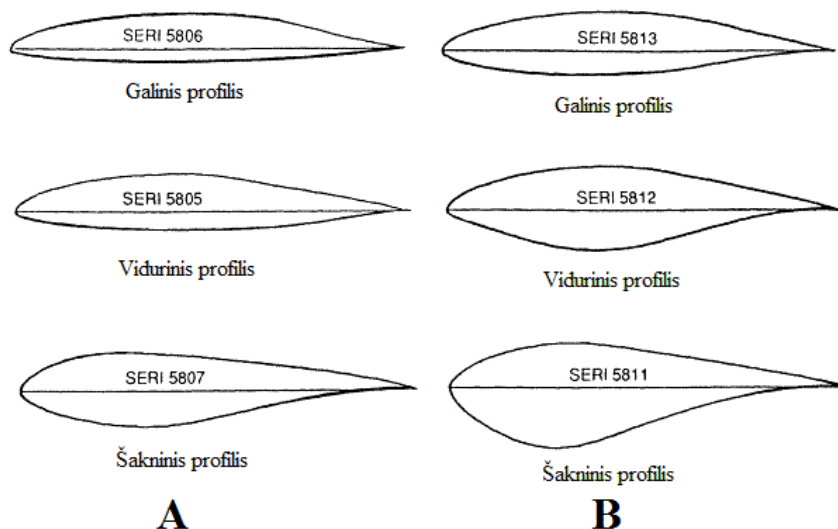


6 pav. Pagrindiniai vėjo jėgainės komponentai (Ragheb 2014)

Skirtingo tipo vėjo jėgainėse gali būti naudojami ir kiti komponentai.

1.7. Vėjaračiai

Vėjo jėgainių vėjaračių mentys sudarytos iš aerodinaminių profilių, kurie panašūs į lėktuvų sparnų arba propelerių profilius. Viena mentis paprastai būna sudaryta iš kelių skirtingų profilių, kurie tolygiai pereina vienas į kitą nuo mentės šakninės dalies iki galo bei būna pasukti atitinkamais kampais – šakninėje dalyje didesniu, galuose – lygiu, o kartais ir neigiamu. Keletas aerodinaminių profilių pavaizduoti 7 paveiksle (Miley 1982).



7 pav. Vėjo jėgainėse naudojami vėjaračio aerodinaminiai profiliai:

A – greitaeigės mentės profiliai, B – lėtaeigės mentės profiliai (Miley 1982)

Pagrindiniai aerodinaminiai profiliai, naudojami vėjo jėgainių mentims:

- NACA 63-4xx ir NACA 63-6xx serijos;
- NACA 64-4xx.

Specializuoti menčių profiliai:

- S8xx serijos (NREL, Jungtinės valstijos);
- FFA W-xxx (FOI, Švedija);
- Risø-A1-xxx (taip pat B, P serijos, Risø, Danija);
- DU xx-W-xxx (Delft, Nyderlandai).

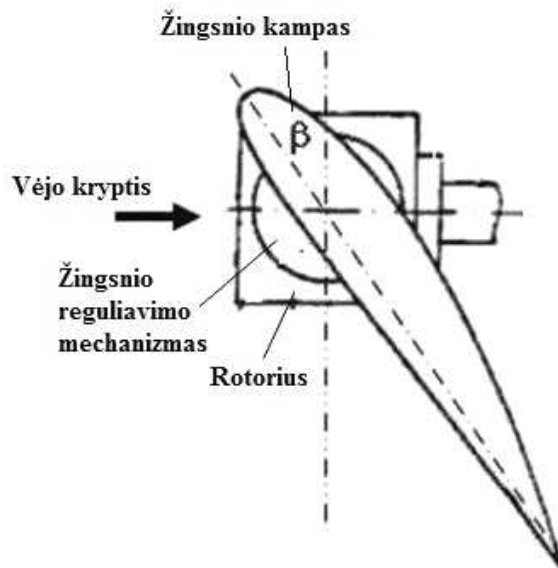
1.8. Vējaračio sūkių reguliavimo metodai

Vėjo jėgainės paleidimo metu vėjaratis nesisuka. Jam įsisukus iki reikiamo greičio prijungiama apkrova. Esant nedideliam vėjo greičiui svarbu maksimaliai išnaudoti vėjo energiją surandant maksimalios galios tašką, o esant stipriam vėjui vėjo jėgainei pasiekus nominalią išėjimo galią svarbu ją palaikyti kuo pastovesnę ir stengtis neviršyti, kad nebūtų pažeisti elementai, nepritaikyti didelėms perkrovoms.

Jėgainės išėjimo galia priklauso nuo sukuriama sukimo momento, kuris priklauso nuo vējaračio sukimosi greičio bei menčių aerodinaminių savybių, kurios gali būti reguliuojamos aktyviai arba pasyviai. Mažos galios vėjo jėgainėse įprasta naudoti pasyvų sūkių reguliavimo metodą dėl jo paprastumo. Aktyvus sūkių reguliavimo metodas taikomas visose didelės galios vėjo jėgainėse (Miller 1997).

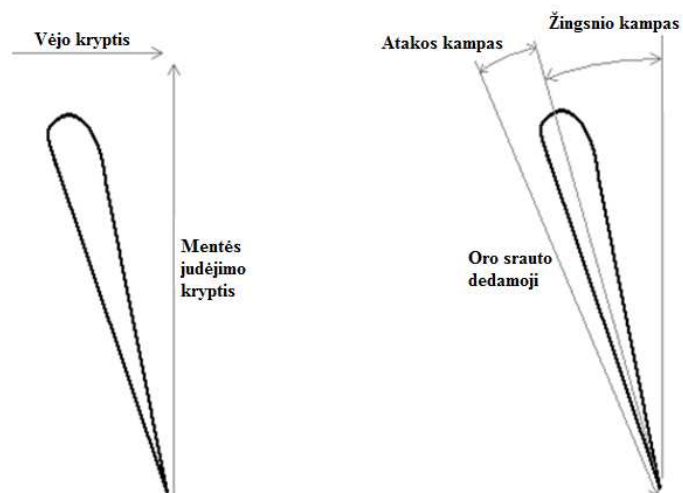
1.8.1. Aktyvus vējaračio sūkių reguliavimo metodas

Didelės galios vėjo jėgainėse vējaračio sūkius įprasta reguliuoti keičiant menčių žingsnio kampą. Jėgainei veikiant tam tikrame darbo režime, reikiamas menčių žingsnio kampas nustatomas pagal siekiamą sukurti sukimo momentą, vējaračio sukimosi greitį bei menčių atakos kampą į oro srautą. Žingsnio kampo reguliavimo schema pavaizduota 8 paveiksle.



8 pav. Žingsnio kampo reguliavimo schema

Jėgainės paleidimo metu, kai rotoriaus greitis lygus nuliui, menčių atakos kampas yra statmenas ir atvirkščiai proporcingas žingsniui (pvz. kai žingsnis lygus 0° , atakos kampas lygus 90°). Žingsnis priklauso tik nuo pasukimo kampo, o atakos kampas nuo oro srauto dedamosios, kuri savo ruožtu priklauso nuo vėjo ir menčių sukimosi greičio. Kadangi vėjaračio menčių linijinis sukimosi greitis yra skirtingas visame mentės ilgyje (ties ašimi lygus nuliui, ties mentės galu – didžiausias), patogus dydis skaičiuoti oro srauto dedamąją yra mentės galų greičio ir vėjo greičio santykis – TSR. Atakos kampo priklausomybė nuo srauto dedamosios ir menčių žingsnio pavaizduota 9 paveiksle.

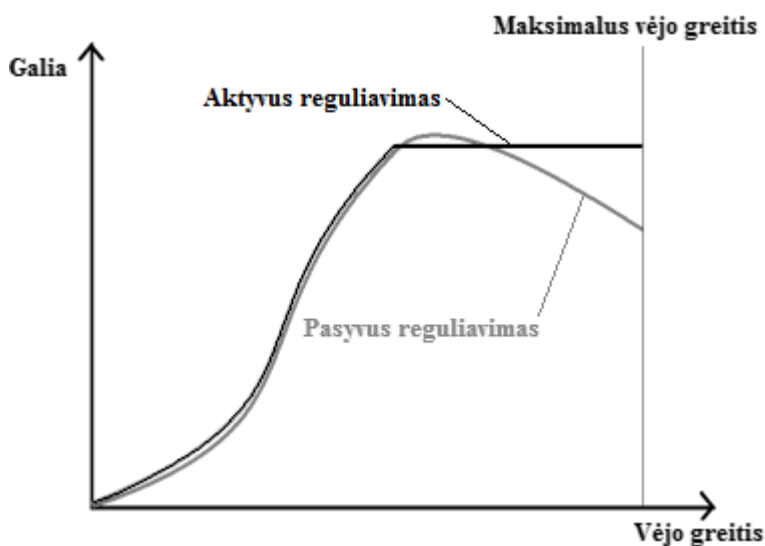


9 pav. Menčių atakos kampo priklausomybė nuo oro srauto dedamosios ir žingsnio

Priklausomai nuo menčių profilių aerodinaminių savybių ir geometrijos, nominalus žingsnis esant nominaliems vėjaračio sūkiams būna 0–10 laipsnių, didžiausią sukimo momentą sukuriantis atakos kampas 10–15 laipsnių. Esant didesniam atakos kampui prasideda oro srauto nutrūkimas ir keliamosios jėgos slėgio vektoriai staigiai sumažėja. Oro srauto nutrūkimo savybė naudojama pasyvaus vėjaračio sūkių reguliavimui (Hoffmann 2002).

1.8.2. Pasyvūs vėjaračio sūkių reguliavimo metodai

Pasyvūs vėjaračio sūkių reguliavimo metodai yra taikomi nedidelės galios vėjo jėgainėse. Pasyviai vėjaračio sūkius reguliuoti galima taip pat aerodinamiškai. Esant per dideliame vėjaračio sukimosi greičiui dėl mentės profilio savybių ir geometrijos pradeda atitrūkinėti oro srautas, sukeldamas sūkurius. Sumažėjus sukimo momentui vėjaratis nustoja greitėti ir nusistovi tam tikras sukimosi greitis. Principinės galios charakteristikos naudojant aktyvų ir pasyvų sūkių reguliavimo metodus pavaizduota 10 paveiksle.



10 pav. Aktyvaus ir pasyvaus sūkių reguliavimo metodų galios kreivių palyginimas

Kitas pasyvus vėjaračio sūkių reguliavimo metodas yra oro srauto pasipriešinimas sukliamas mechaninių išcentrinų stabdžių, kurie montuojami menčių galuose. Esant per dideliems vėjaračio sūkiams dėl išcentrinės jėgos suveikia mechaniniai pasukimo mechanizmai, kurie menčių galus pasuka prieš oro srautą ir vėjaratis pradeda stabdytis. Taip nusistovi tam tikras vėjaračio sukimosi greitis.

Kiti ne tokie populiarūs pasyvūs sūkių reguliavimo metodai yra naudojant užsparnius ant vėjaračio menčių arba vėjaračio krypties pasukimas šonu į vėją, taip sumažinamas oro srautas į

vėjaračio ploto vieneta. Tačiau šie metodai nėra efektyvūs ir naudojami tik mažos galios vėjo jėgainėse (iki 1 kW galios) (Hoffmann 2002).

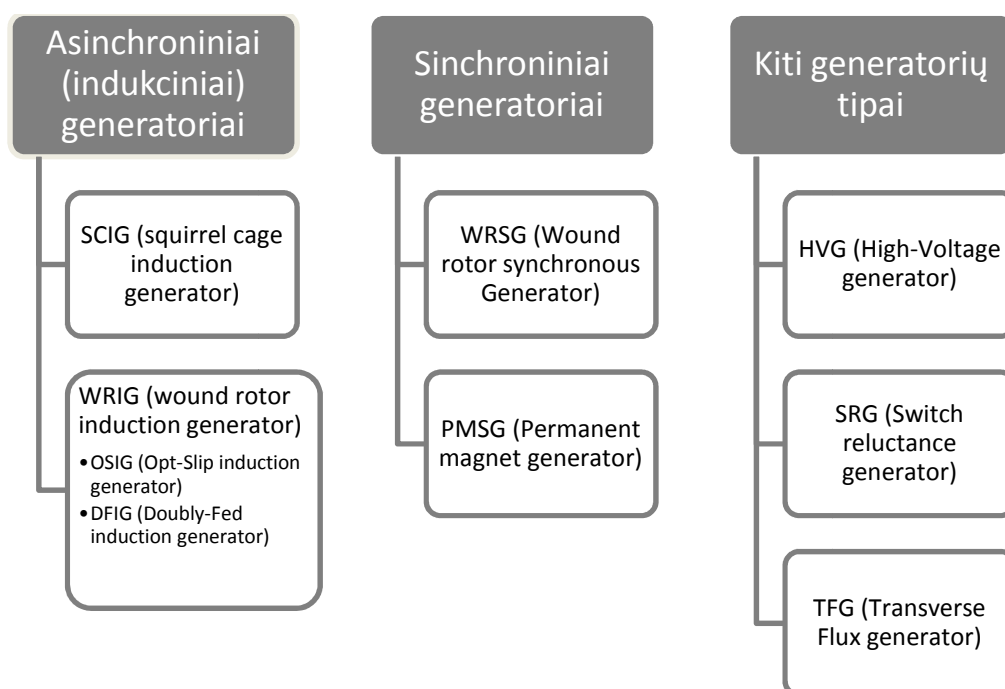
1.9. Elektros generatoriai

Elektros generatorių veikimo principas pagrįstas elektromagnetinės indukcijos dėsniais. Magnetiniai poliai sąveikaudami su besisukančiu rėmeliu, kurį veikia kintamas magnetinis srautas, indukuoja elektrovą. Elektrovą apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon = NBS\omega \sin(\omega t), \quad (2)$$

kur N – rėmelių skaičius; B – magnetinė indukcija [T]; ω – kampinis dažnis [rad/s].

Vėjo jėgainėse naudojami kelių tipų trifaziai elektros generatoriai. Tam tikrų tipų vėjo jėgainėse suderinimui su elektros tinklu, prie kurio jungiama sistema, naudojami įtampos keitikliai, kurie kintamos srovės (AC), nuolatinės (DC), kintamo dažnio elektros energiją pritaiko prie elektros tinklo parametrų. Iš esmės elektros generatoriai skirstomi į sinchroninius ir asinchroninius, jų klasifikavimo schema pateikta 11 paveiksle.



11 pav. Vėjo jėgainėse naudojamų elektros generatorių klasifikavimo schema (Brana 2016)

Asinchroniniai (arba indukciniai) generatoriai, kaip sistemos, dar skirstomi į SCIG, WRIG, DFIG tipus. Šie generatoriai dažniausiai naudojami dėl palyginti žemos kainos, mechaninio paprastumo, patikimumo. Pagrindinis trūkumas – statoriui reikalinga sužadinimo srovė apvijų įmagnetinimui. Ši srovė paprastai gaunama iš tinklo arba alternatyvaus elektros šaltinio, prie kurio prijungus generatorių atsiranda magnetinis laukas ir leidžia sistemai funkcionuoti. Asinchroninių generatorių sukimosi greitis būna 0,5–2 % didesnis už sinchroninį (1000–1500 aps./min.) greitį. Pavyzdžiui, jei 4 polių generatoriaus, prijungto prie 50 Hz dažnio tinklo, sinchroniniai sūkiai yra 1500 aps./min., tai didžiausias sukimo momentas bus sukurtas, kai generatorius suksis apie 1515 aps./min. (1 % sinchroninių sūkių). Jei generatoriaus sukimosi greitis yra mažesnis už sinchroninį, jis dirba kaip variklis ir naudoja tinklo energiją sūkiams palaikyti.

Asinchroninių generatorių sinchroninis sukimosi greitis priklauso nuo polių skaičiaus. Esant 50 Hz tinklo dažniui trijų fazių generatorius suksis:

- 3000 RPM – 2 poliai (1 polių pora);
- 1500 RPM – 4 poliai (2 polių poros);
- 1000 RPM – 6 poliai (3 polių poros);
- 750 RPM – 8 poliai (4 polių poros);
- 600 RPM – 10 polių (5 polių poros).

Kai kurie generatoriai turi galimybę perjungti polių skaičių ir dirbti kitų sūkių režime.

Esant mažoms apkrovoms asinchroniniai generatoriai dirba neefektyviai, todėl dažnai vėjo jėgainėse būna įrengiami du generatoriai – kai vėjas silpnas, dirba mažos galios generatorius, kai vėjas stiprus, įsijungia didelės galios generatorius.

Sinchroniniai generatoriai skirstomi į WRSG ir PMSG generatorius. Pastaruosiuose generatoriuose magnetinis laukas sukuriamas naudojant nuolatinis magnetus, todėl jiems nereikalinga sužadinimo srovė (Bendikas 2005).

Sinchroniniai generatoriai, juos lyginant su asinchroniniais, yra sudėtingesnės konstrukcijos bei brangesni, tačiau jie gali turėti skirtingą polių skaičių bei tam tikromis sąlygomis gali būti jungiami be reduktoriaus. Į tinklą šių generatorių sukuriamą elektros energiją jungiama naudojant keitiklius, kurie išlygina svyravimus, kontroliuoja įtampą ir dažnį. Nuolatinės srovės generatoriai naudojami mažos galios vėjo jėgainėse ir gali dirbti skirtingais greičiais.

1.9.1. Sinchroniniai WRSG ir PMSG generatoriai

WRSG – dažniausiai naudojamas sinchroninių generatorių tipas vėjo energetikoje. Skirtingai nei asinchroniniame, WRSG generatoriuje nenaudojami papildomi reaktyviosios galios

kompensavimo įrenginiai. Rotoriaus apvijoms sužadinti naudojama srovė yra paduodama naudojant slydimo žiedus, šepetėlius, specialius bešepečius žadintuvus su besisukančiais lygintuvais. Rotoriaus apvija sukasi sinchroniniu greičiu, o generatoriaus sukimosi greitis priklauso nuo sukimosi dažnio ir polių porų skaičiaus.

Rotoriaus dažnis nustatomas pagal formulę:

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{N}{60} = \frac{PN}{120}, \quad (3)$$

kur f – dažnis [Hz]; P – polių porų skaičius; N – rotoriaus sūkliai [aps./s].

PMSG generatoriai yra gana efektyvūs, nes jiems nereikalinga apvijų sužadinimo srovė, o elektros energija gaunama esant skirtingiems vėjo greičiams. Pagrindiniai trūkumai, dėl kurių šių generatorių atsisakoma yra šie: brangi nuolatinių magnetų gamyba, plataus diapazono elektros keitiklių būtinybė, būtinybė suderinti įtampą ir dažnį su tinklo parametrais, esant aukštai temperatūrai magnetai praranda savo magnetines savybes (negrįžtamai išsimagnetina), todėl jie nėra atsparūs laikiniams perkaitimams. Papildomų problemų sukelia įtampos reguliavimas, sinchronizacija, generatoriaus paleidimas bei papildoma rotoriaus aušinimo sistema.

1.9.2. Asinchroninis SCIG generatorius

SCIG generatoriaus tipas yra vienas plačiausiai naudojamų vėjo energetikoje dėl savo efektyvumo, paprastumo ir patikimumo. Šie generatoriai naudojami fiksuoto ir keičiamo (konvertuojamo visame sūkių diapazone) greičio vėjo jėgainėse (1 ir 4 tipai). Vėjo jėgainėje pagrindinis vėjaratis per reduktorių jungiamas tiesiai į generatorių. Paleidžiant jėgainę naudojami švelnaus starto mechanizmai bei reaktyviosios galios kompensatoriai. Kad generatoriaus darbo netolygumai nebūtų perduodami į tinklą, tokio jungimo į elektros tinklus tinkamumas yra ribotas.

1.9.3. Asinchroniniai WRIG generatoriai

WRIG tipo generatoriai nuo SCIG skiriasi tuo, kad rotoriaus elektrinės charakteristikos gali būti valdomos iš išorės. Jie yra brangesni ir ne tokie patikimi, reikalaujantys didesnės priežiūros, tačiau jais pasiekiamas didesnis sistemos efektyvumas. Šie generatoriai turi dvi pagrindines konfigūracijas.

OSIG konfigūracija turi galimybę išoriškai keisti varžą, prijungtą prie rotoriaus apvijų. Tai leidžia siaurame ruože keisti magnetinio lauko slydimą ir, parinkus optimalų, gauti efektyvias darbo

charakteristikas. Taip pat šis efektas leidžia sumažinti sukimo momento netolygumus, kurie vėliau būtų perduoti į elektros tinklą, sukeldami žalingus trikdžius. Šios sistemos privalumai: gana paprasta elektros grandinės schema, platesnis apsukų diapazonas, sumažinamos žalingos mechaninės apkrovos, mažesni elektriniai trikdžiai, atsirandantys dėl vėjo gūsių. Trūkumai: išorinio reaktyviosios galios tiekimo būtinybė, ribojamas greičių diapazonas (nuo 0 iki 10 %), sudėtinga aktyvios ir reaktyvios galios kontrolė.

DFIG konfigūracijos veikimo principas grįstas tuo, kad statoriaus įtampa tiekama iš tinklo, o įtampa rotoruje indukuojama naudojant dvikryptį galios konverterį, naudojančią IGBT tranzistorius. Tai leidžia generatoriui sukis gana plačiu, bet apribotu greičių diapazonu ir pasiekti aukštą efektyvumą. Galios konverteris yra sudarytas iš dviejų dalių – generatoriaus ir tinklo dalies. Rotoriaus dalis kontroliuoja aktyvią ir reaktyvią galią valdant elektros srovės komponentes. Tinklo dalyje konverteris reguliuoja nuolatinę įtampą ir palaiko nustatytą galios faktorių. Pagrindinis šios sistemos privalumas – generavimas ir kontroliavimas reaktyviosios galios, kuri tiekama statoriui naudojant galios konverterį, tačiau pagrindinis trūkumas – dažniausiai jėgainė dirba galios režime, kai dažnis sutampa ir galios konverteris neatlieka reaktyvios galios konvertavimo tarp jėgainės ir tinklo.

1.9.4. Kiti galimi generatorių tipai

HVG – generatorius sukuria pakankamai aukštą įtampą, kuri būtų lygi tinklo įtampai. Taip siekiama sumažinti srovę galios perdavimui, minimizuojant galios nuostolius išsiskiriant šilumai laiduose.

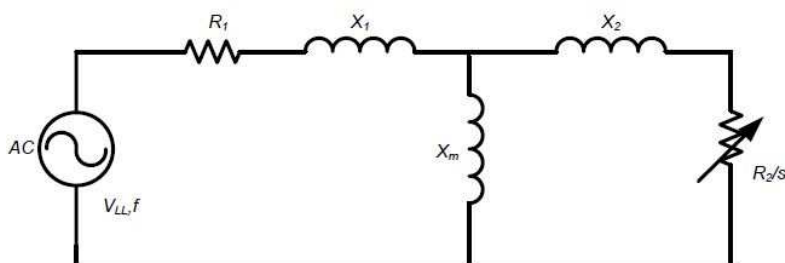
SRG – sinchroninių generatorių tipas, kuriems nereikia reduktoriaus. Panašūs į PMSG generatorių tipą, tačiau pasižymi prastesniu efektyvumu, mažesniu galios tankiu, lyginant su asinchroniniais generatoriais.

TFG – tai gana naujas ir daug dėmesio sulaukiantis elektros generatorių tipas. Veikimo principas panašus kaip sinchroninių generatorių, kuriuose naudojami nuolatiniai magnetai. Jiems nėra reikalingas reduktorius. Pagrindinis trūkumas – santykinai dideli indukciniai nuostoliai (Branan 2016).

1.9.5. Ekvivalentinė grandinė asinchroniniams generatoriams

Ekvivalentinės grandinės schema, paremta Thevenin teorema, yra plačiai naudojama vėjo jėgainių, su asinchroniniu generatoriumi, modeliavime. Tiesinių grandinių ekvivalentiškumo teorema teigia, kad aktyvųjį dvipolį galima pakeisti ekvivalentiniu įtampos šaltiniu, kurio

elektrovara lygi dvipolio tuščiosios veikos įtampai, o varža – dvipolio vidinei varžai. Atlikus tokį keitimą, grandinės, prijungtos prie dvipolio gnybtų, režimas nesikeičia. Grandinės schema performuojama ir perkeliama į statoriaus dalį bei vietoj trijų fazių, skaičiuojama tik viena. Vienos fazės ekvivalentinės grandinės schema pavaizduota 12 paveiksle.



12 pav. Thevenin vienos fazės ekvivalentinės grandinės schema

Ekvivalentinės vienos fazės schemos elementų parametrai pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Ekvivalentinės schemos parametrų reikšmės (sudaryta autoriaus pagal Singh 2014)

Žymėjimas	Vienetai	Reikšmė
f	Hz	Linijos dažnis (50 Hz Europoje, 60 Hz JAV)
N	(-)	Polių skaičius
R_1	Ω	Statoriaus varža pilnoje grandinėje
R_2	Ω	Rotoriaus varža pilnoje grandinėje
V_{LL}	V	Generatoriaus įtampa (690 V Europoje, 450 arba 575 V JAV)
X_1	Ω	Statoriaus induktyvioji varža visoje grandinėje
X_2	Ω	Rotoriaus induktyvioji varža visoje grandinėje
X_m	Ω	Vios grandinės reaktyvioji varža

Jei asinchroninis generatorius jungiamas ne į tinklą, reikalinga reaktyvioji galia tiekama iš kondensatorių, sujungtų delta forma, toliau už jų gali būti prijungiama apkrova (Hussain 2012).

Pilnutinė galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$S = \sqrt{3}EI, \quad (4)$$

kur S – pilnutinė galia [VA]; E – įtampa [V]; I – srovė [A].

Aktyvioji galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$P = S \cos \varphi, \quad (5)$$

kur P – aktyvioji galia [W]; $\cos \varphi$ – galios faktorius.

Reaktyvioji galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (6)$$

kur Q – reaktyvioji galia [VAR].

Kondensatoriaus srovė apskaičiuojama pagal formulę:

$$I_c = \frac{Q}{E}, \quad (7)$$

kur I_c – kondensatoriaus srovė [A].

Kondensatoriaus varža fazei apskaičiuojama pagal formulę:

$$X_c = \frac{E}{I_c}, \quad (8)$$

kur X_c – kondensatoriaus varža [Ω].

Minimali kondensatoriaus talpa fazei apskaičiuojama pagal formulę:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}, \quad (9)$$

kur C – kondensatoriaus talpa [μF]; f – tinklo dažnis [Hz].

1.10. Įtampos keitikliai

Priklausomai nuo vėjo jėgainės tipo, vėjo greičio, išorinių, vidinių veiksnių, bei vėjo jėgainės darbo režimų, jėgainė sukuria nepastovaus dažnio kintamos įtampos elektros energiją. Siekiant jėgainės sukuriama elektros energiją suderinti su tinklo parametrais, vienas dažniausiai naudojamų įrenginių yra įtampos keitiklis.

AC-DC-AC keitikliai susideda iš trijų dalių:

- AC-DC keitiklis-lygintuvas keičia kintamą srovę į nuolatinę;
- Kondensatoriai išlygina netolygumus bei kompensuoja momentinius galios trūkumus;
- DC-AC keitiklis keičia nuolatinę srovę į kintamą nustatytos įtampos ir dažnio srovę.

Modernios vėjo jėgainės, priskiriamos 4 tipui, yra pilno konvertavimo. Jų tiekama elektros energija yra žemos įtampos ir nepastovaus dažnio. Todėl jėgainės ir tinklo parametrų suderinimui naudojamas inverteris, kuris jungia jėgainę su transformatoriumi. Inverteris sukuria nesinusoidines įtampos komponentes bei aukšto dažnio elektrinį triukšmą, todėl inverterį jungiant į transformatorių reikalingas filtras.

Įtampos keitikliai dėl elektromechaninių reiškinių (permagnetinimo, temperatūros, mechaninių įtempimų) sukuria elektros energijos nuostolius (Sarkar 2013).

1.11. Transformatoriai

Vėjo jėgainės, jungiamos į skirstomuosius tinklus, turi atitikti reikiamus tinklo parametrus – dažnio, įtampos, stabilumo ir kt.. Nedidelės arba pavienės didesnės galios vėjo jėgainės jungiamos į 0,4–30 kV įtampos tinklo dalį. Dideli vėjo jėgainių ūkiai, susidedantys iš daugelio sujungtų ir suderintų jėgainių, jungiami į 110 kV elektros tinklą.

Dažniausiai į 50 Hz trifazį elektros tinklą jungiamų vėjo jėgainių (virš 100–150 kW galios) nominali kintama įtampa yra 400 V arba 690 V, todėl, pavyzdžiui, jungiant jėgainę su 690 V generatoriumi į 34,5 kV įtampos tinklą bus reikalingas įtampą aukštinantis transformatorius santykiu 1:50.

Dideliuose vėjo jėgainių ūkiuose yra naudojamos kelios transformatorių pakopos, kurios sujungia kelias vėjo jėgaines į vieną elektros energijos tiekimo liniją. Pavyzdžiui 690 V generatoriai jungiami į 690 V/11 kV transformatorių, toliau kelios linijos jungiamos į 11/33 kV transformatorių, kuris toliau jungiamas į elektros tinklą (Siemens AG 2011).

1.12. Vėjo jėgainės efektyvumo ir galios parametrai

Vėjo jėgainės efektyvumui turi įtakos įvairūs išoriniai ir klimato veiksniai, pavyzdžiui, oro temperatūra, slėgis, tankis, santykinė oro drėgmė, krituliai, apledėjimas, oro turbulencija, vėjo gūšiai ir kt. Bendrą visos vėjo jėgainės sistemos efektyvumą lemia atskirų komponentų efektyvumai. Vėjo sukuriamą teorinę galia priklauso nuo rotorius darbinio ploto, oro tankio ir greičio kubo:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ [W]}, \quad (10)$$

kur P_T – Teorinė vėjo sukuriamą galia [W]; A – rotorius apimamas plotas [m²]; V – vėjo greitis [m/s]; ρ – oro tankis [kg/m³].

Jėgainės efektyvumą apibrėžiantis dydis yra galios koeficientas, kuris nusako, kokią realią teorinės vėjo energijos dalį vėjo jėgainė išgauna.

Oro tankis labiausiai priklauso nuo temperatūros bei slėgio, kuris iš esmės priklauso nuo aukščio virš jūros lygio. Praktiškai perduoti visą vėjo sukuriama galia yra neįmanoma dėl mechaninių nuostolių, todėl reali galia, kurią sukuria vėjo turbina yra mažesnė. 1926 m. vokiečių mokslininkas *Albert Betz* nustatė, kokia yra maksimali galia, kurią įmanoma sukurti iš vėjo, ir apibrėžė formulę: (Betz 1966)

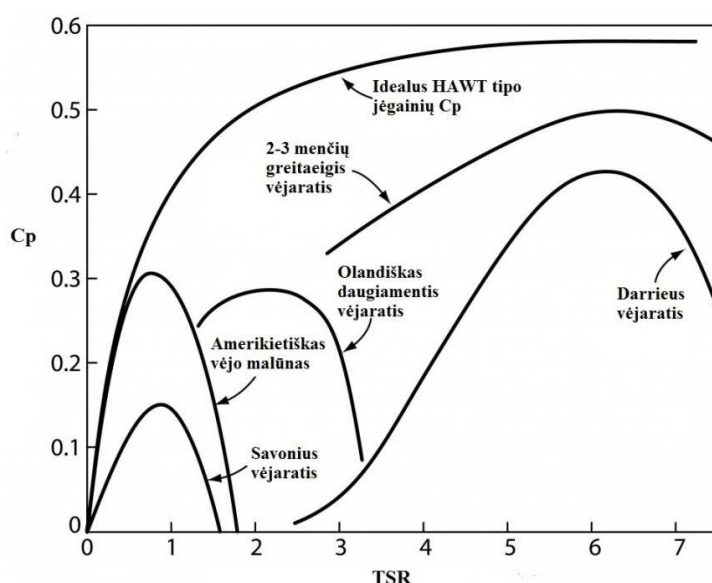
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p = \frac{1}{2} \rho A V^3 0,59 \text{ [W]}, \quad (11)$$

kur P_0 – Teorinė sugeneruojama galia [W]; A – rotoriaus apimamas plotas [m²]; V – vėjo greitis [m/s]; ρ – oro tankis [kg/m³]; C_p – eksploatacinių savybių galios koeficientas.

Galios koeficientas C_p negali viršyti 0,59 ir priklauso nuo jėgainės tipo, aerodinaminių savybių, vėjo parametrų, menčių skaičiaus, menčių žingsnio bei vėjo greičio ir menčių galų sukimosi santykio (TSR) ir yra apibrėžiamas realiai perduotos galios į vėjaratį santykiu su teorine vėjo galia. 13 paveiksle pateikta įvairių vėjaračių galios koeficiento priklausomybė nuo TSR. Galios koeficientą, kaip santykinį dydį, apibrėžia formulė:

$$C_p = \frac{P_0}{P_T}, \text{ kur} \quad (12)$$

C_p – galios koeficientas; P_0 – maksimali teorinė sugeneruojama galia [W]; P_T – maksimali vėjo galia [W].



13 pav. Įvairių vėjaračių galios koeficiento priklausomybė nuo TSR (Shrikant 2013)

Apytiksliai maksimali galia nesiekia dviejų trečdalių teorinės ir į ją nėra įskaičiuoti kiti galios nuostoliai, kuriuos įskaičiavus galia sumažėja maždaug nuo 59 % iki 42 %. (Shrikant 2013)

Lietuvos vėjo jėgainių asociacijos duomenimis statistiškai Lietuvoje naujų vėjo jėgainių efektyvumas siekia 24–25 %, o naudotų 10–18 %.

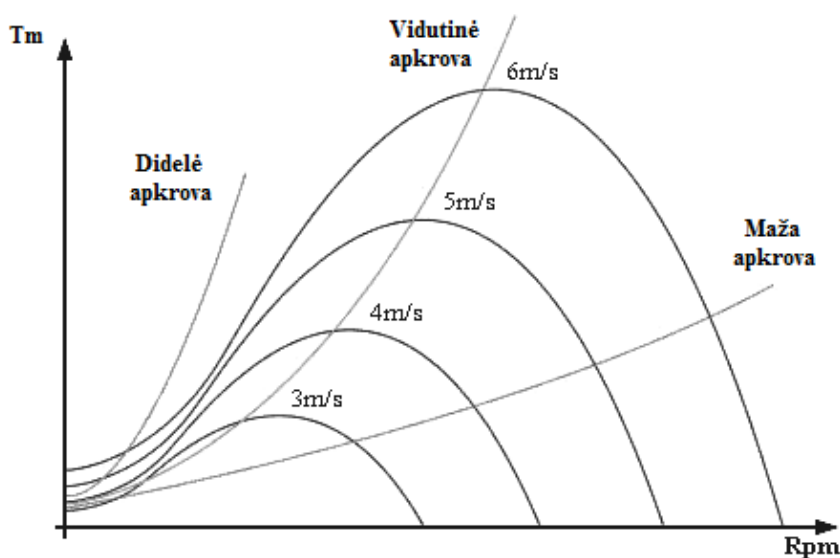
1.13. Maksimalios galios taško sekimo metodai

Kadangi vienas svarbiausių uždavinių vėjo energetikoje yra įsisavinti kuo daugiau energijos mažesnėmis sąnaudomis per kuo trumpesnę laiką, iškyla tam tikrų problemų. Viena jų yra vėjo greičio ir krypties nepastovumas, kuris sąlygoja vėjo jėgainės darbo režimo neprisitaikymą prie išorinių sąlygų. Ši problema sprendžiama pritaikant maksimalios galios sekimo algoritmus. Momento priklausomybė nuo rotoriaus sūkių pateikta 14 paveiksle.

Vienas svarbus vėjo turbinos darbo parametras yra menčių galų ir vėjo greičio santykis (TSR), kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$TSR = \frac{\omega R}{V}, \quad (13)$$

kur ω – radialinis turbinos greitis [rad/s]; R – mentės ilgis [m]; V – vėjo greitis [m/s].



14 pav. Momento priklausomybė nuo sūkių prie skirtingų apkrovų (Ganjefar 2014)

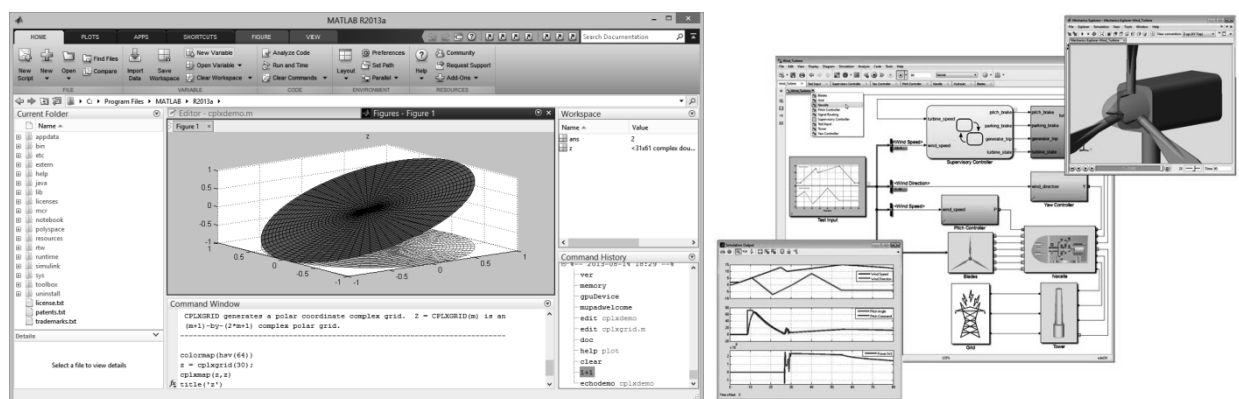
Esant vidutinei arba nominaliai apkrovai pasiekiamas maksimalus sukimo momentas.

1.14. Pavarų mechanizmai

Kadangi vėjo jėginių vėjaračio sukimosi greitis yra pakankamai žemas (dažniausiai 16–18 sūkių per minutę), naudojant greitaeigius generatorius reikalinga greičių pavarą, kuri padidintų sūkius iki maždaug 1500 sūkių per minutę, t. y. apie 80–90 kartų. Greičių pavarą yra brangus ir tinkamos priežiūros reikalaujantis komponentas. Jų būna įvairių tipų – vienos ir daugiau pakopų krumpliaratinės pavaros, planetiniai multiplikatoriai, automatinės greičių pavaros ir pan. Pakankamai didelėse vėjo jėgainėse yra naudojami lėtaeigiai didelio diametro generatoriai. Taip siekiama išvengti perdavimo pavaros komponento. Tokios jėgainės dirba iki 20 % efektyviau, reikalauja mažiau priežiūros, kas svarbu esant sunkiai aptarnaujamose vėjo jėgainėse, pavyzdžiui jūroje, tačiau inžinerinius sprendimus lemia ekonominiai faktoriai – brangus lėtaeigis generatorius ne visada būna ekonomiškai atsiperkantis sprendimas (Bonanomi A. 2014).

1.15. MATLAB/Simulink modeliavimo aplinka

Darbe tyrimams naudojama privačios Amerikos kompanijos sukurta programinė įranga MATLAB (*Matrix Laboratory*), kurios pirmoji versija buvo išleista 1984 metais. 2004 metais šią programinę įrangą jau naudojo virš milijono vartotojų visame pasaulyje. Pagrindiniai vartotojai yra privačios inžinerinės kopanijos, akademinės, mokslinės institucijos. *Simulink* – tai grafinė programavimo aplinka, skirta modeliuoti, imituoti bei analizuoti įvairių dinaminių sistemų procesus, dažniausiai pritaikoma automatiniam valdymui, signalams apdoroti. Programavimo principas yra sistemų blokų, kurie imami iš bibliotekos, tarpusavio jungimas ir derinimas.

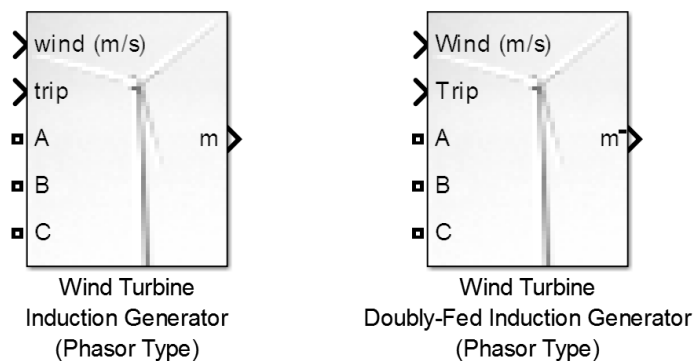


15 pav. MATLAB ir *Simulink* kompiuterinės programavimo aplinkos

MATLAB ir *Simulink* yra suderintos ir lengvai siejamos viena su kita. Programų aplinkos pavyzdžiai pavazduoti 15 paveiksle (Moler 2004).

1.16. *Simulink* modeliavimo aplinkos pritaikymo galimybės tiriant vėjo jėgaines

Modeliavimo aplinkos *Simulink* blokų bibliotekoje *SimPowerSystems* yra vėjo jėgainėms modeliuoti skirtų blokų, pavyzdžiui, vėjo turbino parametrų įvesties blokas, generatorių, apkrovos, reaktyviosios galios kompensavimo blokai ir pan. Pagrindiniai naudojami vėjo jėgainių generatorių blokai pavaizduoti 16 paveiksle.



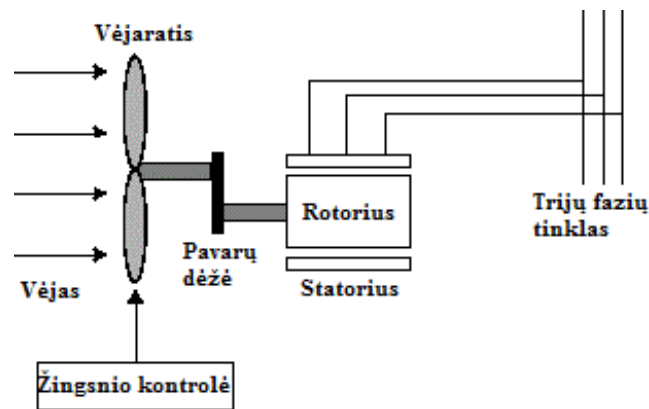
16 pav. Vėjo turbinų blokai *Simulink* modeliavimo aplinkoje

Tačiau šie blokai skirti tik tam tikriems skaičiavimams atlikti, todėl siekiant sudaryti detalų vėjo jėgainės modelį būtina naudoti išorinius tam tikrų komponentų skaičiavimo modelius.

1.16.1. WTIG modeliavimo blokas

Kintamo žingsnio vėjo turbino blokas WTIG skirtas modeliuoti asinchroninio SCIG tipo generatoriaus elektrinę charakteristiką. Bloko principinė schema pavaizduota 17 paveiksle. Šio generatoriaus rotorius yra sukamas vėjo turbino vėjaračio veleno. Statoriaus apvijos jungiamos į trifazį tinklą. Vėjo turbino sukuriama mechaninė energija generatoriuje transformuojama į elektros energiją ir tiekama elektros tinklui statoriaus apvijas jungiant tiesiogiai.

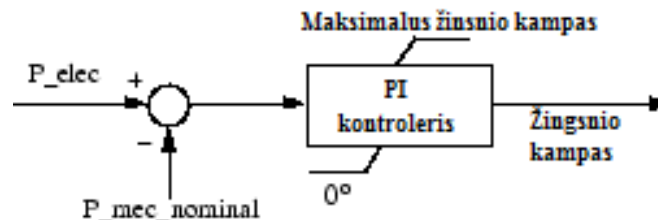
Vėjaračio menčių žingsnis yra kontroliuojamas siekiant pritaikyti turbino sukuriamą galią prie tinklo, apriboti ir palaikyti nominamlią galią esant per dideliame vėjo greičiui. Kad generatorius perduotų elektros galią į tinklą, jo greitis turi būti šiek tiek didesnis už sinchroninį greitį, atitinkantį tinklo dažnį. Tačiau greičio svyravimai paprastai būna pakankamai maži, todėl WTIG yra laikomas fiksuoto greičio vėjo generatoriumi. Reaktyvioji galia naudojama tiekti elektros energiją į tinklą arba į kitus įrenginius, pavyzdžiui, kondensatorių sistemų įkrovimui, SVC arba STATCOM, kurie naudojami vėjo jėgainių tinklų derinimui prie tinklo parametrų, netikslumų kompensavimui ir reaktyviosios galios kompensavimui (Heier 1998).



17 pav. Vėjo turbinos asinchroninio generatoriaus WTIG principinė schema (Heier 1998)

Pasirenkant išorinį turbinos įvesties bloką nustatoma *external turbine* parinktis. Tuomet blokas modeliuoja tik generatoriaus darbo režimą, mechaninio sukimo momento signalas gali būti jungiamas iš išorinio bloko.

Vėjaračio menčių žingsnis kontroliuojamas PI (proporcinio-integralinio) reguliatoriumi, siekiant nuolat sekti ir palaikyti nominalią išėjimo galios vertę. Nulio laipsnių žingsnis palaikomas, kai nusistovėjusi išduodama galia prilygsta nominaliai nustatytai galios vertei. Vėjaračio menčių žingsnio valdymo bloko principinė schema pavaizduota 18 paveiksle.



18 pav. Vėjaračio menčių žingsnio valdymo principinė schema (Heier 1998)

WTIG bloko generatoriaus parametrai:

- Išorinės turbinos pasirinkimo nustatymas leidžia naudoti išorinį momento įėjimo signalą. Nustačius išorinę turbiną, atsiranda įvesties jungtis, leidžianti prijungti signalą, nusakantį turbinos mechaninio sukimo momento vertę. Ši vertė nurodoma PU vienetais. Ši įvestis gali būti sukuriamą kito turbinos modelio. Generatoriaus režime šis dydis turi būti neigiamas;
- Nominali galia P_n , [VA]; įtampa V_n , [Vrms]; dažnis f_n , [Hz];
- Statoriaus varža R_s ir induktyvumas L_{ls} , [PU];
- Rotoriaus varža R_r ir induktyvumas L_{lr} , [PU];
- Magnetinis induktyvumas L_m , [PU];

- Inercija, trintis ir polių porų skaičius $[H(s), F(pu), p]$. Kombinuota generatoriaus ir vėjo turbino inercija nusakoma sekundėmis, trintis ir klampa priklauso nuo generatoriaus charakteristikų ir nusakoma PU vienetais, ir priklauso nuo polių porų skaičiaus;
- Pradinės sąlygos: slydimas, $[s]$; kampas ϕ , $[laipsn.]$; statoriaus srovės dydis PU vienetais; fazės kampas; $[laipsn.]$;
- Grafinis turbino menčių žingsnio skirtingiems vėjo greičiams atvaizdavimas.

Vėjo turbino parametrai (matoma nepasirinkus išorinės turbino modelio):

- Nominali išėjimo galia, $[W]$;
- Nominalus vėjo greitis, $[m/s]$. Šio vėjo greičio sukuriama galia dažniausiai būna mažesnė už nominalią jėgainės galią.
- Maksimali galia esant nominaliam vėjo greičiui $[PU]$;
- Nominalus rotacinis greitis, kai sukuriama didžiausia galia esant nominaliam vėjo greičiui $[PU]$;
- Menčių atakos kampo proporcinio-integralinio kontrolerio koeficientų vertės K_p ir K_i ;
- Maksimalus menčių atakos kampas laipsniais;
- Maksimalus menčių atakos kampo kitimo greitis laipsniais per sekundę.

WTIG įvestis ir išvestis:

- A-B-C fazių galios perdavimo linijų jungimas;
- Jungiklis, valdomas loginiu signalu $[0 \text{ arba } 1]$. Kai lygis aukštas – WTIG išjungiamas;
- Vėjo greitis, $[m/s]$;
- Mechaninis sukimo momentas T_m , $[PU]$ (matomas tik, kai pasirenkama išorinė vėjo turbina, generatoriaus režime reikšmė turi būti neigiama);
- Išėjimo signalų šyna m. Naudojant Bus Selector bloką išskiriami 8 išėjimo signalai.

WTIG bloko išėjimo signalai pateikti 5 lentelėje.

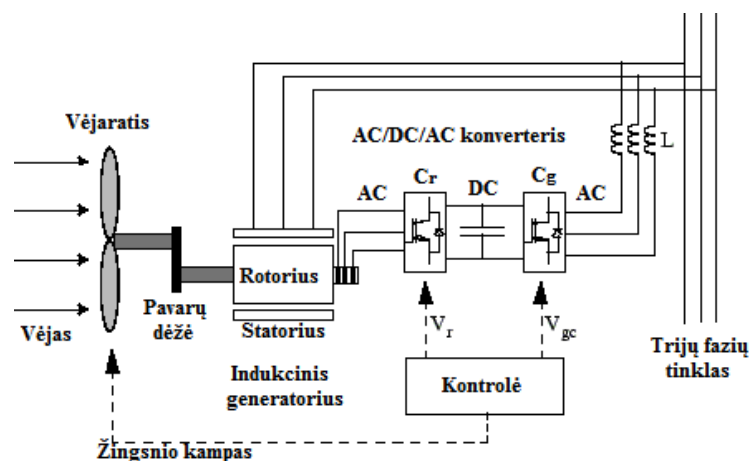
5 lentelė. Simulink bloko WTIG išėjimo signalų reikšmės

Žymėjimas	Vienetai	Reikšmė
V_{abc}	pu	Fazių įtampos (kompleksinis dydis)
I_{abc}	pu	Fazių srovės (kompleksinis dydis)
P	pu	Išėjimo galia
Q	pu	Išėjimo reaktyvioji galia
w_r	pu	Apsisukimai
T_m	pu	Magnetinis momentas
T_e	pu	Mechaninis momentas
Pitch_angle	laipsn.	Žingsnio kampas

PU vienetai skaičiavimams naudojami siekiant pagreitinti simuliacijos laiką.

1.16.2. WTDFIG modeliavimo blokas

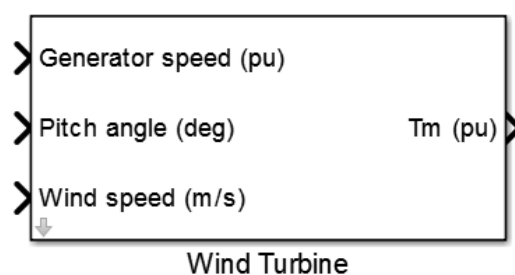
Dvigubo maitinimo asinchroninio generatoriaus modeliavimo blokas WTDFIG yra padalintas į dvi rotorius ir tinklo dalis ir turi jas jungiantį dvigubą AC-DC-AC keitiklį, kuris skirtas suderinti elektros generatoriaus ir tinklo parametrus. Šis keitiklis keičia kintamą įtampą į nuolatinę ir toliau iš nuolatinės į stabilizuotą ir suderintą kintamą. Kintama įtampa DC-AC dalyje sukurama naudojant IGBT įrenginio schemą. Induktoriai L naudojami sistemos prijungimui prie tinklo. Trys rotoriaus apvijos jungiamos į AC-DC-AC keitiklį per specialius šepetėlinius šliaužiklius. Statoriaus apvijos jungiamos tiesiogiai į tinklą. WTDFIG bloko principinė schema pavaizduota 19 paveiksle. WTDFIG modeliavimo blokas veikia pagal DFIG (3 tipo) vėjo jėgainių modeliavimo principus ir plačiau aprašomas kituose skyriuose (Heier 1998).



19 pav. Dvigubo maitinimo vėjo turbinos elektros generatoriaus (WTDFIG) principinė schema (Heier 1998)

1.16.3. Keičiamo vėjaračio menčių žingsnio modeliavimo blokas

Keičiamo žingsnio kampo vėjo turbinos blokas skirtas modeliuoti vėjaračio darbo režimus pagal žinomus nominalius parametrus. Šis blokas pavaizduotas 20 paveiksle.



20 pav. Keičiamo turbinos menčių žingsnio modeliavimo blokas (*Wind Turbine*)

Šio bloko veikimas grįstas turbinos galios charakteristikų pusiausvyros ieškojimo principu. Tariaama, kad pavaros standumas yra begalinis, o inercijos ir trinties jėgos derinamos tarpusavyje. Išėjimo galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{wind}^3, \quad (14)$$

kur P_m – mechaninė išėjimo galia [W]; c_p – eksploatacijos galios koeficientas; ρ – oro tankis [kg/m³]; A – turbinos darbinis oro srauto tekėjimo plotas [m²]; v_{wind} – vėjo greitis [m/s]; λ – santykinis dydis, nusakantis menčių galų greičio ir vėjo greičio santykį; β – menčių žingsnis kampas [laipsn.].

Formulės (14) pritaikymas PU matavimo vienetui:

$$P_{mPU} = k_p c_{pPU} v_{windPU}^3, \quad (15)$$

kur P_{mPU} – nominali galia su tam tikromis ρ ir A vertėmis; c_{pPU} – eksploatacijos koeficientas, kai c_p vertė pati didžiausia; v_{windPU} – PU vėjo greitis, kuris nustatomas pagal bazinį vėjo greitį, bazinis greitis nustatomas pagal labiausiai tikėtiną vėjo greičio vertę [m/s]; k_p – galios daugiklis, kai $c_{pPU}=1$ PU ir $v_{windPU}=1$ PU, k_p yra mažiau arba lygu 1.

Bendroji lygtis, naudojama modeliavime:

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 (c_2 / \lambda_1 - c_3 \beta - c_4) e^{-c_5 / \lambda_1 + c_6 \lambda}, \quad (16)$$

Bloko nustatymo parametrai:

- Nominali mechaninė išėjimo galia [W];
- Bazinė elektros generatoriaus galia [VA] (šis parametras naudojamas apskaičiuoti išėjimo sukimo momentą pagal nominalų generatoriaus sukimo momentą);
- Bazinis vėjo greitis [m/s]; vidutinė numatoma vėjo greičio vertė;
- Maksimali galia, esant baziniam vėjo greičiui, pagal PU nominalią mechaninę galią (šis parametras naudojamas, kai galios daugiklis k_p jau yra apibrėžtas);
- Bazinis rotoriaus sukimosi greitis, esant maksimaliai galiai ir baziniam vėjo greičiui [PU] (Sinchroniniuose ir asinchroniniuose generatoriuose bazinis sukimosi greitis yra

sinchroninis. Nuolatinių magnetų generatoriuose šis greitis apibrėžiamas, kaip greitis, sukuriantis nustatytą išėjimo įtampą be apkrovos);

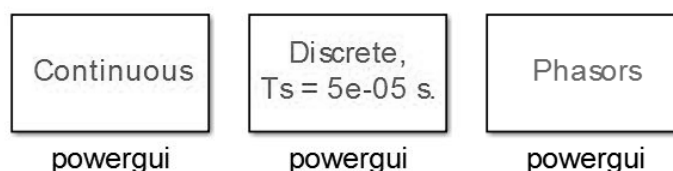
- Kampas beta [laipsn.] (menčių žingsnio kampas, naudojamas sukurti reikiamas galios charakteristikas. Dydis beta - didesnis arba lygus nuliui).

Įvestis ir išvestis:

- Generatoriaus greitis [PU];
- Turbinos menčių žingsnio kampas [laipsn.];
- Vėjo greitis [m/s];
- Mechaninis sukimo momentas T_m [PU].

1.16.4. Elektrotechnikos modeliavimo biblioteka *SimPowerSystems*

Elektrotechnikos modeliavimo blokai, priklausantys *Simulink* bibliotekai *SimPowerSystems* yra skirti modeliuoti galios įrenginių elektromechanines charakteristikas. Pagrindinis blokas *powergui* yra naudojamas nustatyti bendrus galios nustatymus visoje sistemoje. Jei kelioms subsistemoms naudojami skirtingi bendrieji nustatymai, tai naudojami atskiri *powergui* blokai. Šis blokas leidžia atlikti skaičiavimus trijuose režimuose: fiksuoto žingsnio, kintamo žingsnio ir faziniame. Režimas pasirenkamas priklausomai nuo bendro modelio schemos bei suderinimo būtinybės su kitomis subsistemomis. Modeliavimo blokas *powergui* pavaizduotas 21 paveiksle trijuose skaičiavimo režimuose.



21 pav. Pagrindinis *SimPowerSystems* galios nustatymų blokas *powergui*

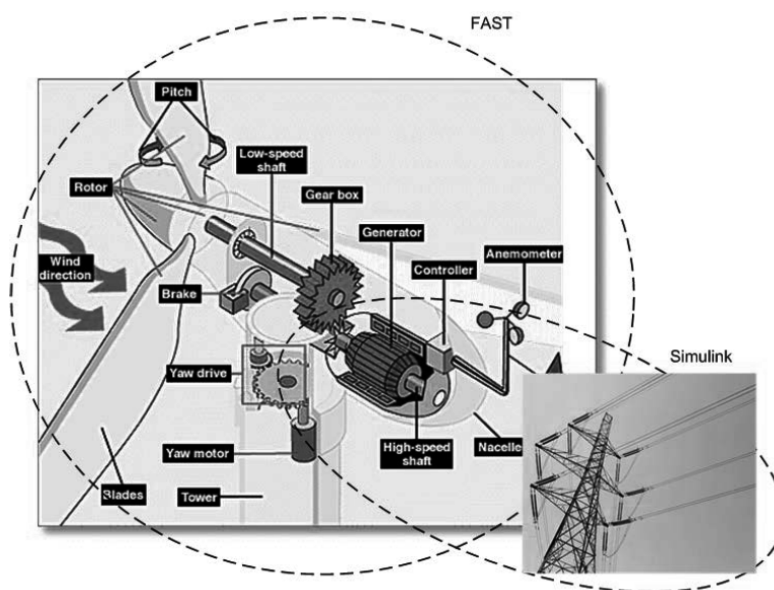
1.17. FAST modeliavimo įrankis MATLAB/*Simulink* aplinkoje

2005 metais Jungtinių Amerikos Valstijų kompanijos Renewable Energy Laboratory buvo sukurtas vėjo jėgainių modeliavimo įrankis FAST. Ši modulinė sistema veikia MATLAB/*Simulink* aplinkoje ir yra skirta modeliuoti dinamines vėjo jėgainių charakteristikas. Į ją yra integruoti aerodinamikos, hidrodinamikos, konstrukcijos struktūrų, elastingumo, valdymo, pavarų bei elektrinių sistemų modeliavimo algoritmai (Buhl 2006).

Šis įrankis leidžia modeliuoti keletą vėjo jėgainių konfigūracijų: dviejų-trijų menčių horizontalios ašies vėjo jėgaines, menčių atakos kampo ir srauto atitrūkimo charakteristikas,

fiksuotos arba keičiamo kampo stebules, modeliavimas jėgainės konstrukcijos ant jūros dugno arba ant plūduri ir daugelį kitų parametrų.

Standartiniai *Simulink* modeliavimo blokai pritaikyti tik elektrinei jėgainės daliai modeliuoti, daugiausia generatoriaus ir jungimo į tinklą parametrus. FAST apima aerodinaminių charakteristikų įvertinimą, mechaninio perdavimo, kontrolės, generatoriaus skaičiavimus bei leidžia išvesti apie 1000 įvairių išvesties parametrų. FAST ir *Simulink* modeliavimo apimties ribos pavaizduotos 22 paveiksle.

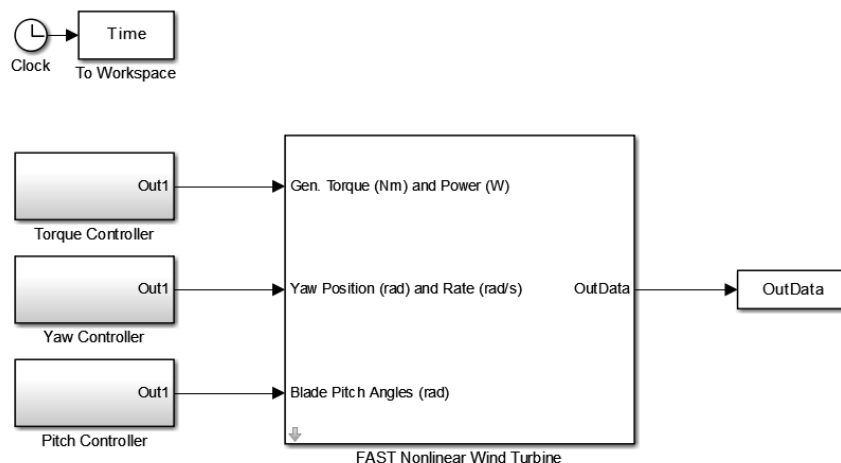


22 pav. *Simulink* ir FAST aplinkų vėjo jėgainės modeliavimo apimties ribos (Singh 2014)

MATLAB/*Simulink* ir FAST sąsaja sudaroma remiantis NREL leidiniu, skirtu paruošti MATLAB/*Simulink* aplinką darbui su FAST įrankiu. Paleidimo veiksmai atliekami remiantis leidinyje nurodyta ir aprašyta tvarka, pakeitimai daromi pagal nurodytą protokolą bei vadovaujantis bendraisiais programavimo bei darbo su kompiuterinėmis programomis įgūdžiais, prieš tai susipažinus su MATLAB/*Simulink* modeliavimo aplinka, programos struktūra bendraisiais principais bei programavimo kalbos sintakse (Singh 2014).

1.17.1. Modeliavimo įrankio FAST principai ir metodika

Pirminė įrankio FAST schema su įvesties ir išvesties blokais *Simulink* aplinkoje pavaizduota 23 paveiksle. Schema sudaryta iš pagrindinio FAST modeliavimo bloko, į kurį jungiasi generatoriaus įvestis: momentas (Nm) ir galia (W), vėjaračio krypties padėtis (rad) ir judėjimo (rad/s) signalai bei menčių (2 arba 3) žingsnio kampo signalas (rad). Išėjimo signalai pasirenkami sudarant modelį atskiroje įvesties byloje. *Clock* blokas yra skirtas modelio parametrų skaičiavimo sužaditimui ir sinchronizavimui.



23 pav. Pagrindiniai įrankio FAST blokai, pirminio modelio branduolys

Išėjimo kanalas *OutData* išveda nustatytus skaičiavimo rezultatus. Juos galima toliau naudoti modelyje arba jungti kaip grįžtamus ryšius į kitų arba to paties bloko įvestį. Modelio kūrime naudojami kiti standartiniai *Simulink* blokai, pvz. *Scope*, *Switch*, *Constant*, *Add*, *Gain* ir kt.

1.17.2. Aerodinaminiai nustatymai

Aerodinaminiai modelio parametrai pagal protokolą nustatomi tekstinėje byloje, kurioje yra nuorodos į vėjaračio mentės profilių aerodinaminius duomenis ir geometrinius mentės dydžiai, pagrindiniai vėjo parametrai: oro tankis, klampa, bokšto aerodinaminio šešėlio taškai, aerodinaminių skaičiavimų intervalai.

6 lentelė. Pagrindiniai aerodinaminiai modelio nustatymai

Pavadinimas	Reikšmė	Matavimo vienetai
NumBl	Vėjaračio menčių skaičius	(-)
TipRad	Rotoriaus spindulys	m
HubRad	Atstumas nuo ašies iki mentės šaknies	m
OverHang	Atstumas nuo krypties ašies iki vėjaračio	m
TowerHt	Rotoriaus aukštis nuo pagrindo	m
HubMass	Rotoriaus be menčių masė	kg
HubIner	Rotoriaus be menčių inercijos momentas	kg m ²
BMassDen	Mentės masės tankis ilgio vienetui	kg/m
AirDens	Oro tankis	kg/m ³
AeroTwst	Mentės profilio susukimas	laipsn.
AdjBlMs	Mentės masės tankio faktorius	(-)
BlFract	Mentės dalinimo segmento atstumas	(-)
AeroCent	Aerodinaminio centro taškas	(-)
StrcTwst	Profilio susukimas skaičiuojamame segmente	laipsn.
BMassDen	Mentės masės tankis metrui	kg/m

Pagrindiniai parametrai aprašantys vėjaračio mentės geometriją yra sudaromi padalinant mentę į kelis pjūvius (rekomenduojama 10–15 pjūvių) bei kiekviename pjūvyje nurodant aerodinaminio profilio geometriją, stygos ilgį, atstumus tarp pjūvių bei pasukimo kampus.

Įrankis FAST leidžia modeliuoti vėjo jėgaines, turinčias 2 arba 3 vėjaračio mentis. Pagrindiniai modeliuojami aerodinaminiai parametrai pateikti 6 lentelėje.

1.17.3. Vėjo parametrų nustatymai

Vėjo parametrų nustatymų failas leidžia sumodeliuoti vėjo greitį, greičio pokytį, kryptį, krypties pokytį, gūsius ir aprašyti juos tam tikriems laiko intervalams. Duomenys pateikiami SI sistemos vienetais. Vėjo charakteristikų modeliavimo pavyzdys pateiktas 7 lentelėje.

7 lentelė. *Vėjo charakteristikų protokolo pavyzdys*

Time	Wind speed	Wind Dir	Vert. Speed	Horiz. Shear	Vert. Shear	LinV Shear	Gust Speed
0	10	30	0	0	0	0	0
9.9	10	30	0	0	0	0	0
10	12	25	0	0	0	0	0
999.9	12	25	0	0	0	0	0

Pagal šiuos nustatymus vėjo greitis bus 10 m/s 30 laipsnių krypties, 10 sekundę vėjo greitis padidės iki 12 m/s, o vėjo kryptis pasikeis į 25 laipsnius. Nuo 9,9 iki 10 sekundės nustatyti parametrai keisis tolygiai. Norint sukurti sudėtingą vėjo parametrų pasikeitimą reikia padalinti nustatymus į mažus laiko intervalus.

1.17.4. Vėjaračio mentės aerodinaminių profilių nustatymai

Vėjaračio mentės aerodinaminių profilių charakteristikos nustatomos atskiruose tekstiniuose failuose pagal nustatytą protokolą. Pagrindiniai bendrieji nustatymai:

- Srauto atitrūkimo kampas (laipsn.);
- Nulinės keliamosios jėgos koeficiento kampas (laipsn.);
- Atakos kampas, kai keliamosios jėgos koeficientas lygus nuliui (laipsn.);
- Atakos kampas, kai pasipriešinimo jėgos koeficientas lygus nuliui (laipsn.);
- Minimali pasipriešinimo koeficiento C_D reikšmė.

Toliau seka keliamosios jėgos C_L ir pasipriešinimo C_D koeficientų reikšmės nustatytam Reinoldso skaičiui nuo -180° iki $+180^\circ$.

1.17.5. Generatorių tipai ir jų modeliavimo principai

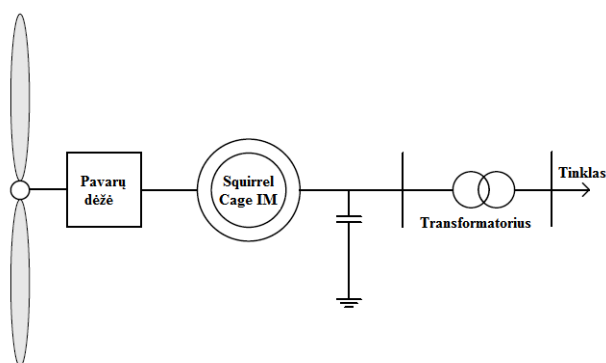
Vėjo jėgainės yra sudėtingi elektromechaniniai įrenginiai, veikiantys kintančioje aplinkoje. Modeliuojant atskiras posistemas dažnai neskiriamas reikiamas dėmesys atskirų posistemių tarpusavio sąveikai bei apskritai sistemos reikšmingumui. Pavyzdžiui, aerodinamikos modeliuotojai tinkamai neįvertina elektromechaninių reiškinių, o elektrinės dalies modeliuotojai – aerodinaminių. Pavyzdžiui, pavėjinių horizontalios ašies vėjo jėgainių sparnuotės aerodinaminė sąveika su bokšto konstrukcija gali turėti įtakos elektrinei sistemos veikimo charakteristikai, sukeliant pulsacijas arba elektrinius triukšmus.

Siekiant modeliuoti realistinius jėgainių modelius, FAST įrankis yra orientuotas į įvairių inžinerijos sričių specialistus, todėl ir posistemių charakteristikos yra suklasifikuotos pagal realius, esamus ir naudojamus įrenginių tipus.

FAST įrankis leidžia modeliuoti keturis vėjo jėgainių generatorių tipus:

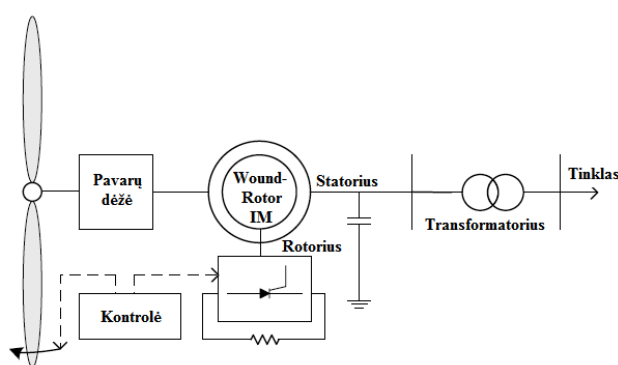
- Tipas 1. Fiksuoto greičio elektros generatorius
- Tipas 2. Kintamo greičio elektros generatorius
- Tipas 3. Dvigubo maitinimo asinchroninis generatorius
- Tipas 4. Pilnai konvertuojamas elektros generatorius

Fiksuoto greičio (Tipas 1) elektros generatorių naudojančios vėjo jėgainės yra ypač paplitusios. Jos veikia su labai siauru jėgainės rotorius sūkių diapazonu, kadangi narvelinio tipo generatorius per transformatorių jungiamas tiesiai į elektros tinklą. Šiam generatorių tipui yra būtinas išorinis reaktyviosios galios kompensavimas, nes generatorius dirba siaurame sūkių diapazone ir staigūs sukimo momento šuoliai gali pažeisti įrenginį. Sūkių reguliavimui šiose jėgainėse įprasta naudoti savireguliuojančias vėjaračio mentis bei stabdžius. Fiksuoto greičio vėjo turbinos schema pavaizduota 24 paveiksle.



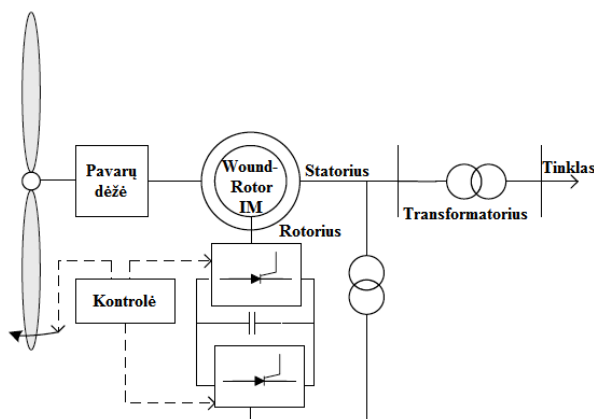
24 pav. Tipas 1: Fiksuoto greičio vėjo jėgainės schema

Kintamo greičio (Tipas 2) generatorius veikia plačiame rotoriaus apsisukimų greičio diapazone. Šios jėgainės galiai reguliuoti dažniausiai naudoja keičiamą vėjaračio menčių žingsnį. Greičių ir galios kontrolė tokio tipo jėgainėms leidžia efektyviau generuoti elektros energiją nei fiksuoto greičio vėjo jėgainėse. Modeliavime asinchroniniai generatoriai keičiami į nelineines asinchronines mašinas, kur rotoriaus ir statoriaus parametrai gali būti sumodeliuoti. Rotoriaus elektros grandinė gali būti jungiama į nuolatinės/kintamos srovės konverterį su fiksuota varža. Konverteris jungiamas į rotorių, kad valdytų efektyvią varžą rotoriaus grandinėje. Tai leidžia greičių diapazoną keisti iki 10 %. Kita vertus, energija yra prarandama, nes konverterio varžos išskiria šilumą, todėl būtina parinkti optimalų balansą. Šioje schemoje taip pat yra būtinas reaktyvios galios kompensavimas. Kintamo greičio vėjo turbinos schema pavaizduota 25 paveiksle.



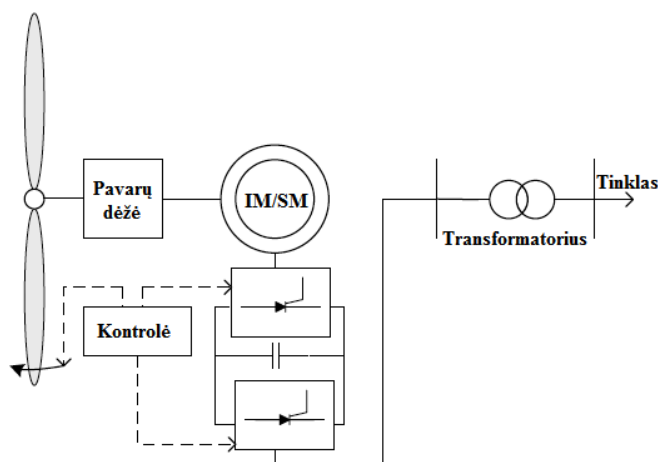
25 pav. Tipas 2: Kintamo greičio vėjo jėgainės schema

Dvigubo maitinimo (Tipas 3) asinchroniniai generatoriai veikia su mažesniais nuostoliais rotoriaus grandinėje dėl AC-DC-AC konverterio, kuris maksimaliai sumažina elektros nuostolius generatoriuje. Srauto vektoriaus kontrolė valdo rotoriaus elektros srovės nustatant reikiamas. Taip pat galios reguliavimui šio tipo vėjo jėgainėse naudojamas vėjaračio menčių žingsnio keitimas. AC-DC-AC konverteris reguliuoja galią rotoriaus elektros grandinėje, tačiau kai išėjimo galia pasiekia ir viršija maksimalią, konverteriui nebereikia galios didinti, o tai galima padaryti mažinant veleno sukimo momentą. DFIG schema pavaizduota 26 paveiksle.



26 pav. Tipas 3: Dvigubo maitinimo asinchroninio generatoriaus vėjo jėgainės schema

Pilnai konvertuojamos (Tipas 4) vėjo turbinos generatoriai taip pat veikia AC-DC-AC konverterio pagrindu, tačiau nuo dvigubo maitinimo asinchroninio generatoriaus skiriasi tuo, kad konverteris veikia tik viena kryptimi – tiekia elektros energiją į tinklą. Šioje schemoje nėra tiesioginio generatoriaus jungimo į tinklą – konverteris pilnai konvertuoja generuojamą elektros energiją ir priderina prie tinklo parametrų. Šio tipo vėjo jėgainės dažnai projektuojamos be pavarų mechanizmo, o naudojami daugiapoliai lėtaeigiai sinchroniniai generatoriai. Jie turi nepriklausomą reaktyvios galios reguliavimą ir įprastai nominali galia palaikoma keičiant vėjaračio menčių žingsnius. Šio tipo vėjo jėgainės yra efektyvios, bet santykinai brangios, todėl plačiausiai taikomos jūroje statomoms vėjo jėgainėms, kur yra brangūs priežiūros ir remonto darbai. Pilnai konvertuojamos vėjo turbinos schema pavaizduota 27 paveiksle.



27 pav. Tipas 4: Pilnai konvertuojamo generatoriaus vėjo jėgainės schema

Visi šių tipų generatoriai veikia asinchroniniu dažniu, išskyrus 4 tipą, kuriame gali būti naudojamas ir sinchroninis generatorius.

2. VĖJO JĖGAINĖS MODELIO SUDARYMAS IR ANALIZĖ

2.1. Vėjo jėgainės modelio sudarymo struktūra

Tiriamosios dalies paskirtis yra mokslinė – ištirti, atskleisti ir išaiškinti dėsningumus bei problemas. Modelio sudarymo tikslas nėra komercinis ir nėra skirtas konkrečiam privataus gamintojo gaminiui ištirti, tačiau modeliui sudaryti yra tikslinga naudoti realiai egzistuojančio techninio įrenginio parametrus. Modeliui sudaryti pasirinkta „Vestas V66/1650“ vėjo jėgainė, kuri yra IEC IA klasės vėjo jėgainė, plačiai naudojama visame pasaulyje bei turi kelias modifikacijas, pritaikytas kitoms vėjo klasėms. Keli jėgainės modeliai su modifikacijomis yra tos pačios (1,65 MW) galios, tačiau su skirtingais vidiniais parametrais. Nors „V66/1650“ jėgainė buvo suprojektuota „V63/1500“ modelio pagrindu, nėra duomenų, kad buvo atliktas kompiuterinis jėgainės modeliavimas. Pagrindiniai jėgainės duomenys pateikti 8 lentelėje.

Jėgainės modelyje naudojami duomenys parinkti pagal (*VESTAS V66-1.65 MW OptiSlip® Wind Turbine General Specifications*). Trūkstami duomenys, kurių gamintojas nepateikia, parinkti pagal standartinius dydžius, naudojamus tokių parametrų jėgainių modeliavime, atsižvelgiant į jėgainės tipą, principinę schemą, generatorių, galią ir kitus reikšmingus parametrus.

Modelyje naudojamos kompiuterinės programos ir programiniai įrankiai:

- MATLAB R2014a 32 bitų programinis paketas;
- FAST v7.02.00d-bjj 13-Jan-2013 modeliavimo įrankis .

Modelyje naudojami duomenų protokolai (dalis duomenų pateikiama prieduose):

- V66simsetup.m – MATLAB pagrindinė įvestis;
- V66.mdl – *Simulink* modelis;
- V66.fst – FAST pagrindinis jėgainės parametrų įvesties protokolas;
 - o V66.ipt – *Aerodyn* modulio menčių geometrijos ir aerodinaminių parametrų įvestis;
 - V66.wnd – vėjo parametrų nustatymai;
 - VestasAeroData – menčių aerodinaminių profilių charakteristikos protokolai;
 - o VestasTower.dat – bokšto geometrijos duomenys;
 - o VestasBlade.dat – mechaniniai mentės parametrai;
 - o VestasAdams.dat – grafikos atvaizdavimo parametrai;
 - o VestasLinear.dat – linijiniškumo kontrolės nustatymai.

Numatyta galimybė naudoti ir kitas bylas, aprašančias: plūduro platformą, plūduro judėjimo charakteristikas bei jėgainės skleidžiamą aerodinaminį triukšmą (šiuose modeliuose nenaudojami).

8 lentelė. Vėjo jėgainės V66/1650 pagrindiniai duomenys

Tipas	V66
Nominali galia	1650 kW
Rotoriaus aukštis	78 m
Rotoriaus skersmuo	66 m
Galios valdymas	Keičiamas žingsnis
Charakteringi vėjo greičiai	4/15/25
Generatorius	Asinchroninis
Vėjo klasė	IEC IA

2.2. Aerodinaminė dalis

Jėgainės rotorius sudarytas iš trijų menčių. V66/1650 jėgainėje naudojami aerodinaminiai profiliai: NACA63.600+FFA-W3. Šiame modelyje naudojami keturi aerodinaminiai profiliai, kurių yra žinomos ir nustatytos aerodinaminės charakteristikos. Profilių aerodinaminiai duomenys, naudojami FAST įrankio įvesties protokole, pateikti A priede.

Vėjaračio mentės geometrija sudaryta iš 4 profilių ir sudalinta į 15 skaičiavimo pjūvių. Kiekvienam pjūviui yra priskirti nustatyti duomenys: pjūvio atstumas, aerodinaminio skaičiavimo atstumas, profilio susukimo kampas, priskirto aerodinaminio profilio numeris. Vėjaračio mentės geometriniai duomenys pateikti B priede.

Modeliuojant aplinkos veiksnius svarbu išnagrinėti vėjo jėgainės darbo režimus veikiant įvairiems aplinkos pokyčiams. Kalbant apie vėjo greitį ir pokytį, svarbūs yra trys kritiniai vėjo greičiai: minimalus vėjo greitis, kai jėgainė gali pradėti tiekti elektros energiją, nominalus vėjo greitis, kai jėgainė pasiekia nominalią išėjimo galią, ir maksimalus, kai jėgainei yra pavojinga toliau veikti ir ji turi būti sustabdyta. Modeliuojant jėgainės galios valdymo algoritmus yra tikslinga naudoti įvairius šuoliškai ir tolygiai kintamus vėjo greičius, kad būtų galima įvertinti jėgainės valdymo efektyvumą, pereinamuosius procesus ir stabilizavimosi intervalus. Vėjo greičio parametrai, naudojami šiame modelyje pateikti C priede.

2.3. Mechaninė dalis

Vėjaračio sukurtas sukimo momentas toliau perduodamas į generatorių naudojant spyruoklinį slopintuvą ir greičių dėžę, kuri padidina rotoriaus sūkius iki pritaikytų generatoriaus darbo režimams. Pagrindiniai dydžiai, apibūrinantys mechaninio perdavimo charakteristikas yra pavarų dėžės perdavimo santykis $GBRatio$ ir efektyvumas $GBoxEff$. Kiti mechaninio perdavimo ir efektyvumo parametrai pateikti 9 lentelėje, masės ir inercijos nustatymai – 10 lentelėje.

9 lentelė. Mechaninio perdavimo nustatymai FAST įvesties protokole V66.fst

Reikšmė	Žymėjimas	Aprašymas (vienetai)
95	<i>GBoxEff</i>	Pavarų dėžės efektyvumas (%)
80	<i>GenEff</i>	Generatoriaus efektyvumas [ignoruojamas Thevenin modelyje] (%)
79	<i>GBRatio</i>	Pavarų dėžės perdavimo santykis (-)
False	<i>GBRevers</i>	Pavarų dėžės reversiškumas (True/False)
6000	<i>HSSBrTqF</i>	Pilnai apkrautų HSS dalies stabdžių stabdymo momentas (Nm)
0	<i>HSSBrDT</i>	Laikas, per kurį HSS dalies stabdžiai pasiekia pilną stabdymo momentą (sec)
unused	<i>DynBrkFi</i>	Išorinis failas, apibrėžiantis dinamines stabdymo charakteristikas
5.60E+09	<i>DTTorSpr</i>	Rotoriaus mechaninio perdavimo spyruoklės momentas (Nm/rad)
1.00E+07	<i>DTTorDmp</i>	Rotoriaus mechaninio perdavimo slopintuvo momentas (Nm/(rad/s))

10 lentelė. Masės ir inercijos nustatymai FAST įvesties protokole V66.fst

Reikšmė	Žymėjimas	Aprašymas (vienetai)
5000	<i>NacMass</i>	Kabinos masė (kg)
11600	<i>HubMass</i>	Stebulės masė (kg)
4600	<i>NacYIner</i>	Kabinos inercija apie krypties ašį (kg m^2)
100	<i>GenIner</i>	Generatoriaus inercija apie HSS ašį (kg m^2)
1000	<i>HubIner</i>	Stebulės inercija apie rotoriaus ašį (kg m^2)

Vėjaračio menčių masės ir inercijos yra apskaičiuojamos simuliacijos metu pagal įvestus geometrijos ir mechaninius nustatymus ir pateikiamos išvesties rezultatuose kartu su interpoliuotais menčių parametrais. Pagrindiniai apskaičiuoti masės ir inercijos parametrai:

- Rotoriaus masė – 22632 kg;
- Rotoriaus inercija – 2461603 kg m^2 ;
- Vienos mentės masė – 3677 kg;
- Mentės masės centras – 11,2 m.

2.4. Generatoriaus modelis

Generatoriaus modelis sudaromas atsižvelgiant į tai, kokie jėgainės darbo režimai yra simuliuojami. Nuo pasirinkto generatoriaus modelio priklausys simuliacijos vykdymo laikas, tikslumas ir skaičiuojami parametrai. FAST įrankis leidžia modeliuoti SIG tipo asinchroninį generatorių, Thevenin ekvivalentinę generatoriaus schemą arba išorinį generatoriaus modelį, pavyzdžiui, asinchroninės mašinos galios schemą, sudarytą naudojant *Simulink SimPowerSystems* galios modeliavimo blokus.

Pasirenkant norimą generatoriaus modelį pagrindinėje FAST nustatymų byloje pasirenkama *GenModel* nustatymo reikšmė 1 (SIG modelis), 2 (Thevenin ekvivalentinė schema) arba 3 (vartotojo naudojamas išorinis blokas).

2.4.1. SIG generatorius

Vienas iš paprasčiausių asinchroninio generatoriaus modelių yra SIG generatoriaus modelis, kuris gali būti realizuojamas sudarant nesudėtingą galios ir momento skaičiavimo algoritmą pagal žinomus generatoriaus sūkius. SIG generatorių apibrėžia keturi dydžiai, kurie pateikti 11 lentelėje. Šie nustatymai naudojami tik pasirinkus *GenModel* – 1 (SIG tipo generatoriaus modelis). Nominalus momentas randamas panaudojus formulę:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega}, \quad (17)$$

kur T_m – momentas [Nm]; P_m – galia [W]; ω – sūčiai [rad/s].

11 lentelė. SIG generatoriaus modelio pagrindiniai parametrai FAST įvesties protokole V66.fst

Reikšmė	Žymėjimas	Aprašymas (vienetai)
1,5	<i>SIG_SlPc</i>	Nominalus sukimosi slydimo dydis (%)
1500	<i>SIG_SySp</i>	Sinchroninio (nulinio momento) generatoriaus greitis (rpm)
10350	<i>SIG_RtTq</i>	Nominalus momentas (Nm)
2	<i>SIG_PORT</i>	Maksimalaus ir nominalaus momentų santykis (<i>Tpullout/Trated</i>) (-)

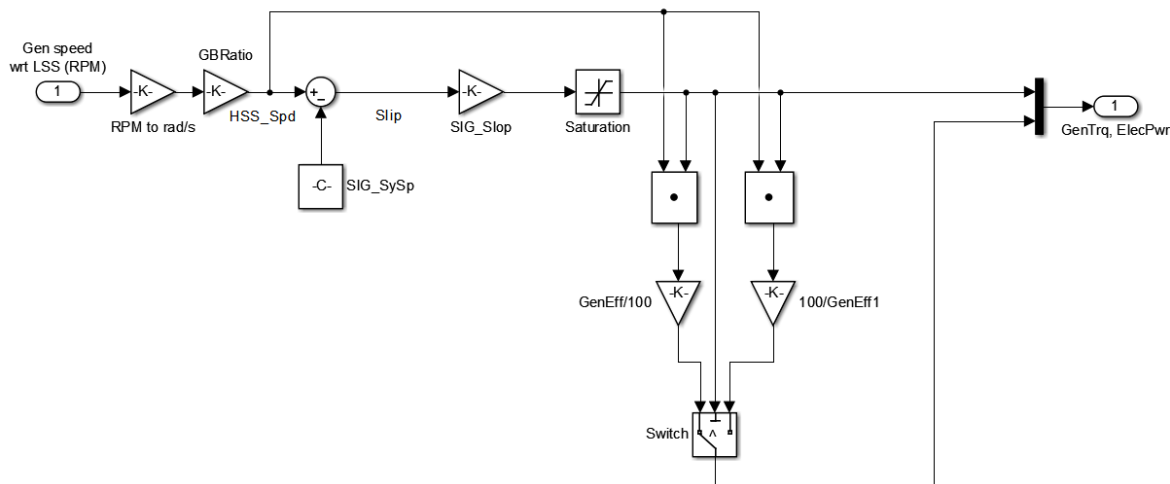
Generatoriaus efektyvumas pateiktas mechaninio perdavimo nustatymuose. Dydžiai, naudojami *Simulink* modelyje apskaičiuojami formulėmis ir aprašomi MATLAB kodu:

```

SIG_SySp = SIG_SySp*pi/30;
SIG_RtSp = SIG_SySp*(1.0+0.01*SIG_SlPc);
SIG_POS1=SIG_PORT*(SIG_RtSp-SIG_SySp);
SIG_POTq=SIG_RtTq*SIG_PORT;
SIG_Slop=SIG_RtTq/(SIG_RtSp - SIG_SySp).

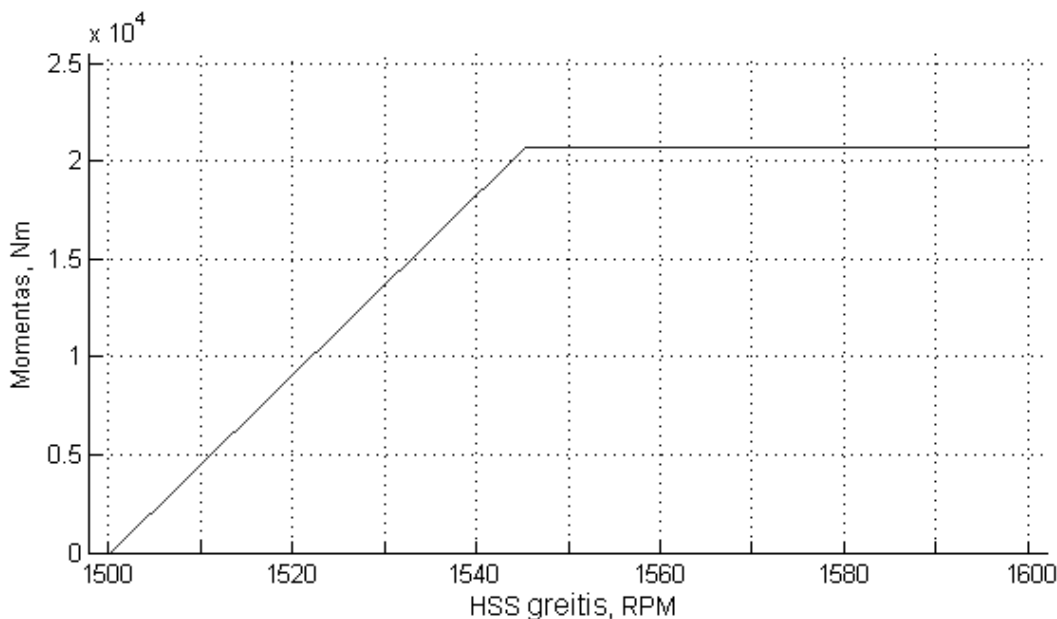
```

Elektros generatoriaus schema turi LSS sūkių įėjimo signalą bei kintamuosius dydžius iš parametrų protokolo. Išėjimo signalas susideda iš dviejų signalų – generatoriaus momento ir galios. Generatoriaus modelis pateiktas 28 paveiksle (*Simple Induction Generator* sistema bendrame modelyje).



28 pav. Simple Induction Generator elektros generatoriaus modelio schema

Simuliacijos metu gauta SIG generatoriaus modelio momento priklausomybė nuo sūkių pateikta 29 paveiksle, kuriame matome, kad nominalus (10350 Nm) modeliuojamos jėgainės momentas pasiekiamas esant 1522,5 aps./min. generatoriaus sūkiams, maksimalus momentas (20700 Nm) pasiekiamas esant 1545,0 aps./min. generatoriaus sūkiams.



29 pav. SIG generatoriaus modelio momento priklausomybė nuo generatoriaus sūkių

2.4.2. Simulink asinchroninės mašinos modelis

Vėjo jėgainės generatoriaus momentas nominaliame darbo režime siaurame sūkių diapazone kinta beveik tiesiškai, todėl kai kuriais atvejais optimizuojant modelį ir pagreitinant simuliacijos laiką tikslinga naudoti SIG elektros generatoriaus schemą, tačiau šis generatoriaus modelis apskaičiuoja tik išėjimo momentą ir galią priklausomai nuo sūkių įėjimo signalo vertės. Tiriant

elektrinę jėgainės dalį tikslinga naudoti Thevenin ekvivalentinę generatoriaus schemą sudarant asinchroninės mašinos schemą arba naudojant *Simulink SimPowerSystems* bibliotekos blokus.

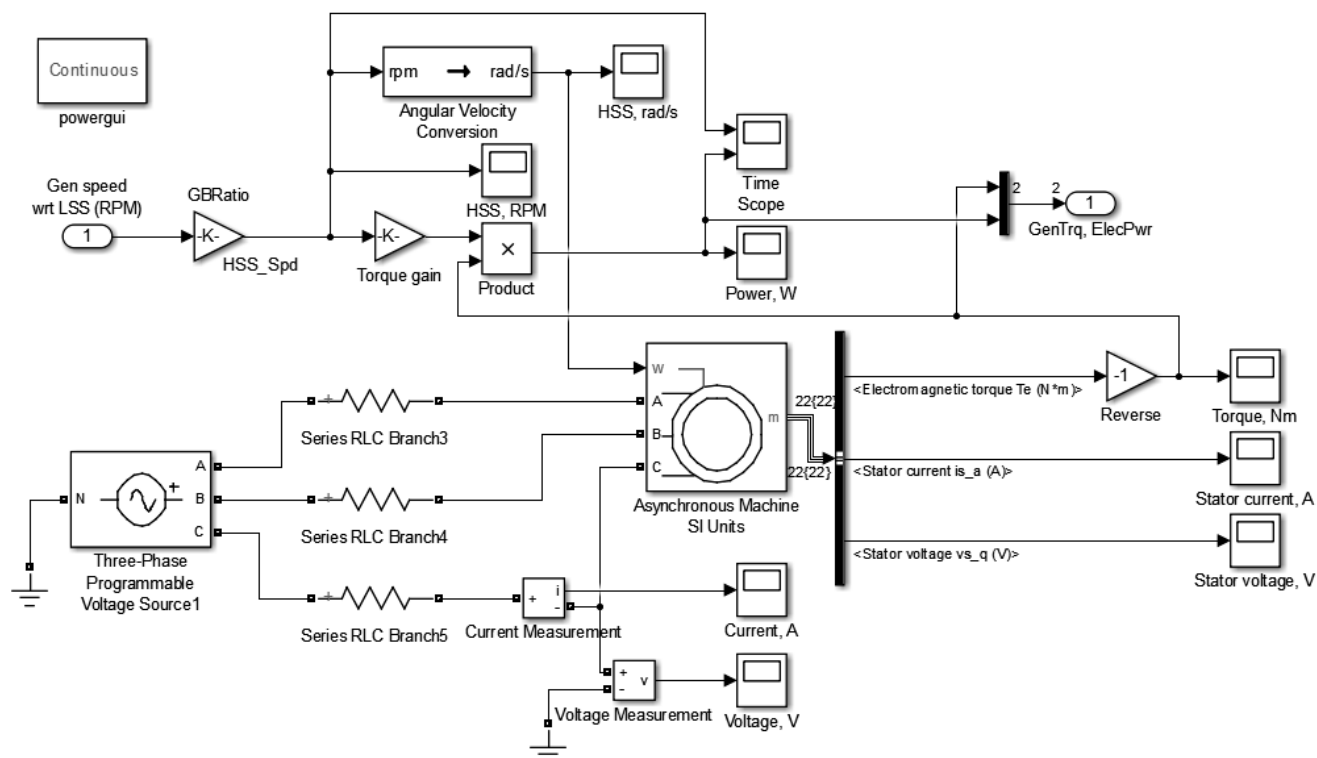
Asinchroninės mašinos *Asynchronous machine SI Units* blokas pritaikytas modeliuoti galios parametrus tiek variklio, tiek generatoriaus režimuose. Generatoriaus galios charakteristikoms apskaičiuoti sudaromas bandomasis modelis.

Schema sudaroma pagal nagrinėjamos jėgainės parametrus. Pagrindiniai parametrai pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė. Asinchroninės mašinos vidiniai parametrai

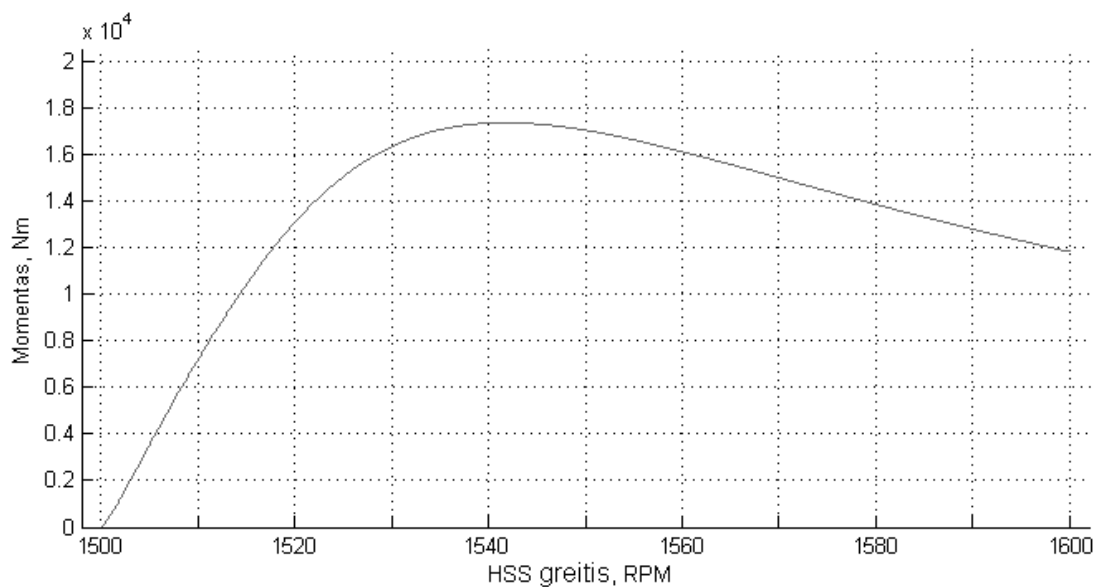
Reikšmė	Vienetai	Žymėjimas	Aprašymas
1.65	MVA	Pn	Galia
690	V	Vn	Įtampa (<i>Line-to-line</i> RMS)
50	Hz	fn	Dažnis
0.00265	Ω	Rs	Statoriaus varža
0.000169	H	Lls	Statoriaus induktyvumas
0.00263	Ω	Rr	Rotoriaus varža
0.000134	H	Llr	Rotoriaus induktyvumas
0.005475	H	Lm	Bendras magnetinis induktyvumas
2	(-)	p	Polių porų skaičius

Schema, naudojama bendrame modelyje pavaizduota 30 paveiksle.



30 pav. Asinchroninės mašinos galios parametrų modeliavimo schema

Ši generatoriaus schema sudaryta iš pagrindinių asinchroninės mašinos, apkrovos ir kintamos įtampos šaltinio bloką. Schema turi LSS įvesties signalą ir momento bei galios išvesties signalus. Simuliacijos metu gauta asinchroninės mašinos momento priklausomybė nuo sūkių pateikta 31 paveiksle, kuriame matome, kad nominalus (10350 Nm) modeliuojamos jėgainės momentas pasiekiamas esant 1514,85 aps./min. generatoriaus sūkiams, maksimalus momentas (17346 Nm) pasiekiamas esant 1541,75 aps./min. generatoriaus sūkiams.



31 pav. Asinchroninės mašinos modelio momento priklausomybė nuo generatoriaus sūkių

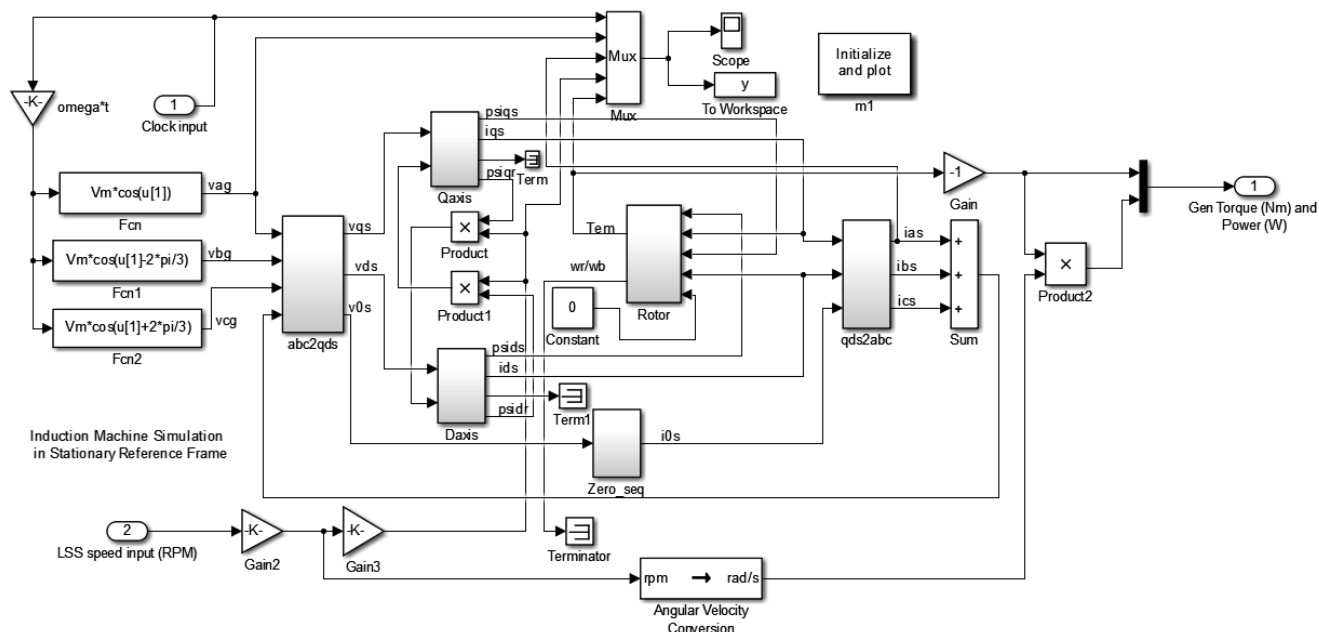
2.4.3. FAST asinchroninės mašinos modelis

FAST asinchroninės mašinos modelis taip pat gali būti pritaikytas asinchroninio generatoriaus skaičiavimams atlikti. Asinchroninės mašinos nustatymai modeliuojamai vėjo jėgainei pateikti 13 lentelėje.

13 lentelė. Asinchroninės mašinos vidiniai parametrai pagal ekvivalentinę schemą

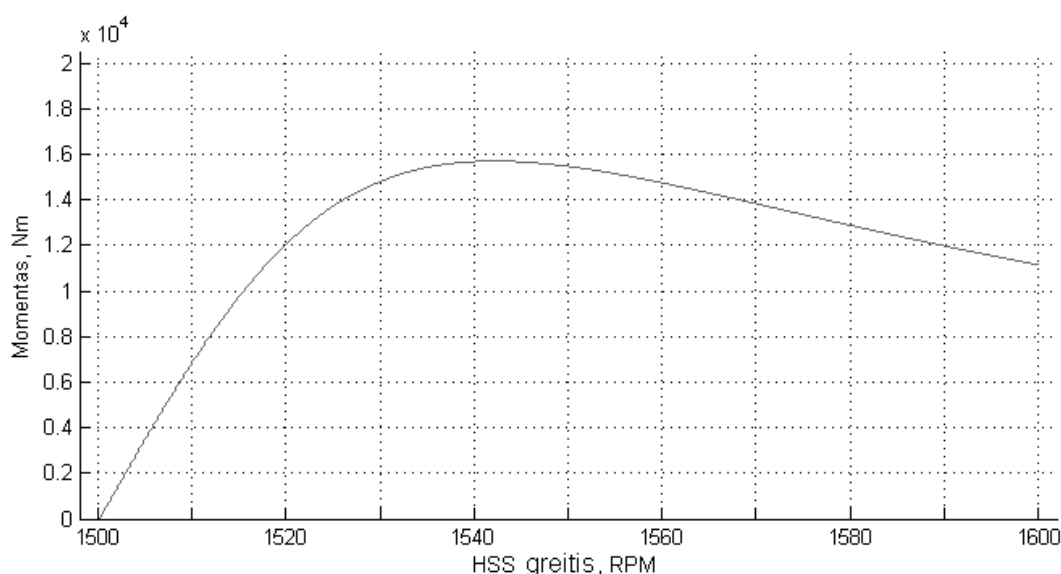
Reikšmė	Vienetai	Žymėjimas	Aprašymas
690	V	TEC_VLL	Įtampa (<i>Line-to-line</i> RMS)
50	Hz	TEC_Freq	Dažnis
0.00265	Ω	TEC_SRes	Statoriaus varža
0.0530	Ω	TEC_SLR	Statoriaus induktyvioji varža
0.00263	Ω	TEC_RRes	Rotoriaus varža
0.0420	Ω	TEC_RLR	Rotoriaus induktyvioji varža
1.720	Ω	TEC_MR	Bendra magnetinė induktyvioji varža
4	(-)	TEC_NPol	Polių skaičius

Asinchroninės mašinos modelio, pritaikyto modeliuoti nelineinius generatoriaus parametrus, schema pateikta 32 paveiksle. Generatoriaus modelis sudarytas pagal amerikiečių mokslininko *Chee-Mun Ong* tobulinamas schemas ir rekomendacijas (Ong 1997).



32 pav. Asinchroninės mašinos modelio schema, pritaikyta asinchroninio generatoriaus skaičiavimams atlikti

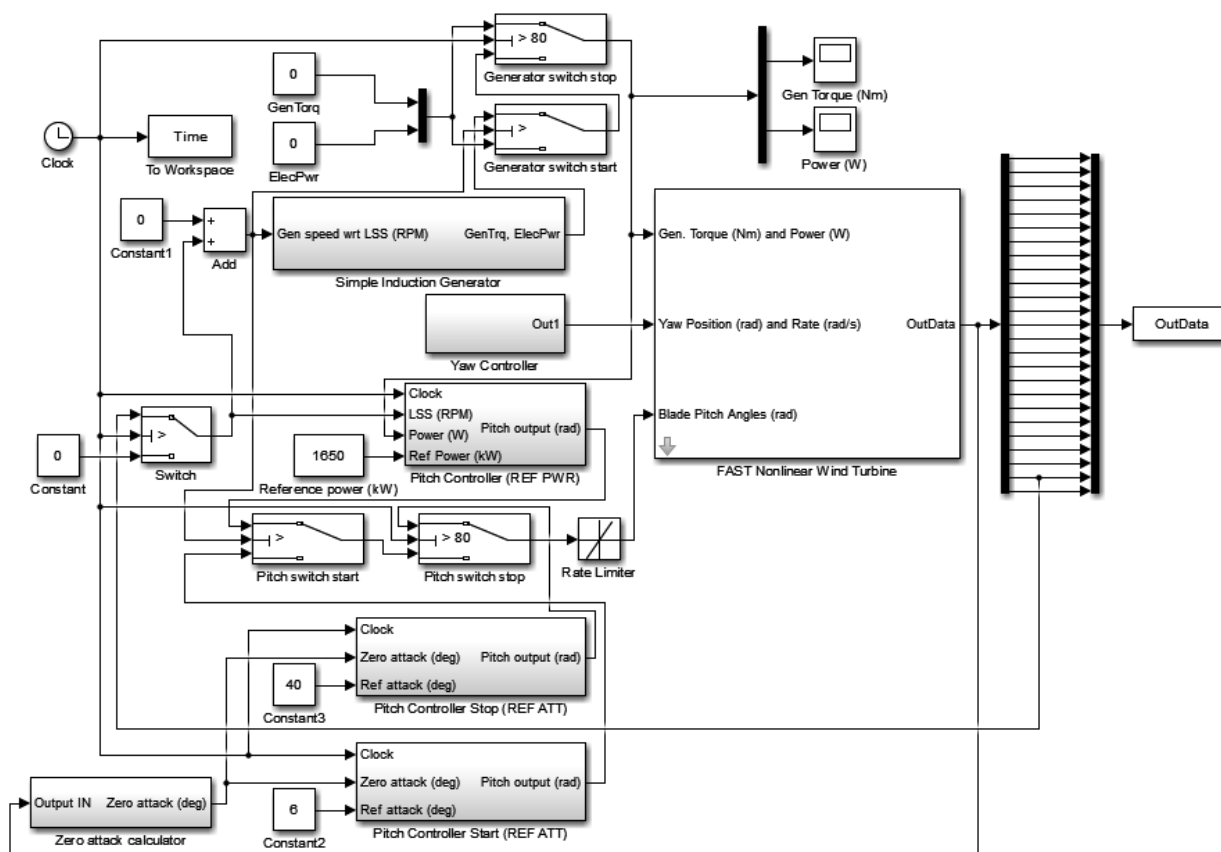
Ši asinchroninės mašinos schema yra universali ir gali būti pritaikyta įvairiems nelineiniams skaičiavimams atlikti. Schema turi LSS įvesties signalą ir momento bei galios išvesties signalus. Simuliacijos metu gauta asinchroninio generatoriaus momento priklausomybė nuo sūkių pateikta 33 paveiksle, kuriame matome, kad nominalus (10350 Nm) modeliujamos jėgainės momentas pasiekiamas esant 1516,76 RPM generatoriaus sūkiams, maksimalus momentas (15698 Nm) pasiekiamas esant 1542,24 RPM generatoriaus sūkiams.



33 pav. Asinchroninės mašinos modelio momento priklausomybė nuo generatoriaus sūkių

2.5. Bendras modelis

Bendras modelis sudaromas *Simulink* aplinkoje ir apjungia visus įvesties, skaičiavimo ir išvesties nustatymus. Šiame modelyje pagrindiniai skaičiavimai atliekami *FAST Nonlinear Wind Turbine* bloke, į kurį jungiasi elektros generatoriaus momento ir galios signalai bei menčių žingsnio kampo dydžiai (krypties valdymas šiame modelyje nenaudojamas). Valdomi reliniai jungikliai prijungia ir atjungia apkrovą bei perjungia menčių žingsnio kampo valdymo režimus.



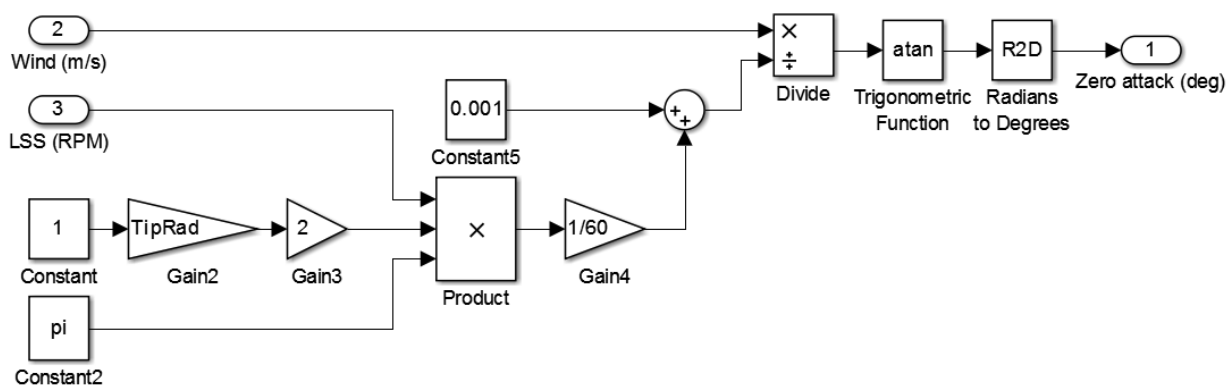
34 pav. Bendra jėgainės modelio schema *Simulink* aplinkoje

2.6. Darbo režimai, išvestis ir rezultatai

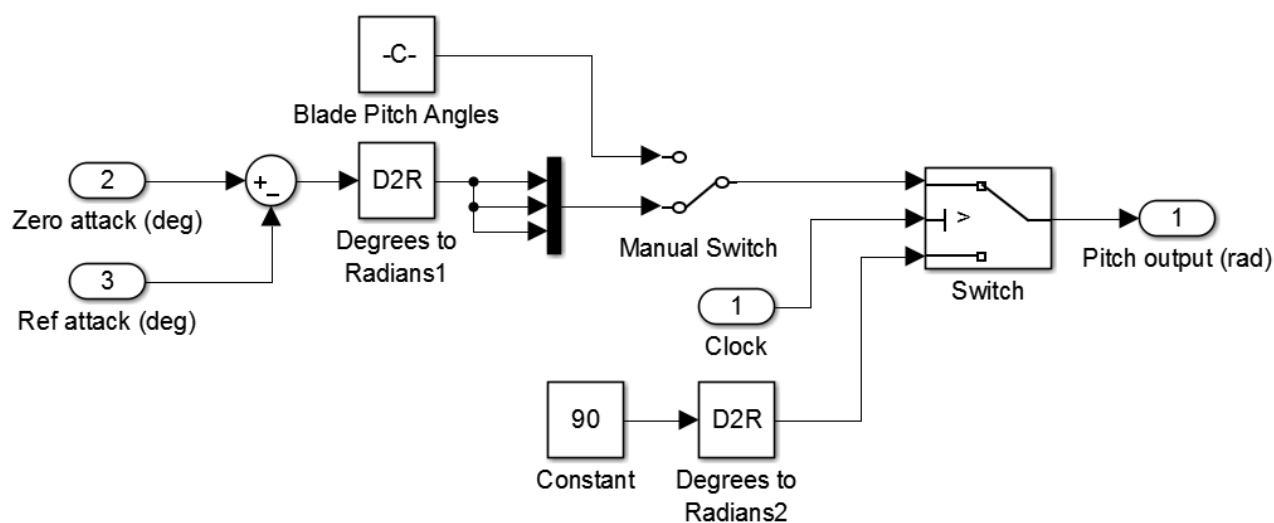
Vėjo jėgainės modelyje skaičiuojami pagrindiniai jėgainės veikimo darbo režimai – paleidimas, pereinamasis procesas prijungus apkrovą, jėgainės veikimas tolygiai ir šuoliškai keičiantis vėjo greičiui, gedimo atveju bei jėgainės išjungimo ir sustabdymo procesas. Pagrindinė modelio schema yra pritaikoma įvairiems skaičiavimams atlikti: pasirenkamas generatoriaus modelis, žingsnio kampo valdikliai, reliniai jungikliai ir indikatoriai. Šiuose modeliuose naudojami fiksuoto ir kintamo žingsnio tiesinių diferencialinių lygčių simuliaciniai metodai ODE: *ode4* (*Runge-Kutta*), *ode45* (*Dormand-Prince*) ir *ode23tb* (*stiff/TR-BDF2*).

2.6.1. Jėgainės paleidimas

Rotoriaus įsukimas pradedamas kai vėjaračio sūčiai lygūs nuliui ir generatoriaus apkrova neprijungta. Nustačius reikiamą menčių žingsnį (išlaikant teigiamą atakos kampą į oro srautą), vėjaratis pradeda sukis. Dėl rotoriaus masės ir inertiškumo įsisukimo procesas yra gana lėtas, todėl modelyje naudojamas jėgainės rotoriaus įgreitinimo iki nominalių sūčių skaičiavimo algoritmas – vėjaračio sūčiams didėjant išlaikomas optimalus fiksuotas atakos kampas į oro srautą. Šiam skaičiavimo algoritmui reikalingas optimalus fiksuotas atakos kampas randamas atliekant kelias simuliacijas su skirtingais atakos kampais ir priartėjimo metodu randamas optimalus, kada vėjaratis įsisuka iki nominalių sūčių per greičiausią laiko tarpą. Vėjaračio menčių atakos kampas priklauso nuo vėjo greičio ir rotoriaus sūčių, todėl modelyje turi būti apskaičiuojamas specialiu skaičiavimo algoritmu. Nulinio atakos kampo skaičiavimo modelis pateiktas 35 paveiksle. Nustatyto fiksuoto atakos kampo skaičiavimo modelis pateiktas 36 paveiksle.

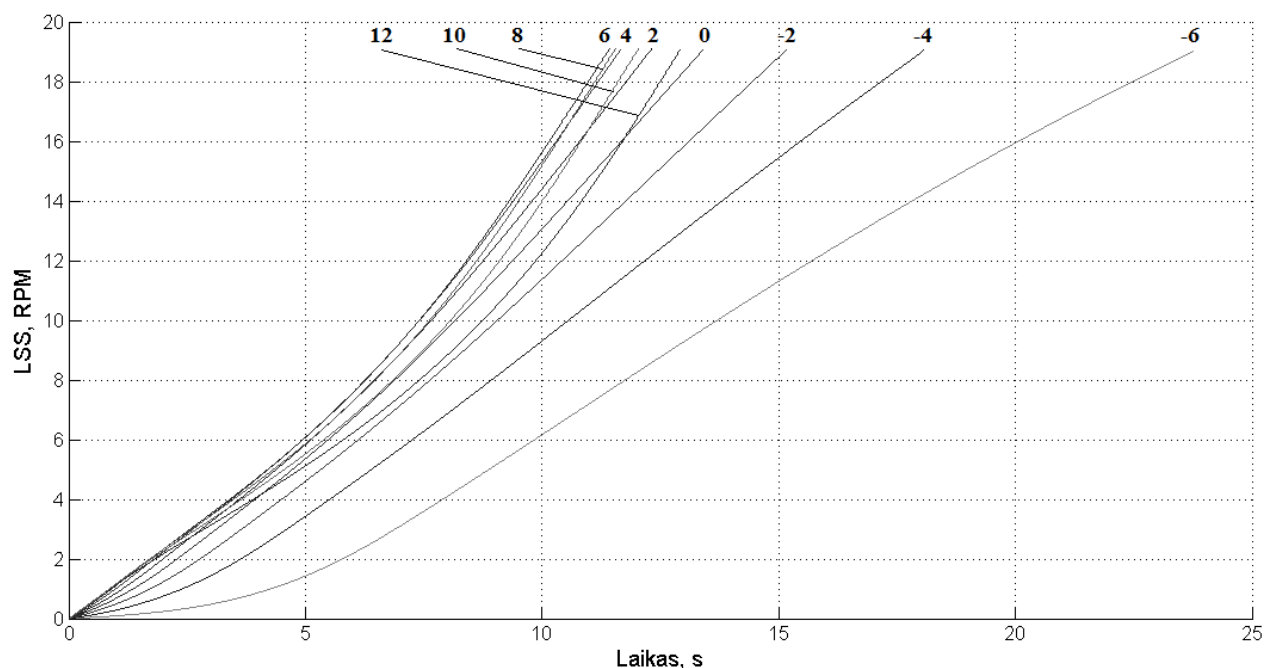


35 pav. Nulinio atakos kampo skaičiavimo modelis (*Zero attack calculator* blokas pagrindiniame modelyje)

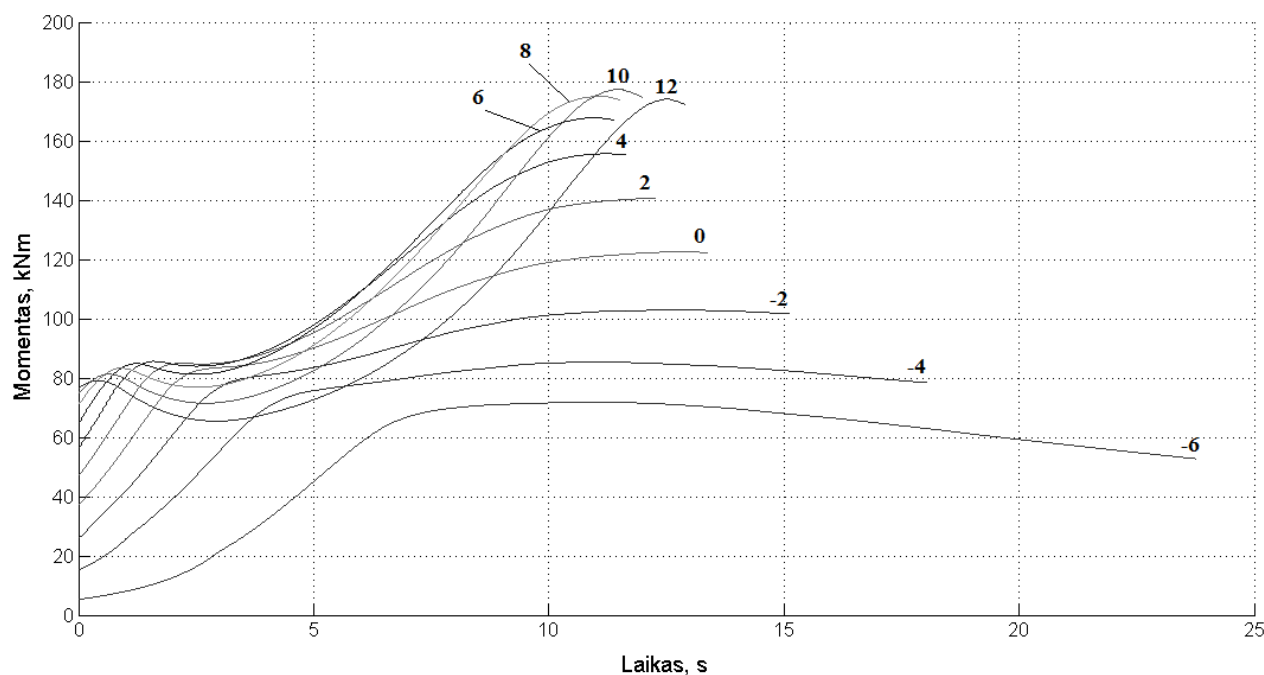


36 pav. Nustatyto fiksuoto atakos kampo skaičiavimo modelis (*Pitch controller start (REF ATT)* blokas pagrindiniame modelyje)

Vėjaračio įsisukimo greičiai esant 12 m/s vėjo greičiui grafiškai pateikti 37 paveiksle ir duomenys – 14 lentelėje. Vėjaračio įsisukimo momento charakteristikos pateiktos 38 paveiksle.



37 pav. Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių charakteristikos prie skirtingų fiksuotų atakos kampų (laipsniais) esant 12 m/s vėjo greičiui



38 pav. Momento charakteristikos vėjaračio įsisukimo metu prie skirtingų fiksuotų atakos kampų (laipsniais) esant 12 m/s vėjo greičiui

Iš 37 paveikslo matyti, kad optimalus fiksuotas atakos kampas, per kurį rotorius įsisuka per trumpiausią laiko tarpą yra 6 laipsniai, tačiau mažai skiriasi nuo 4 ir 8 laipsnių – skirtumas nesiekia 0,5 sekundės. Jei nustatytas atakos kampas mažesnis nei -6 laipsniai, rotorius pradeda sukis į

priešingą pusę. Taip yra dėl naudojamo aerodinaminio profilio charakteristikų – nulinė keliamoji jėga yra maždaug ties -6 laipsnių atakos kampu (jėgainės paleidimo metu žingsnio kampas apie 96 laipsniai).

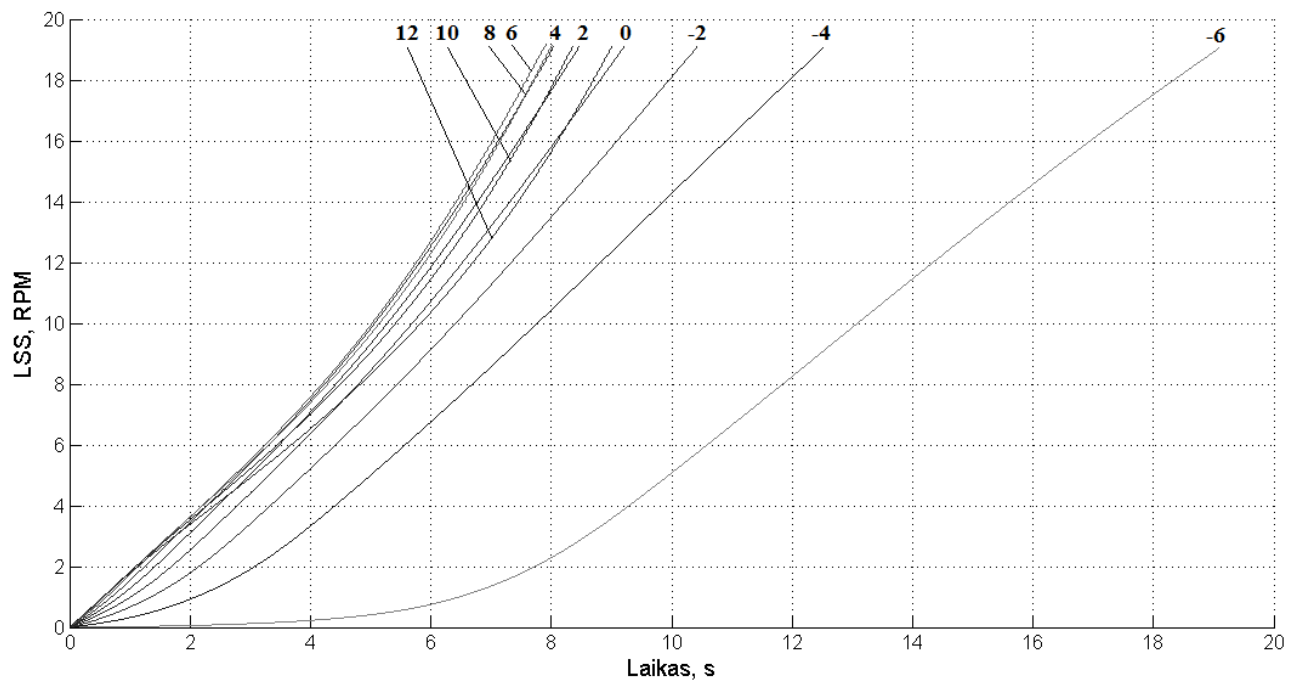
Iš 38 paveikslo matyti, kad momentas esant 12 m/s pastoviam vėjo greičiui laiko atžvilgiu kinta netiesiškai. 12 laipsnių atakos kampo išlaikymo metu iš pradžių momentas yra didelis (siekia 80 kNm), tačiau rotorui pradėjus sukis sumažėja iki 67 kNm, o vėliau vėl pradeda didėti ir maksimalią vertę pasiekia 12-13 sekundę, prieš pat rotorui pasiekiant nominalius sūkius. Išlaikant -6 laipsnių atakos kampą, pradiniu momentu momentas siekia vos 8 kNm, bet rotorui pradėjus sukis padidėja iki 71 kNm, maksimali momento vertė pasiekama 11-12 sekundę, o nominalūs sūčiai pasiekiami tik 23-24 sekundę. Šio reiškimo priežastis – netiesinė aerodinaminio profilio poliarės charakteristika, mentės geometrija bei Reinoldso skaičiaus įtaka. Esant dideliems atakos kampams (6–12 laipsnių) maksimali momento vertė pasiekama 10-12 sekundėmis.

14 lentelė. Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių laiko ir maksimalaus momento charakteristikos prie skirtingų atakos kampų esant 12 m/s vėjo greičiui

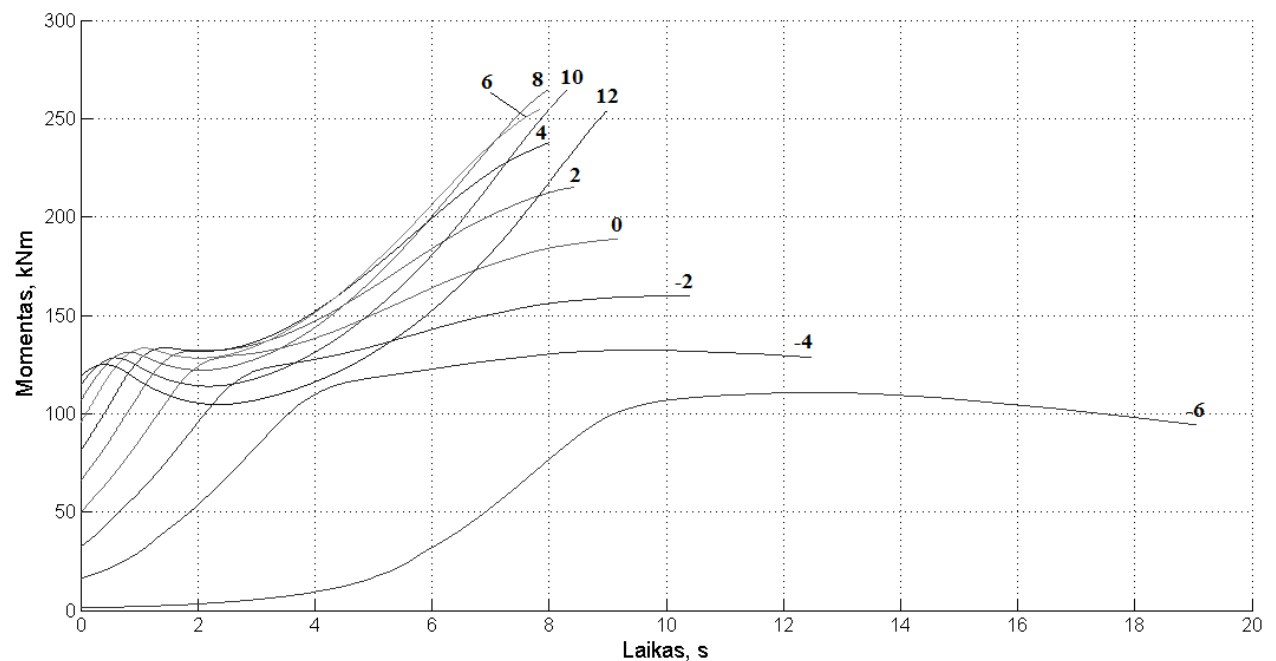
Atakos kampas, laipsn.	Įsisukimo laikas, s	Maksimalus momentas, kN*m
12	12,884	173,0
10	11,980	177,0
8	11,504	175,0
6	11,380	167,7
4	11,620	155,5
2	12,260	140,5
0	13,364	122,4
-2	15,120	103,0
-4	18,032	85,3
-6	23,744	72,0

15 lentelė. Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių laiko ir maksimalaus momento charakteristikos prie skirtingų atakos kampų esant 15 m/s vėjo greičiui

Atakos kampas, laipsn.	Įsisukimo laikas, s	Maksimalus momentas, kN*m
12	8,968	253,4
10	8,320	264,5
8	7,960	264,0
6	7,852	254,5
4	8,004	237,5
2	8,424	215,0
0	9,168	189,0
-2	10,384	160,2
-4	12,488	132,0
-6	19,056	111,0



39 pav. Vėjaračio įsisukimo iki nominalių sūkių charakteristikos prie skirtingų fiksuotų atakos kampų esant 15 m/s vėjo greičiui



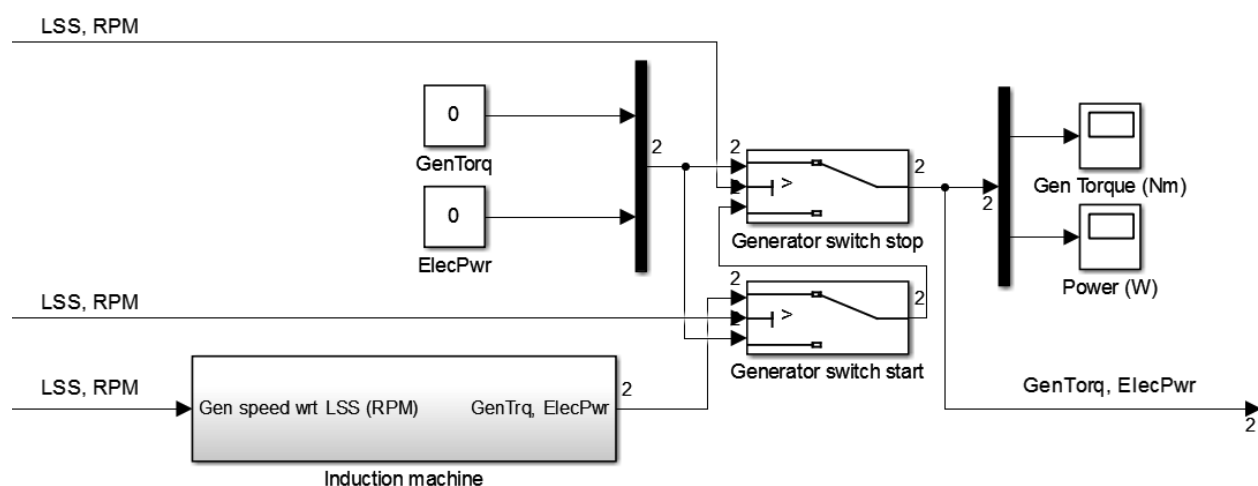
40 pav. Momento charakteristikos vėjaračio įsisukimo metu prie skirtingų fiksuotų atakos kampų esant 15 m/s vėjo greičiui

Iš 39 ir 40 paveikslų matyti, kad rotorius greitėjant esant 15 m/s vėjo greičiui nominalūs sūčiai pasiekiami greičiau nei 12 m/s, tačiau momento maksimali vertė pasiekama esant tik labai mažiems atakos kampams (-6 – -2 laipsniai). Greičiausiai rotorius įsisuka esant 6 laipsnių fiksuotam atakos kampui prie 12 m/s ir 15 m/s vėjo greičio.

2.6.2. Apkrovos prijungimas

Apkrovos prijungimas modeliuojamas perjungiant reikiamus galios signalus iš vieno kanalą į kitus. Šiame modelyje apkrova prijungiama rotorui įsisukus iki nominalių sūkių ir tuo pačiu perjungiami vėjaračio menčių žingsnio kampo valdikliai. Apkrovos prijungimo modelio realizavimas pavaizduotas 41 paveiksle.

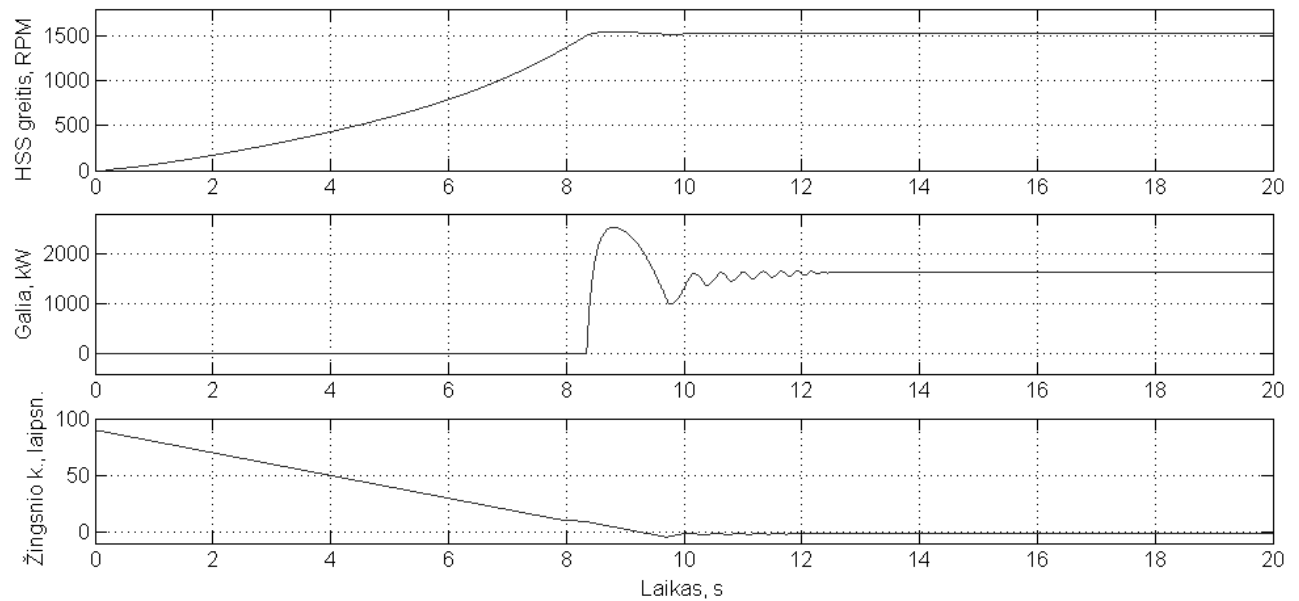
Prijungiant apkrovą įvyksta pereinamieji procesai. Žingsnio valdiklis vėluoja išduoti reikiamo žingsnio kampo signalą, o vėjaračio mentis dėl riboto kampinio sukimosi greičio nespėja pasisukti nustatytu kampų. Tai sukelia sukimo momento ir galios svyravimus. Apkrovos prijungimo charakteristikos nustatytomis sąlygomis pateiktos 42 paveiksle.



41 pav. Apkrovos prijungimo schema naudojant galios signalų perjungimą

Iš 42 paveiksle pateiktų apkrovos prijungimo charakteristikų matyti, kaip įjungus vėjo jėgainę yra įsukamas vėjaratis iki nominalių (18,987 RPM) sūkių ir prijungiama apkrova. Per 0,45 sekundės galia pakyla iki 2525 kW ir staigiai sumažėja iki 1000 kW, toliau vyksta slopstantys galios svyravimai ir per 4 sekundes procesas pilnai stabilizuojasi. Suregulius žingsnio kampo valdymo reguliatorių šių svyravimų amplitudės galima būtų sumažinti ir pereinamasis procesas taptų trumpesnis.

Pagrindiniai vėjaračio menčių žingsnio kampo valdiklio parametrai, lemiantis pereinamojo proceso stabilumą: LSS sūkių ir galios koeficientų reikšmės, PID valdiklio proporcinio ir integralinio koeficientų reikšmės, išėjimo signalo amplitudžių diapazonas, mentės kampinio sukimosi greičio reikšmė.

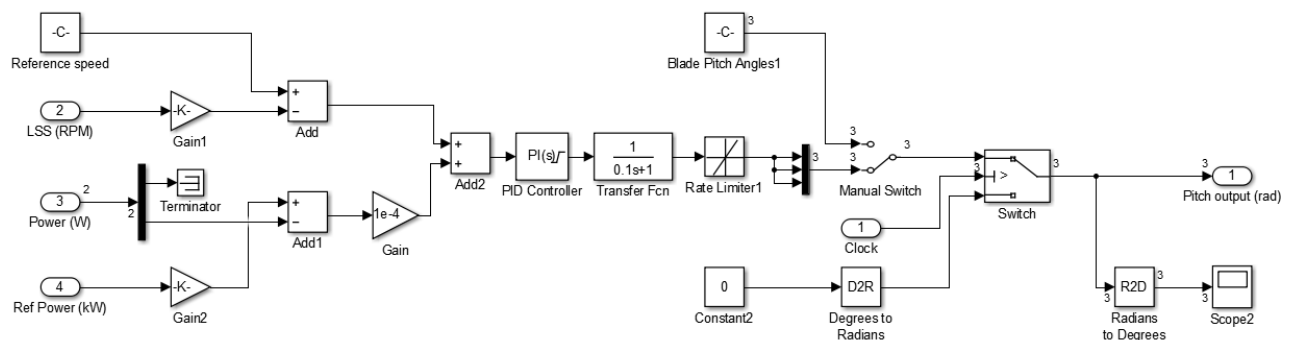


42 pav. Apkrovos prijungimo charakteristika nustatytoms sąlygoms (vėjo greitis 18 m/s)

Pereinamiesiems procesams taip pat turi įtakos mechaninio spyruoklinio slopintuvo tamprumo charakteristikos, vėjaračio menčių lankstumo ir elastingumo savybės bei generatoriaus indukciniai parametrai, kurie naudojant SIG generatoriaus schemą nėra skaičiuojami.

2.6.3. Apkrovos režimai

Jėgainei dirbant apkrovos režime išėjimo galia priklauso nuo trijų pagrindinių veiksnių: tinklo apkrovos, vėjo greičio ir žingsnio reguliavimo. Didėjant vėjo greičiui didėja sukimo momentas ir galia, tačiau pasiekus nominalią galią, ji turi būti palaikoma pastovi. Šiame modelyje galios valdymo procesą vykdo žingsnio reguliatorius, kuris pagal galios ir sūkių įėjimo signalų vertes nustato, kokių žingsniu reikia nustatyti vėjaračio mentis, kad būtų palaikoma pastovi išėjimo galia. Žingsnio kampo reguliatoriaus schema pateikta 43 paveiksle.



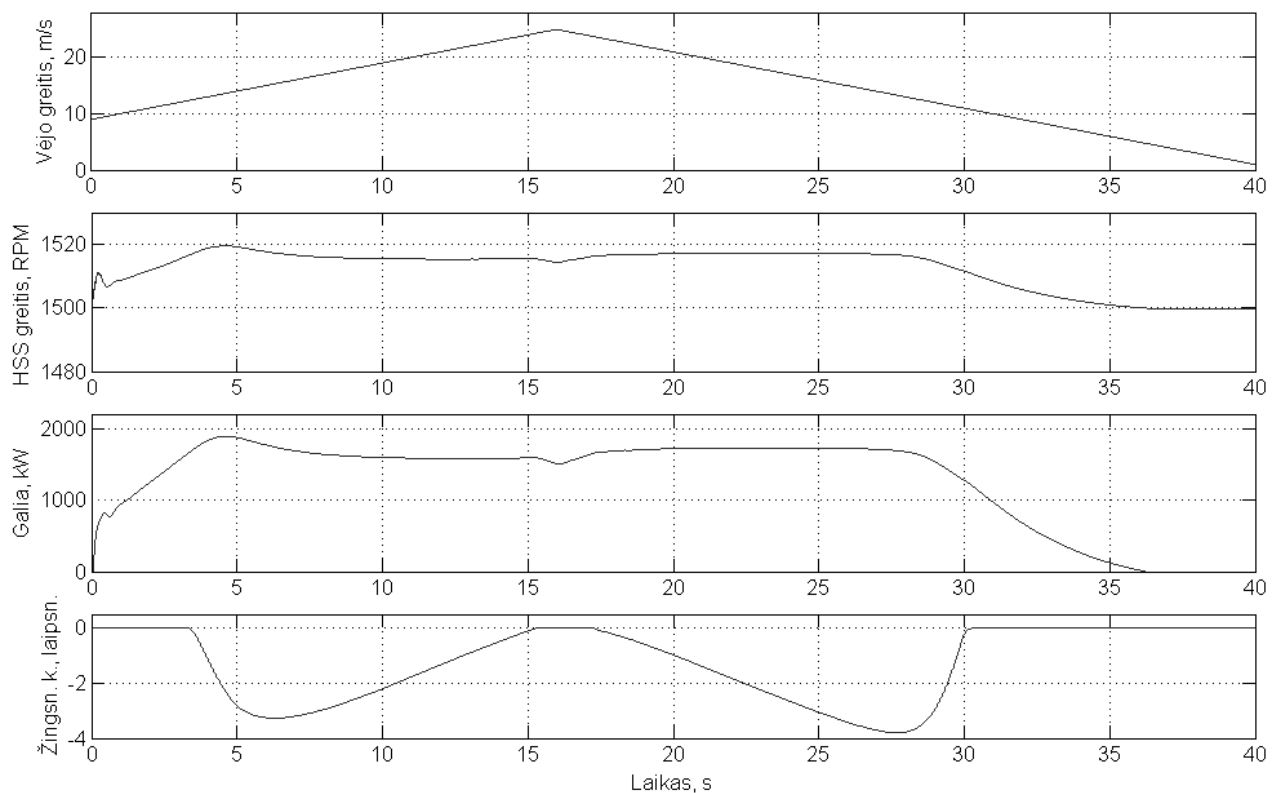
43 pav. Žingsnio kampo kontrolės blokas (*Pitch controller (REF PWR)*) blokas pagrindiniame modelyje)

Pagrindiniai dydžiai, nustatantys žingsnio kampo reguliatoriaus veikimo charakteristiką yra: galios įėjimo signalo įtaka valdymo jautrumui, PID kontrolerio koeficientai ir išėjimo reikšmių amplitudės, ir signalo kitimo greitis, kuris nustato, koku maksimaliu greičiu vėjaračio mentys gali būti pasuktos.

Žingsnio kampo valdymo kontrolės blokas turi būti gerai suderintas pagal jėgainės parametrus, kad pereinami procesai būtų vykdomi sklandžiai. Nesuderintas žingsnio kampo kontrolės blokas gali įvesti jėgainę į rezonansinius procesus, pereinamųjų procesų nestabilumus bei apskritai neleisti jėgainei sklandžiai dirbti nustatytu režimu.

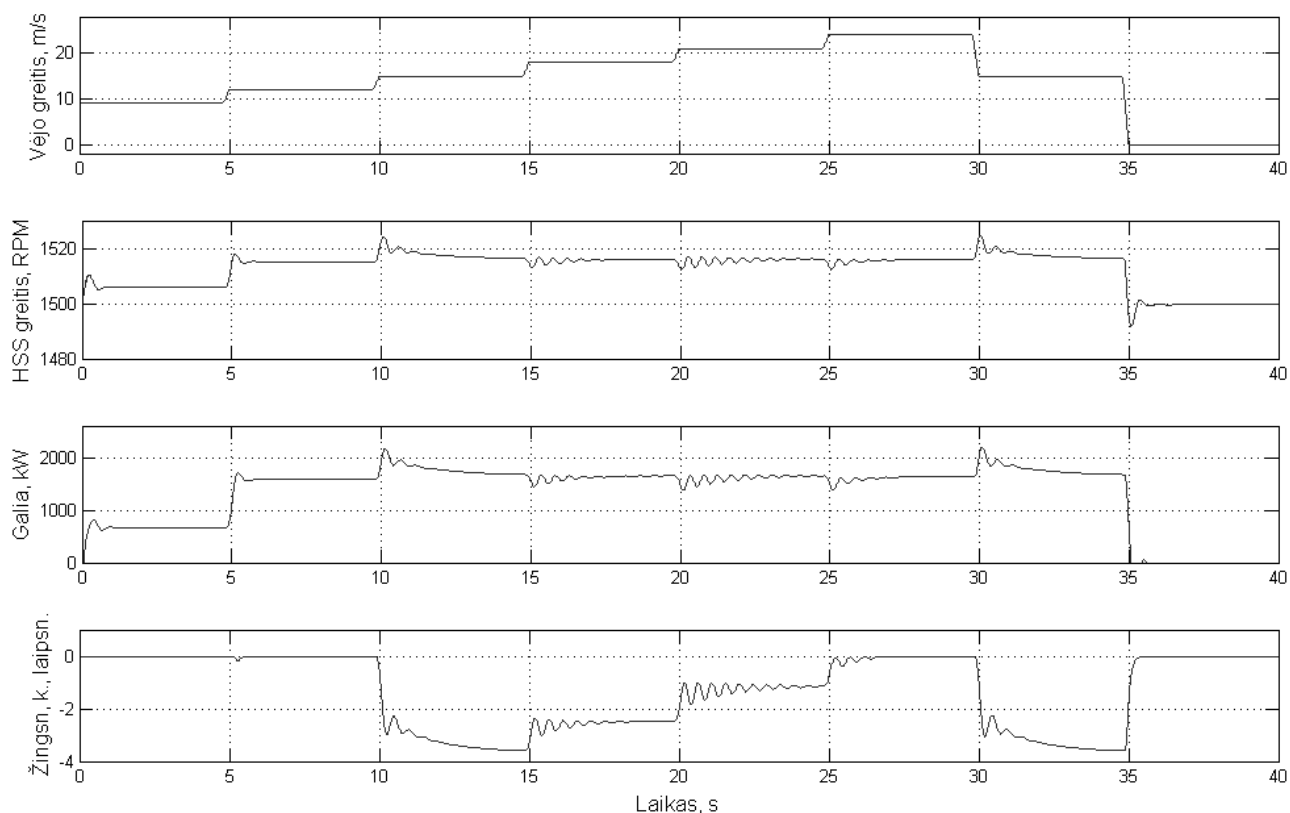
Šiame jėgainės modelyje sudaryto žingsnio valdymo bloko veikimo charakteristikos tikrinamos simuliuojant jėgainės darbą esant tolygiam ir šuoliškai kintamam vėjo greičiui.

44 paveiksle pateikta, kaip kinta generatoriaus greitis, galia ir reguliuojamas žingsnio kampas tolygiai didėjant vėjo greičiui nuo 9 m/s iki 25 m/s ir tolygiai mažėjant iki nulio. Sugeneruojamos galios pokytis priklauso nuo nežymaus generatoriaus greičio pokyčio. Žingsnio valdymo kontrolė pradeda veikti, kai galia viršija nustatytą nominalią išėjimo galią (1,65 MW), tačiau dėl pereinamųjų procesų ir žingsnio kampo valdymo bloko parametrų išėjimo galia kelioms sekundėms būna viršijama kol susistabilizuoja.



44 pav. Jėgainės darbo režimas esant tolygiai kintamam vėjo greičiui

Esant toms pačioms sąlygoms jėgainės darbo režimas modeliuojamas vėjo greičiui keičiantis šuoliškai. Jėgainės darbo režimas esant šuoliškai kintamam vėjo greičiui pateiktas 45 paveiksle.



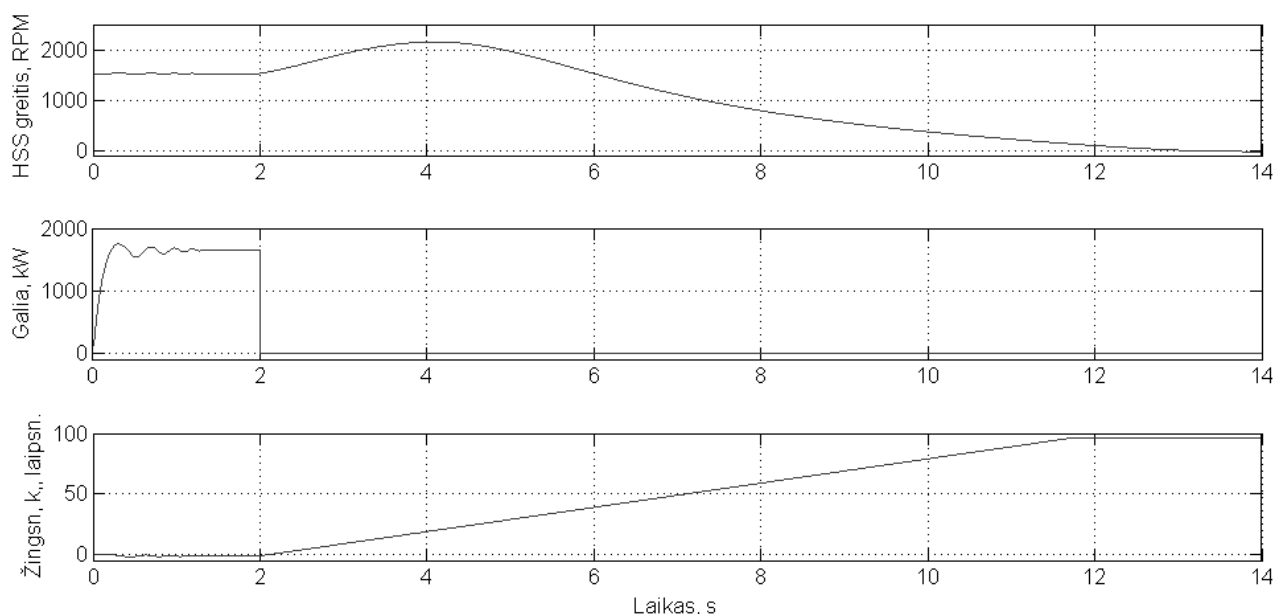
45 pav. Jėgainės darbo režimas esant šuoliškai kintamam vėjo greičiui

Esant šuoliškai kintamam vėjui vėjo jėgainės LSS sūkiai yra linkę į svyravimus, kurie sukelia galios svyravimus visoje sistemoje. Pastebėtina, kad svyravimai atsiranda, kai galia viršija nominalią išėjimo galią ir yra reguliuojama menčių žingsnio kampo reguliatoriumi. Siekiant pagerinti pereinamuosius procesus šuoliškai kintamam vėjo greičiui, būtina suderinti menčių žingsnio kampo reguliatoriaus parametrus.

2.6.4. Apkrovos atjungimas ir jėgainės sustabdymas

Apkrovos atjungimas modeliuojamas tuo pačiu principu, kaip ir apkrovos prijungimo atveju, tik reliniai jungikliai perjungia vėjaračio menčių žingsnio valdymo kontrolę į sustabdymo režimą, o apkrova atjungiama. Atjungus apkrovą vėjaračio mentys turi tolygiai pasisukti 96 laipsnių žingsnio kampu (sustojusio rotorius atakos kampas į oro srautą turi būti lygus -6 laipsniai). Modeliuojamos vėjo jėgainės maksimalus vėjaračio menčių pasukimo greitis yra 10 laipsn./s, todėl šis procesas

negali trukti trumpiau nei 9 sekundės. Apkrovos atjungimo simuliacijos rezultatai pateikti 46 paveiksle.



46 pav. Apkrovos atjungimo ir rotoriaus sustabdymo modelio rezultatai esant 18 m/s vėjo greičiui

Apkrovos atjungimo metu (2 sekundė) vėjaračio mentys maksimaliu greičiu (10 laipsnių per sekundę) pradeda sukis į 96 laipsnių kampo padėtį, tačiau dėl pakankamai lėto sukimosi proceso vėjaračio sūkliai per 2 sekundes pakyla nuo 19,34 RPM iki 27,3 RPM, po to palaipsniui mažėja. Taip atsitinka todėl, kad dingus apkrovai sumažėja pasipriešinimo sukimo momentas ir rotoriaus sūkliai pradeda didėti, o mentims pasiekus reikiamą žingsnio kampą – sūkliai pradeda mažėti. Rotorius pilnai sustoja nenaudojant papildomų stabdžių per 11,1 sekundės nuo apkrovos atjungimo ir stabdymo proceso pradžios.

Esant 15 m/s vėjo greičiui jėgainės rotorius sustos sukis po 12 sekundžių ir pasieks 25 RPM vėjaračio greitį. Esant 12 m/s vėjo greičiui rotorius pasieks tik 22 RPM, o pilnai sustos po 13 sekundžių. Tačiau neveikiant vėjaračio menčių žingsnio kampo kontrolei rotorius prie tam tikro vėjo greičio gali įsisukti iki pavojingai didelio greičio. Šis galimas gedimas analizuojamas sekančiame skyriuje.

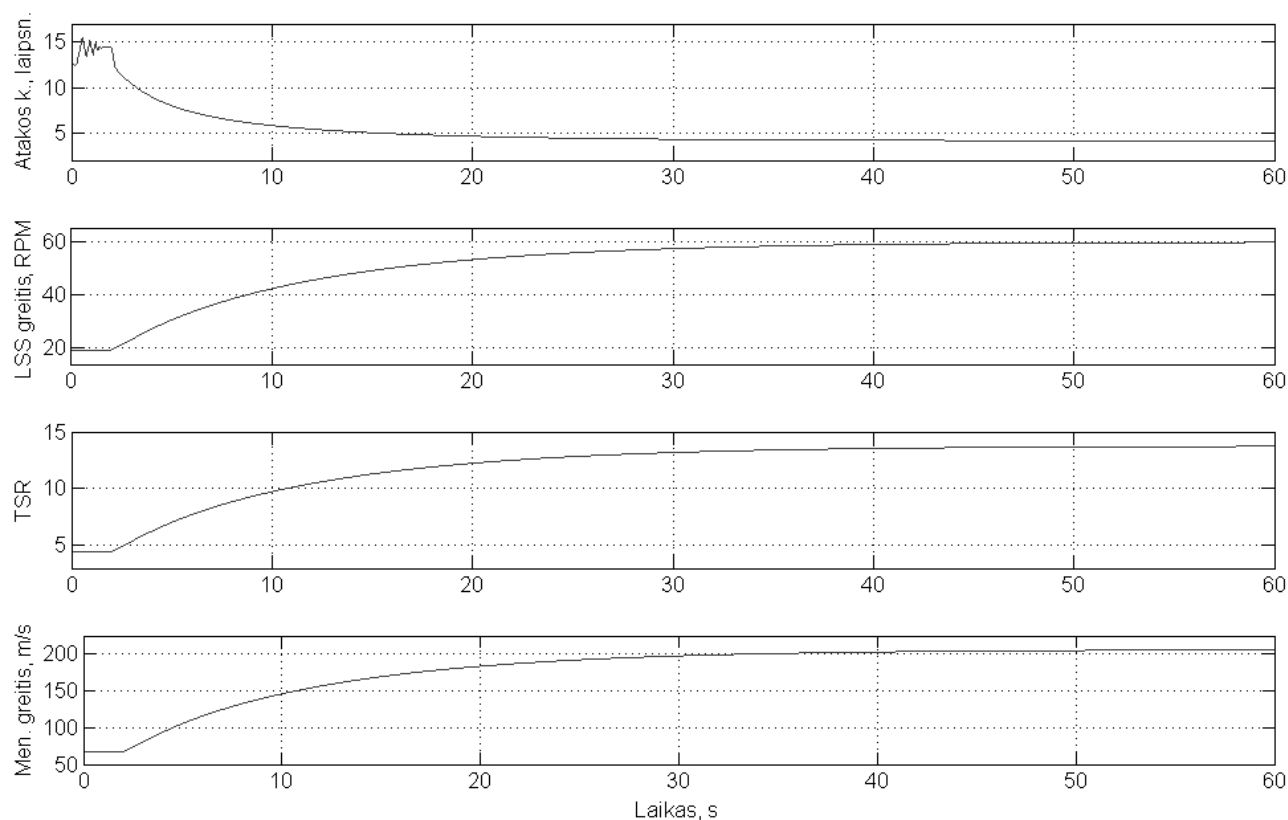
2.6.5. Gedimų atvejų modeliavimas

Nenumatyti vėjo jėgainės techniniai gedimai gali sukelti nuostolingus ir pavojingus padarinius tiek pačiai jėgainei, tiek aplinkai. Esant stipriam vėjui, nesuvaldyta rotoriaus sukaupta kinetinė energija gali nepataisomai sugadinti ar net sunaikinti visą jėgainės konstrukciją. Tai gali įvykti susidarius nepalankioms aplinkybėms, įvykus keliems gedimams bei nesuveikus saugos

sistemoms. Vienas pavojingiausių jėgainės procesų yra nekontroliuojamas rotoriaus sukimasis esant dideliame vėjui. Kompiuterinis modeliavimas leidžia nustatyti proceso eigą, labiausiai procesui įtaką darančius veiksnius bei apskaičiuoti tam tikrus dydžius.

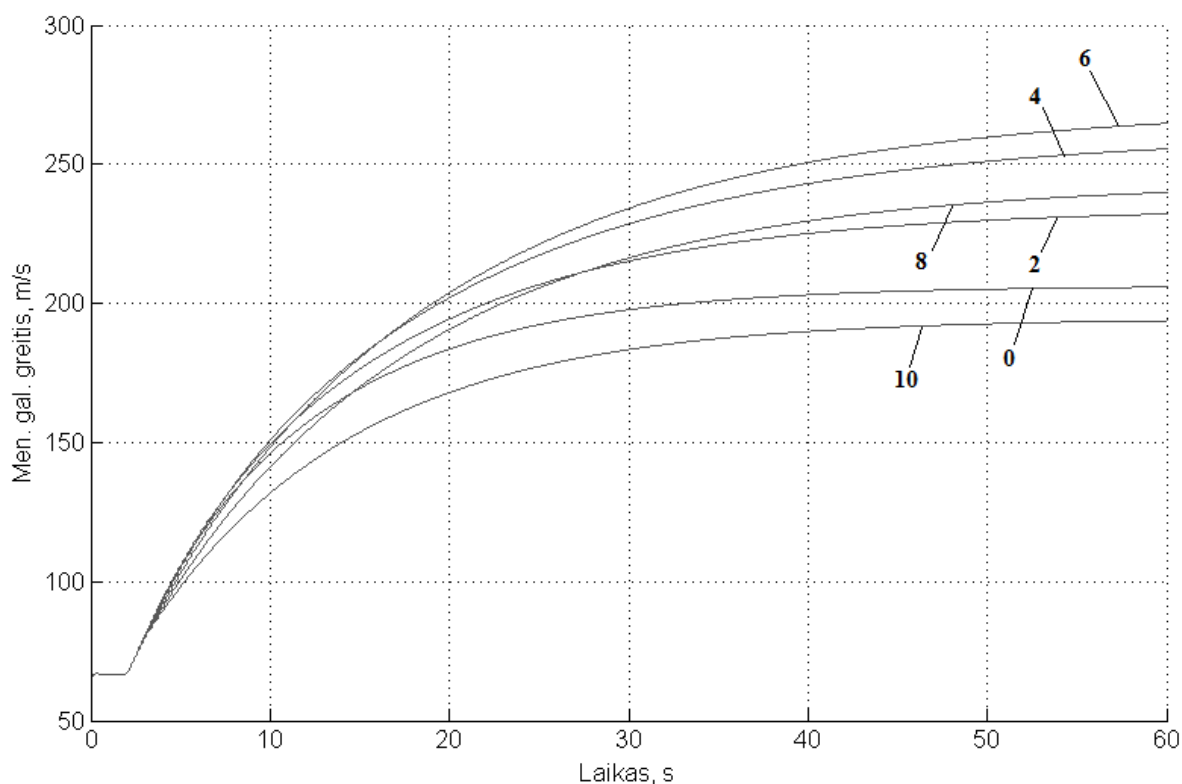
Sugedus vėjaračio menčių žingsnio valdymo kontrolei ir nesant generatoriaus apkrovai vėjaračio įsisuks iki tam tikro greičio, kurį riboja aerodinaminės ir mechaninės charakteristikos. Todėl tikslinga nustatyti pavojingus vėjaračio menčių žingsnio kampo dydžius, ties kuriais užstrigusios mentys pasieks didžiausią rotoriaus įsisukimo greitį. Pasiekus tam tikrus kritinius vėjaračio sukimosi greičius, mentys gali lūžti ir nepataisomai sunaikinti visą jėgainę.

Šiam gedimui modeliuoti naudojama jėgainės išjungimo schema, kai yra atjungiamas generatoriaus apkrova, o vėjaračio menčių žingsnio kampas paliekamas nustatytas. 47 paveiksle pateikti rezultatai, kai jėgainės generatoriaus apkrova atjungiamą, o menčių žingsnio kampas užstringa ties 0 laipsnių (esant 15 m/s vėjo greičiui).



47 pav. Jėgainės charakteristikos dingus apkrovai ir užstrigus menčių žingsnio valdymui esant 15 m/s vėjo greičiui

Rezultatuose matome, kad dingus apkrovai ir užstrigus žingsnio valdymui ties 0 laipsnių jėgainės rotorius, esant 15 m/s vėjo greičiui, per 50 sekundžių įsisuks iki 59,5 aps./min., o menčių galų greitis sieks 205,7 m/s (740,52 km/h). 48 paveiksle pateikti simuliacijų rezultatai su kitais menčių žingsnio kampais.



48 pav. Jėgainės menčių galų greičio charakteristikos dingus apkrovai ir užstrigus menčių žingnio valdymui esant skirtingiems menčių žingsnio kampams

48 paveiksle matome, kokius vėjaračio menčių galų greičius pasieks vėjaratis esant nustatytiems menčių žingsnio kampams be apkrovos. Maksimalų greitį vėjaratis pasieks esant 5-6 laipsnių menčių žingsnio kampui. Pastebėtina, kad gauti greičių rezultatai yra artimi garso greičiui, todėl negali būti laikomi pakankamai tiksliais dėl sudėtingų ir netiesinių viršgarsinės aerodinamikos reiškinių, kurie šiame modelyje nėra skaičiuojami.

2.7. Jēgainēs modifikācijas

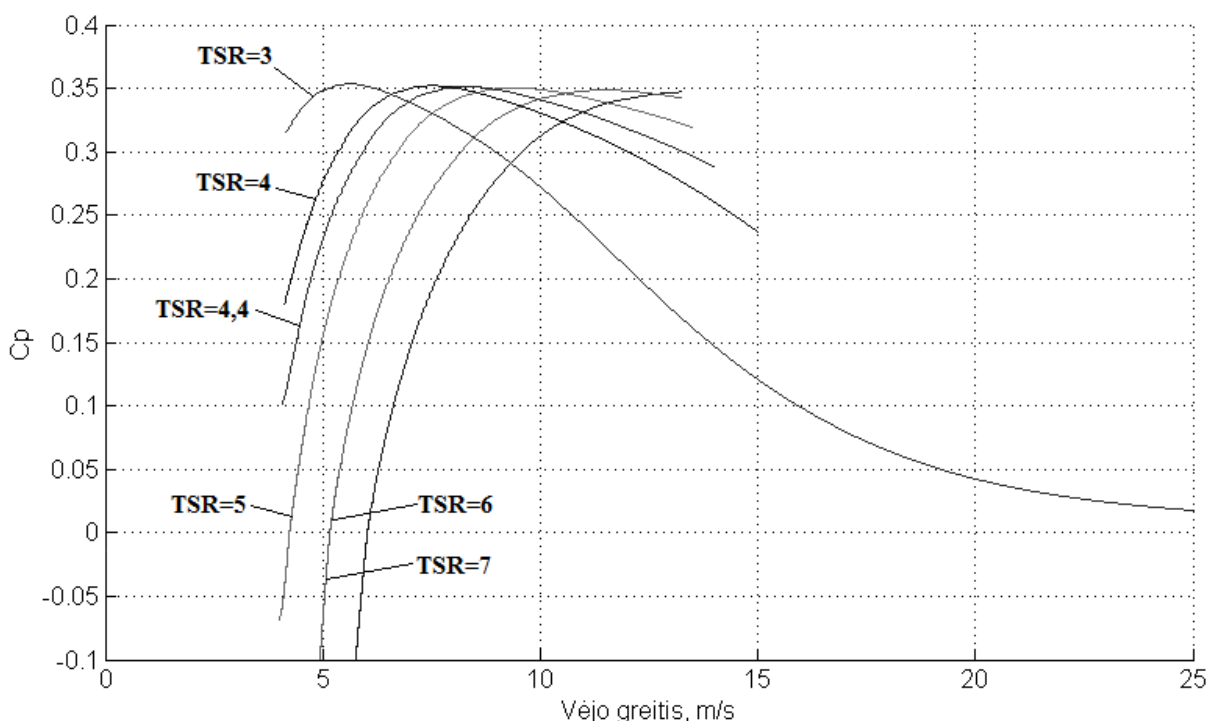
Siekiant iširti, ar tinkamai buvo pasirinktas vėjo jėgainės TSR dydis nominaliai galiai, kuris nusako jėgainės galios charakteristikas, tikslinga atlikti simuliacijas esant skirtingiems TSR. Reikiami rotoriaus perdavimo dydžiai ir simuliacijos duomenys pateikti 16 lentelėje.

Atlikus simuliacijas su skirtingais TSR, bet išlaikant generatoriaus nominalių sūkių sąlygą, gauti rezultatai pateikti 49 paveiksle. Paveiksle matoma galios koeficiento priklausomybė nuo vėjo greičio esant skirtingiems TSR. Simuliacija atlikta naudojant 1,65 MW asinchroninio generatoriaus modelį su 1,5 % magnetinio lauko slydimo koeficientu, esant nominaliai išėjimo galiai. Galios charakteristikos pateiktos iki aktyvios galios kontrolės pradžios, kuri rodo, kad jėgainė pasiekė

nominalią išėjimo galią. Modeliuojamos jėgainės TSR esant nominaliems sūkiams ir greičiui yra 4,4.

16 lentelė. Reikiami dydžiai galios koeficiento skaičiavimams ir simuliacijos kritiniai taškai (Generatoriaus greitis 1500 aps./min., vėjo greitis 15 m/s, vėjaračio skersmuo 66 m)

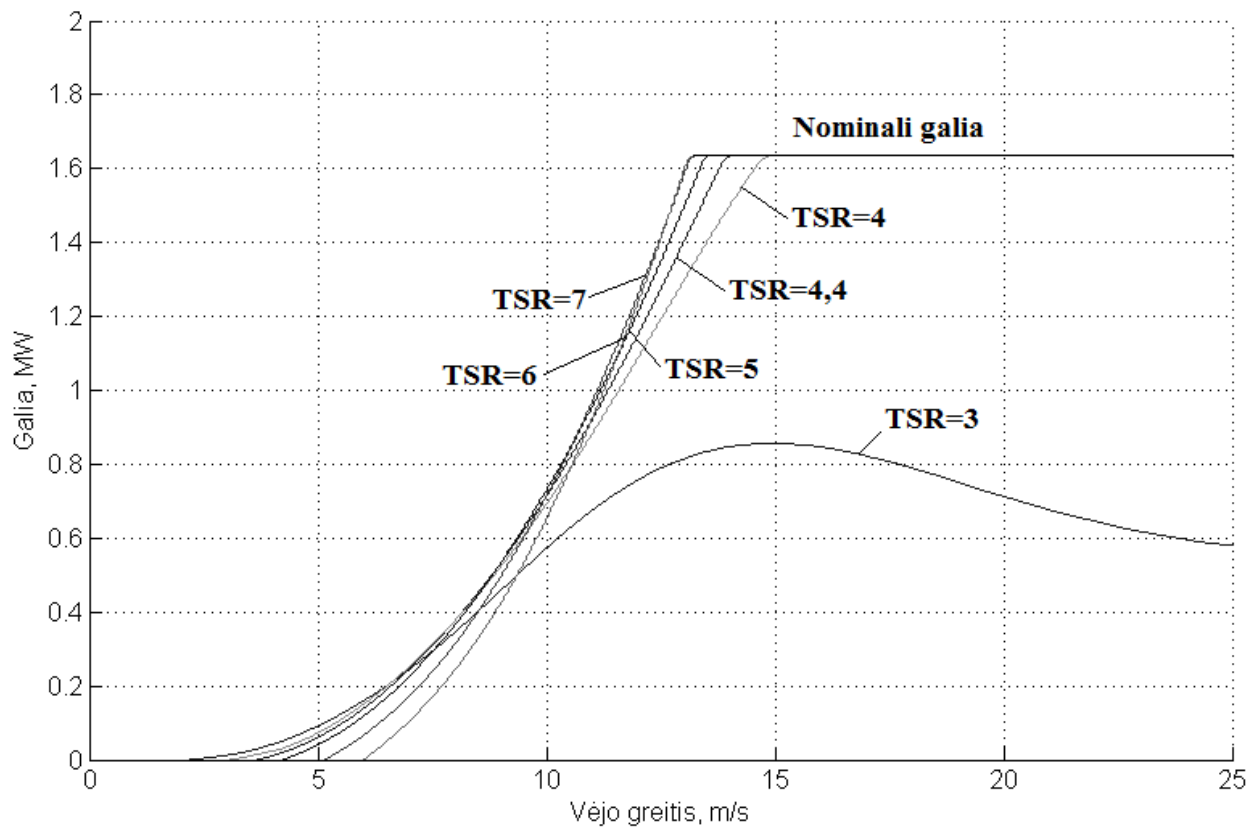
Rotoriaus sūčiai, RPM	Perdavimo santykis	TSR	Menčių galų greitis, m/s	Maksimalaus C_p vėjo greitis, m/s	Galios kontrolės pradžios vėjo greitis, m/s
12,931	116	2,98	44,7	5,6	(nepasiekama)
17,241	87	3,97	59,6	7,4	15
18,987	79	4,37	65,6	8,3	14
21,429	70	4,94	74,1	9,4	13,5
25,862	58	5,96	89,4	11,5	13,2
30,000	50	6,91	103,7	13,3	13,2



49 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo vėjo greičio su skirtingais TSR nominaliam vėjo greičiui

Rezultatuose matyti, kad esant pradinėms sąlygoms galios koeficientas maksimalią vertę pasiekia nuo 7 m/s vėjo greičio. Sumažinus TSR iki 4, maksimali galios koeficiento vertė bus pasiekta esant 6 m/s vėjo greičiui. Galios koeficientas nenusako absoliučios galios, kuri yra pasiekama esant tam tikram vėjo greičiui, todėl tikslinga pateikti galios priklausomybės nuo vėjo greičio rezultatus.

Jėgainės galios kreivės esant skirtingiems TSR pateiktos 50 paveiksle.



50 pav. Galios priklausomybė nuo vėjo greičio nustatytiems TSR (nominaliam vėjo greičiui)

Rezultatuose matoma, kad sumažinus TSR jėgainės maksimali galia padidės esant mažiems vėjo greičiams (nuo 4 iki 3,5 m/s), tačiau padidės nominalios galios pasiekimo vėjo greitis (nuo 13 iki 14,5 m/s). Sumažinus TSR iki 3, maksimali galia nebus pasiekta, jėgainė dirbs neefektyviai ir pasieks tik 860 kW maksimalią galią.

IŠVADOS

Išvados teorinėje dalyje:

- Apžvelgti pagrindiniai vėjo jėgainių parametrai, schemas ir veikimo principai.
- Aprašyti keturi vėjo jėgainėse naudojami generatorių tipai ir jų veikimo principai.
- Išnagrinėta vėjo jėgainių modeliavimo metodika naudojant MATLAB/*Simulink* programinį paketą.
- Nutarta modeliuoti 1,65 MW galios vėjo jėgainės parametrus ir darbo režimus, praplečiant modeliavimo galimybes panaudojant *Simulink* plėtinį FAST.

Išvados tiriamojoje (empirinėje) dalyje:

- Sudarytas pagrindinis tyrime naudojamas vėjo jėgainės V66/1650 modelis *Simulink* aplinkoje naudojant plėtinį FAST.
- Sudarytas duomenų, aprašančių modeliuojamos vėjo jėgainės elementų parametrus, archyvas.
- Sudaryti SIG ir asinchroninių mašinų generatorių modeliai, pagal kurių charakteristikas nustatyta, kad SIG tipo generatoriaus modelis yra tiesinis ir pereinamiems procesams skaičiuoti nėra tinkamas. Apskaičiuota, kad asinchroninių mašinų modelių tarpusavio paklaida yra apie 0,13 %.
- Tiriamos jėgainės modelio apkrovos režime, šuoliškai kintant vėjo greičiui, pereinamų procesų stabilizavimosi laikas siekia 1 sekundę (esant nominalios galios apkrovai). Veikiant galios kontrolei stabilizavimosi laikas siekia 4 sekundes.
- Nustatyta, kad pereinamųjų procesų metu jėgainės galios svyravimai gali siekti 2 MW.
- Nustatyta, kad jėgainės išjungimo ir sustabdymo metu naudojant tik žingsnio kampo kontrolę jėgainės sustabdymo laikas bus 11–13 sekundžių, priklausomai nuo vėjo greičio.
- Jėgainės gedimo atveju dingus apkrovai ir užstrigus žingsnio kampo reguliatoriui, esant nominaliam vėjo greičiui, jėgainės vėjaratis įsisuks iki 59,5 aps./min., o menčių galų greitis sieks 205,7 m/s.
- Ištyrus skirtingų TSR dydžio reikšmių įtaką jėgainės efektyvumui nustatyta, kad siekiant pritaikyti jėgainę mažesniems vėjo greičiams, TSR dydį galima sumažinti iki 4. Taip jėgainė veiktų efektyviau, tačiau sumažėtų efektyvumas esant dideliems vėjo greičiams.

Pasiūlymai:

- Šiame darbe sudarytas ir aprašytas modelis gali būti tobulinamas įdiegiant išorinius mechaninio perdavimo modelius, kurie leistų detaliau ir tiksliau apskaičiuoti pavarų dėžės įtaką modeliuojamos jėgainės efektyvumui.
- Tikslinga ištirti mechaninio slopintuvo ir vėjaračio menčių plastiškumo įtaką pereinamiems procesams.
- Taip pat šiame darbe sukurtą bendrą modelį galima praplėsti panaudojant DFIG ir kitų tipų generatorių modelius bei patobulinti valdymo sistemą.

Literatūros sąrašas:

- Andrejevas, A; Morkūnas, E. 1982. Technikos paminklai Lietuvoje - vėjo malūnai. Vilnius: Mokslas. 163 p.
- Bendikas, T.; Nemūra, A. 2005. Pastovaus greičio vėjo elektrinių parko matematinis modelis. Energetika: Nr. 1, 53-61 p.
- Betz, A. 1966. Introduction to the Theory of Flow Machines. (D. G. Randall, Trans.) Oxford: Pergamon Press.
- Bonanomi, A. 2014. Powerful analysis of wind turbine gearboxes. Technically Speaking. [Interaktyvus], [žiūrėta 2016-09-08] Prieiga per internetą: <<http://www.powertransmissionworld.com/powerful-analysis-of-wind-turbine-gearboxes/>>.
- Brana, I. 2016. Generators in wind turbines. [Interaktyvus], [žiūrėta 2016-09-15] Prieiga per internetą: <<https://isaacbrana.wordpress.com/2010/07/09/generators-in-wind-turbines/>>.
- Dronkers, Job. 2017. Coriolis acceleration. [Interaktyvus], [žiūrėta 2016-03-18] Prieiga per internetą: <http://www.coastalwiki.org/wiki/Coriolis_acceleration>.
- Ganjefar, S. 2014. Improving efficiency of two-type maximum power point tracking methods of tip-speed ratio and optimum torque in wind turbine system using a quantum neural network. Energy: 67(0): 444-453 p.
- Heier, S. 1998. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons Ltd, 1998, ISBN 0-471-97143-X.
- Hoffmann, R. 2002. A comparison of control concepts for wind turbines in terms of energy capture. Doctor dissertation, Darmstadt, 2002. [Interaktyvus], [žiūrėta 2017-03-07] Prieiga per internetą: <http://www.lea.tu-darmstadt.de/media/srt/medien/forschung_5/diss_hoff.pdf>.
- Howell, R. 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, Renewable Energy: 35 (2), pp. 412-422 p.
- Huler, S. 2004. Defining the Wind: The Beaufort Scale, and How a 19th-Century Admiral Turned Science into Poetry. Crown. ISBN 1-4000-4884-2.
- Hussain, A. 2012, Electrical Machines, Dhanpat Rai Publications and Co. 411 p.
- International Standard IEC 61400-1, Third Edition International Electrotechnical Commission, August 2005. Accessed: 12 March 2011.
- Karabanov, M. 2014. Adaptyvus dirbtiniais neuroniniais tinklais grįstas vėjo turbinų valdymas. Klaipėdos universitetas, Informatikos inžinerijos katedra.
- Kytra, S. 2006. Atsinaujinantys energijos šaltiniai. Mokomoji priemonė. Kaunas: Kauno technologijos universiteto leidykla „Technologija“, 302 p.
- Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos. Lietuvos klimatas. Vidutinis

- metinis vėjo greitis ir vyraujančios vėjo kryptys. Klimato norma, 1961–1990 m. [interaktyvus], [žiūrėta 2017-03-19]. Prieiga per internetą: <http://old.meteo.lt/klim_lt_klimatas.php?tipas=vejas>.
- LVEA. Vėjo elektrinių parkai. [interaktyvus], [žiūrėta 2017-04-16]. Prieiga per internetą: <<http://www.lvea.lt/index.php/lt/p/asociacija/vejo-elektriniu-parkai>>.
- Mali, S. S.; Kashare, B. E. 2013. MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines. International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering: Vol. 1, Issue 5 [interaktyvus], [žiūrėta 2016-10-15]. Prieiga per internetą: <<http://www.ijireeice.com/upload/2013/august/7-Shrikant%20Mali-MPPT%20Alogorithms%20Extracting%20maximum.pdf>>.
- Marshall, L.; Buhl, Jr. 2006. A Comparison of Wind Turbine Aeroelastic Codes Used for Certification. To be presented at the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno, Nevada January 9–12, 2006. [interaktyvus], [žiūrėta 2017-04-16]. Prieiga per internetą: <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39113.pdf>>.
- Miley, S. J. 1982. A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications. Prepared by the Department of Aerospace Engineering, Texas A&M University, for Rockwell International Corporation, Energy Systems Group under Subcontract No. PFY12781-W.
- Miller, A. 1997. A variable speed wind turbine power control. IEEE Trans. Energy Convers., vol. 12, Nr. 2, 181–186 p.
- Moler, C. 2004. The Origins of MATLAB. MathWorks. [Interaktyvus], [žiūrėta 2016-11-02] Prieiga per internetą: <<https://se.mathworks.com/company/newsletters/articles/the-origins-of-matlab.html>>.
- Nuaimi, A. M. 2005. Study of using induction generator in wind energy applications. King Saud university. Saudi Arabia: 2005, 7–9 p.
- Ong, C. M. 1997. Dynamic Simulations of Electric Machinery. Prentice Hall PTR: 626 p.
- Ragheb, M. 2014. Components of wind machines. [Interaktyvus], [žiūrėta 2017-05-08] Prieiga per internetą: <<http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Components%20of%20Wind%20Machines.pdf>>.
- Sarkar, S. 2013, Vice President of Development, Virginia Transformer Corp. Transformers for wind turbine generators. [Interaktyvus], [žiūrėta 2017-05-08] Prieiga per internetą: <[http://www.vatransformer.com/resources/files/white%20papers/transformers%20for%20wind%20turbine%20generators%20\(snge%20pg\).pdf](http://www.vatransformer.com/resources/files/white%20papers/transformers%20for%20wind%20turbine%20generators%20(snge%20pg).pdf)>.
- Siemens AG 2011. Efficient transformers for the grid integration of wind power. 91058 Erlangen,

- Germany, 2011 [Interaktyvus], [žiūrėta 2017-05-08] Prieiga per internetą: <https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-transmission/Transformers/Power%20Transformers/Transformers_for_wind-power_EN.pdf>.
- Singh, M. 2014. National Renewable Energy Laboratory. I. Girsang and J. Dhupia Nanyang Technological University. Simulation for Wind Turbine Generators—With FAST and MATLAB-Simulink Modules. 2014. [Interaktyvus], [žiūrėta 2016-11-02] Prieiga per internetą: <<http://www.nrel.gov/publications>>.
- Vaisala Corp. Free Wind and Solar Resource Maps. [interaktyvus], [žiūrėta 2016-09-06]. Prieiga per internetą: <<http://www.vaisala.com/en/energy/support/Resources/Pages/Free-Wind-And-Solar-Resource-Maps.aspx>>.
- Vestas annual report 2016. [interaktyvus], [žiūrėta 2016-09-06]. Prieiga per internetą: <https://www.vestas.com/~/_media/vestas/investor/investor%20pdf/financial%20reports/2015/fy/160209_ca_uk_annual%20report%202015.pdf>.
- WWEA. World Wind Energy Asociation Half-year Report. 2016. [interaktyvus], [žiūrėta 2017-04 16]. Prieiga per internetą: < <http://www.wwindea.org/wwea-half-year-report-worldwind-wind-capacity-reached-456-gw/>>.

A priedas: FAST pagrindinė nustatymų byla V66.fst

```

----- FAST INPUT FILE -----
T.S. Vestas V66/1.65 vejo įėjaines modelis. VGTU. Vilnius, 2017
Compatible with FAST v7.02.00.
----- SIMULATION CONTROL -----
True      Echo      - Echo input data to "echo.out" (flag)
1          ADAMSprep - ADAMS preprocessor mode {1: Run FAST, 2: use FAST as a preprocessor to create an ADAMS model, 3: do both}
(switcho)
1          AnalMode - Analysis mode {1: Run a time-marching simulation, 2: create a periodic linearized model} (switch)
3          NumBl     - Number of blades (-)
20.0       TMax      - Total run time (s)
0.004      DT        - Integration time step (s)
----- TURBINE CONTROL -----
0          YCMode    - Yaw control mode {0: none, 1: user-defined from routine UserYawCont, 2: user-defined from Simulink/Labview}
(switcho)
9999.9     TYCon     - Time to enable active yaw control (s) [unused when YCMode=0]
2          PCMode    - Pitch control mode {0: none, 1: user-defined from routine PitchCntrl, 2: user-defined from
Simulink/Labview} (switch)
0.0        TPCOn     - Time to enable active pitch control (s) [unused when PCMode=0]
3          VSContrl  - Variable-speed control mode {0: none, 1: simple VS, 2: user-defined from routine UserVSCont, 3: user-
defined from Simulink/Labview} (switch)
9999.9     VS_RtGnSp - Rated generator speed for simple variable-speed generator control (HSS side) (rpm) [used only when
VSContrl=1]
9999.9     VS_RtTq   - Rated generator torque/constant generator torque in Region 3 for simple variable-speed generator control
(HSS side) (N-m) [used only when VSContrl=1]
9999.9     VS_Rgn2K  - Generator torque constant in Region 2 for simple variable-speed generator control (HSS side) (N-m/rpm^2)
[used only when VSContrl=1]
9999.9     VS_SlPc   - Rated generator slip percentage in Region 2 1/2 for simple variable-speed generator control (%) [used only
when VSContrl=1]
1          GenModel  - Generator model {1: simple, 2: Thevenin, 3: user-defined from routine UserGen} (switch) [used only when
VSContrl=0]
True       GenTiStr  - Method to start the generator {T: timed using TimGenOn, F: generator speed using SpdGenOn} (flag)
True       GenTiStp  - Method to stop the generator {T: timed using TimGenOf, F: when generator power = 0} (flag)
9999.9     SpdGenOn  - Generator speed to turn on the generator for a startup (HSS speed) (rpm) [used only when GenTiStr=False]
0.0        TimGenOn  - Time to turn on the generator for a startup (s) [used only when GenTiStr=True]
9999.9     TimGenOf  - Time to turn off the generator (s) [used only when GenTiStp=True]
1          HSSBrMode - HSS brake model {1: simple, 2: user-defined from routine UserHSSBr, 3: user-defined from Labview} (switch)
9999.9     THSSBrDp  - Time to initiate deployment of the HSS brake (s)
9999.9     TIDynBrk  - Time to initiate deployment of the dynamic generator brake [CURRENTLY IGNORED] (s)
9999.9     TTPBrDp(1) - Time to initiate deployment of tip brake 1 (s)
9999.9     TTPBrDp(2) - Time to initiate deployment of tip brake 2 (s)
9999.9     TTPBrDp(3) - Time to initiate deployment of tip brake 3 (s) [unused for 2 blades]
9999.9     TBDepISp(1) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 1 (rpm)
9999.9     TBDepISp(2) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 2 (rpm)
9999.9     TBDepISp(3) - Deployment-initiation speed for the tip brake on blade 3 (rpm) [unused for 2 blades]
9999.9     TYawManS  - Time to start override yaw maneuver and end standard yaw control (s)
9999.9     TYawManE  - Time at which override yaw maneuver reaches final yaw angle (s)
0.0        NacYawF   - Final yaw angle for yaw maneuvers (degrees)
9999.9     TPTmManS(1) - Time to start override pitch maneuver for blade 1 and end standard pitch control (s)
9999.9     TPTmManS(2) - Time to start override pitch maneuver for blade 2 and end standard pitch control (s)
9999.9     TPTmManS(3) - Time to start override pitch maneuver for blade 3 and end standard pitch control (s) [unused for 2 blades]
9999.9     TPTmManE(1) - Time at which override pitch maneuver for blade 1 reaches final pitch (s)
9999.9     TPTmManE(2) - Time at which override pitch maneuver for blade 2 reaches final pitch (s)
9999.9     TPTmManE(3) - Time at which override pitch maneuver for blade 3 reaches final pitch (s) [unused for 2 blades]
90.0       BLPitch(1) - Blade 1 initial pitch (degrees)
90.0       BLPitch(2) - Blade 2 initial pitch (degrees)
90.0       BLPitch(3) - Blade 3 initial pitch (degrees) [unused for 2 blades]
90.0       BLPitchF(1) - Blade 1 final pitch for pitch maneuvers (degrees)
90.0       BLPitchF(2) - Blade 2 final pitch for pitch maneuvers (degrees)
90.0       BLPitchF(3) - Blade 3 final pitch for pitch maneuvers (degrees) [unused for 2 blades]
----- ENVIRONMENTAL CONDITIONS -----
9.80665    Gravity   - Gravitational acceleration (m/s^2)
----- FEATURE FLAGS -----
False      FlapDOF1  - First flapwise blade mode DOF (flag)
False      FlapDOF2  - Second flapwise blade mode DOF (flag)
False      EdgeDOF   - First edgewise blade mode DOF (flag)
False      TeetDOF   - Rotor-teeter DOF (flag) [unused for 3 blades]
False      DrTrDOF   - Drivetrain rotational-flexibility DOF (flag)
True       GenDOF    - Generator DOF (flag)
False      YawDOF    - Yaw DOF (flag)
False      TwFADOF1  - First fore-aft tower bending-mode DOF (flag)
False      TwFADOF2  - Second fore-aft tower bending-mode DOF (flag)
False      TwSSDOF1  - First side-to-side tower bending-mode DOF (flag)
False      TwSSDOF2  - Second side-to-side tower bending-mode DOF (flag)
True       CompAero  - Compute aerodynamic forces (flag)
False      CompNoise - Compute aerodynamic noise (flag)
----- INITIAL CONDITIONS -----
0.0        OpPDefl   - Initial out-of-plane blade-tip displacement (meters)
0.0        IPDefl    - Initial in-plane blade-tip deflection (meters)
0.0        TeetDefl  - Initial or fixed teeter angle (degrees) [unused for 3 blades]
0.0        Azimuth   - Initial azimuth angle for blade 1 (degrees)
0.0        RotSpeed  - Initial or fixed rotor speed (rpm)
0.0        NacYaw     - Initial or fixed nacelle-yaw angle (degrees)
0.0        TTDSpFA   - Initial fore-aft tower-top displacement (meters)
0.0        TTDSpSS   - Initial side-to-side tower-top displacement (meters)
----- TURBINE CONFIGURATION -----
33.0       TipRad     - The distance from the rotor apex to the blade tip (meters)
1.75       HubRad     - The distance from the rotor apex to the blade root (meters)
1          PSpnElN    - Number of the innermost blade element which is still part of the pitchable portion of the blade for
partial-span pitch control [1 to BldNodes] [CURRENTLY IGNORED] (-)
0.0        Undstng    - Undersling length [distance from teeter pin to the rotor apex] (meters) [unused for 3 blades]
0.0        HubCM      - Distance from rotor apex to hub mass [positive downwind] (meters)
-3.3       OverHang   - Distance from yaw axis to rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] (meters)
-0.1449    NacCMxN    - Downwind distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
0.0        NacCMYn    - Lateral distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
1.3890     NacCMZn    - Vertical distance from the tower-top to the nacelle CM (meters)
78.0       TowerHt    - Height of tower above ground level [onshore] or MSL [offshore] (meters)
1.6        Twr2Shft   - Vertical distance from the tower-top to the rotor shaft (meters)
0.0        TWrRBHt    - Tower rigid base height (meters)
0.0        ShftTilt   - Rotor shaft tilt angle (degrees)
0.0        Delta3     - Delta-3 angle for teetering rotors (degrees) [unused for 3 blades]
0.0        PreCone(1) - Blade 1 cone angle (degrees)
0.0        PreCone(2) - Blade 2 cone angle (degrees)
0.0        PreCone(3) - Blade 3 cone angle (degrees) [unused for 2 blades]
0.0        AzimBlUp   - Azimuth value to use for I/O when blade 1 points up (degrees)
----- MASS AND INERTIA -----
0.0        YawBrMass  - Yaw bearing mass (kg)
5000.0     NacMass    - Nacelle mass (kg)
11600.0    HubMass    - Hub mass (kg)
0.0        TipMass(1) - Tip-brake mass, blade 1 (kg)
0.0        TipMass(2) - Tip-brake mass, blade 2 (kg)

```

```

0.0      TipMass(3) - Tip-brake mass, blade 3 (kg) [unused for 2 blades]
4600.0   NacYIner - Nacelle inertia about yaw axis (kg m^2)
100.0    GenIner  - Generator inertia about HSS (kg m^2)
1000.0   HubIner  - Hub inertia about rotor axis [3 blades] or teeter axis [2 blades] (kg m^2)
-----
95.0     GBoxEff  - Gearbox efficiency (%)
80.0     GenEff   - Generator efficiency [ignored by the Thevenin and user-defined generator models] (%)
79.0     GBRatio  - Gearbox ratio (-)
False    GBRevers - Gearbox reversal {1: if rotor and generator rotate in opposite directions} (flag)
6000.0   HSSBrTqF - Fully deployed HSS-brake torque (N-m)
0.0      HSSBrTq  - Time for HSS-brake to reach full deployment once initiated (sec) [used only when HSSBrMode=1]
"unused" DynBrkFi - File containing a mech-gen-torque vs HSS-speed curve for a dynamic brake [CURRENTLY IGNORED] (quoted
string)
5.6E9    DTTorSpr - Drivetrain torsional spring (N-m/rad)
1.0E7    DTTorDmp - Drivetrain torsional damper (N-m/(rad/s))
-----
SIMPLE INDUCTION GENERATOR
1.5       SIG_SlPc - Rated generator slip percentage (%) [used only when VSContrl=0 and GenModel=1]
1500.0    SIG_SySp - Synchronous (zero-torque) generator speed (rpm) [used only when VSContrl=0 and GenModel=1]
10350.0   SIG_RtTq - Rated torque (N-m) [used only when VSContrl=0 and GenModel=1]
2.0       SIG_PORT - Pull-out ratio (Tpullout/trated) (-) [used only when VSContrl=0 and GenModel=1]
-----
THEVENIN-EQUIVALENT INDUCTION GENERATOR
50.0      TEC_Freq - Line frequency [50 or 60] (Hz) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
4         TEC_NPoI - Number of poles [even integer > 0] (-) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
0.0185    TEC_SRES - Stator resistance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
0.017     TEC_RRES - Rotor resistance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
690.0     TEC_VLL  - Line-to-line RMS voltage (volts) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
0.0340    TEC_SLR  - Stator leakage reactance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
0.0050    TEC_RLR  - Rotor leakage reactance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
0.7750    TEC_MLR  - Magnetizing reactance (ohms) [used only when VSContrl=0 and GenModel=2]
-----
PLATFORM
0         PtfmModel - Platform model {0: none, 1: onshore, 2: fixed bottom offshore, 3: floating offshore} (switch)
"unused" PtfmFile  - Name of file containing platform properties (quoted string) [unused when PtfmModel=0]
-----
TOWER
10        TwrNodes - Number of tower nodes used for analysis (-)
"VestasTower.dat" TwrFile - Name of file containing tower properties (quoted string)
-----
NACELLE-YAW
0.0       YawSpr   - Nacelle-yaw spring constant (N-m/rad)
0.0       YawDamp  - Nacelle-yaw damping constant (N-m/(rad/s))
0.0       YawNeut  - Neutral yaw position--yaw spring force is zero at this yaw (degrees)
-----
FURLING
False     Furling  - Read in additional model properties for furling turbine (flag)
"unused" FurlFile - Name of file containing furling properties (quoted string) [unused when Furling=False]
-----
ROTOR-TEETER
0         TeetMod  - Rotor-teeter spring/damper model {0: none, 1: standard, 2: user-defined from routine UserTeet} (switch)
[unused for 3 blades]
0.0       TeetDmpP - Rotor-teeter damper position (degrees) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
4.0e4     TeetDmp  - Rotor-teeter damping constant (N-m/(rad/s)) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0.0       TeetCDmp - Rotor-teeter rate-independent Coulomb-damping moment (N-m) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
0.0       TeetSSpP - Rotor-teeter soft-stop position (degrees) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
180.0     TeetHSTP - Rotor-teeter hard-stop position (degrees) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
1.0       TeetSSSP - Rotor-teeter soft-stop linear-spring constant (N-m/rad) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
5.0e6     TeetHSSP - Rotor-teeter hard-stop linear-spring constant (N-m/rad) [used only for 2 blades and when TeetMod=1]
-----
TIP-BRAKE
0.0       TBDrConN - Tip-brake drag constant during normal operation, Cd*Area (m^2)
0.0       TBDrConD - Tip-brake drag constant during fully-deployed operation, Cd*Area (m^2)
0.0       TPBrDT   - Time for tip-brake to reach full deployment once released (sec)
-----
BLADE
"VestasBlade.dat" BldFile(1) - Name of file containing properties for blade 1 (quoted string)
"VestasBlade.dat" BldFile(2) - Name of file containing properties for blade 2 (quoted string)
"VestasBlade.dat" BldFile(3) - Name of file containing properties for blade 3 (quoted string) [unused for 2 blades]
-----
AERODYN
"V66.ipt" ADFile  - Name of file containing Aerodyn input parameters (quoted string)
-----
NOISE
"unused" NoiseFile - Name of file containing aerodynamic noise input parameters (quoted string) [used only when CompNoise=True]
-----
ADAMS
"VestasAdams.dat" ADAMSFile - Name of file containing ADAMS-specific input parameters (quoted string) [unused when ADAMSPrep=1]
-----
LINEARIZATION CONTROL
"VestasLinear.dat" LinFile  - Name of file containing FAST linearization parameters (quoted string) [unused when AnaMode=1]
-----
OUTPUT
True       SumPrint - Print summary data to "<RootName>.fsm" (flag)
1         OutFileFmt - Format for tabular (time-marching) output file(s) (1: text file [<RootName>.out], 2: binary file
[<RootName>.outb], 3: both) (switch)
True      TabDelim  - Use tab delimiters in text tabular output file? (flag)
"ES10.3E2" OutFmt   - Format used for text tabular output (except time). Resulting field should be 10 characters. (quoted
string) [not checked for validity]
0.0       TStart   - Time to begin tabular output (s)
5         DecFact  - Decimation factor for tabular output {1: output every time step} (-)
1.0       SttTime  - Amount of time between screen status messages (sec)
0.0       NcIMUXn  - Downwind distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0.0       NcIMUyn  - Lateral distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0.0       NcIMUzn  - Vertical distance from the tower-top to the nacelle IMU (meters)
0.2       ShftGagL - Distance from rotor apex [3 blades] or teeter pin [2 blades] to shaft strain gages [positive for upwind
rotors] (meters)
0         NTWGages - Number of tower nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)
0         TwrGagNd - List of tower nodes that have strain gages [1 to TwrNodes] (-) [unused if NTWGages=0]
3         NB1Gages - Number of blade nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)
3,5,7     BldGagNd - List of blade nodes that have strain gages [1 to BldNodes] (-) [unused if NB1Gages=0]
OutList   - The next line(s) contains a list of output parameters. See OutList.xlsx for a listing of available output
channels, (-)
"LSSGagPxa, TeetDef1" - LSS gage azimuth and teeter angles
"TipDxb2,TipDyb2"    - Blade 2 flapwise and edgewise tip deflections
"TipALxb2,TipALyb2"  - Blade 2 flapwise and edgewise tip accelerations
"Spn2ALxb1,Spn2ALyb1" - Blade 1 local flapwise and edgewise accelerations at gage #2 (Node #5)
"YawBrMzn"           - Tower-top / yaw bearing yaw moment
"TwBrSMzt"           - Tower base yaw moment
"RotPwr"             - Rotor power (kw)
"RotCp"              - Rotor power coef ()
"HSShftPwr"          - HSS power (kw)
"HSShftCp"           - HSS power coef ()
"WindVxi"            - wind velocity (m/s)
"HorwndDir"          - wind direction (deg)
"BldPitch1"          - Pitch angle (deg)
"TipSpdRat"          - Tip Speed Ratio (TSR)
"RotTorq"            - Rotor torque (kN*m)
"GenSpeed"           - Generator speed (RPM)
"GenTq"              - Generator torque (kN*m)
"GenPwr"             - Electrical generator power (kw)
"GenCp"              - Electrical generator power coef ()
"LSSGagVxa"          - LSS rotor speed (RPM)
"LSSGagPxa"          - Blade position (deg)
END of FAST input file (the word "END" must appear in the first 3 columns of this last line).
-----

```

B priedas: FAST AERODYN pagrindinė aerodinaminių nustatymų byla V66.ipt

T.S. Vestas V66/1.65 vėjo jėgaines modelis. VGTU. Vilnius, 2017.

```

SI                      SysUnits - System of units for used for input and output [must be SI for FAST] (unquoted
string)
STEADY                  StallMod - Dynamic stall included [BEDDOES or STEADY] (unquoted string)
NO_CM                   UseCm    - Use aerodynamic pitching moment model? [USE_CM or NO_CM] (unquoted string)
EQUIL                  InfModel - Inflow model [DYNIN or EQUIL] (unquoted string)
SWIRL                   IndModel - Induction-factor model [NONE or WAKE or SWIRL] (unquoted string)
0.005                  AToler   - Induction-factor tolerance (convergence criteria) (-)
PRANDt1                TLModel  - Tip-loss model (EQUIL only) [PRANDt1, GTECH, or NONE] (unquoted string)
NONE                   HLMModel - Hub-loss model (EQUIL only) [PRANDt1 or NONE] (unquoted string)
"Vestas.wnd"           windFile - Name of file containing wind data (quoted string)
79.6                   HH        - wind reference (hub) height [TowerHt+Twr2Shft+OverHang*SIN(ShftTilt)] (m)
0.0                    TwrShad   - Tower-shadow velocity deficit (-)
100.0                  ShadHwid  - Tower-shadow half width (m)
3.0                    T_Shad_Refpt - Tower-shadow reference point (m)
1.225                  AirDens   - Air density (kg/m^3)
1.4600E-05             KinVisc  - Kinematic air viscosity (m^2/sec)
1.0000E-03             DTAero   - Time interval for aerodynamic calculations (sec)
4                      NumFoil  - Number of airfoil files (-)
"VestasAeroData/cylinder.dat" FoilNm  - Names of the airfoil files [NumFoil lines] (quoted strings)
"VestasAeroData/airfoil2.dat"
"VestasAeroData/airfoil3.dat"
"VestasAeroData/airfoil4.dat"
15                      BldNodes - Number of blade nodes used for analysis (-)
RNodes  AeroTwst  DRNodes  Chord  NFoil  PrnElm
2.79167 11.10    2.08333 1.949 1      NOPRINT
4.87500 11.10    2.08333 2.269 2      NOPRINT
6.95833 11.10    2.08333 2.589 2      NOPRINT
9.04167 10.41    2.08333 2.743 2      NOPRINT
11.12500 8.38     2.08333 2.578 2      NOPRINT
13.20833 6.35     2.08333 2.412 2      NOPRINT
15.29167 4.33     2.08333 2.247 2      NOPRINT
17.37500 2.85     2.08333 2.082 3      NOPRINT
19.45833 2.22     2.08333 1.916 3      NOPRINT
21.54167 1.58     2.08333 1.751 3      NOPRINT
23.62500 0.95     2.08333 1.585 3      NOPRINT
25.70833 0.53     2.08333 1.427 3      NOPRINT
27.79167 0.38     2.08333 1.278 3      NOPRINT
29.87500 0.23     2.08333 1.129 4      NOPRINT
31.95833 0.08     2.08333 0.980 4      NOPRINT

```

C priedas: FAST vėjo parametrų nustatymų byla Vestas.wnd

```

! wind file
! Time    Wind Speed    Wind Dir    Vert. Shear    Horiz. Shear    Vert. Shear    LinV Shear    Gust Speed
0.0       9.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
0.1       9.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
4.8       9.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
5.0       12.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
9.8       12.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
10.0      15.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
14.8      15.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
15.0      18.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
19.8      18.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
20.0      21.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
24.8      21.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
25.0      24.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
29.8      24.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
30.0      15.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
34.8      15.0     0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
35.0      0.01    0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
999.8     0.01    0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0

```