Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Tehniskā fakultāte

Enerģētikas institūts



Mg.sc.ing. Toms Komass

promocijas darbs

VERTIKĀLĀS ASS VĒJA ROTORA ENERGOEFEKTIVITĀTES UZLABOŠANA AR SPĀRNU LEŅĶA AKTĪVO REGULĒŠANU

ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR VERTICAL AXIS WIND ROTOR WITH ACTIVE PITCH CONTROL

Dr.sc.ing. zinātniskā grāda iegūšanai

Lauksaimniecības nozares Lauksaimniecības inženierzinātnes apakšnozarē

Promocijas darba vadītājs Profesors Dr.habil.sc.ing Andris Šnīders	
Promocijas darba konsultants Docents Dr.sc.ing. Vitālijs Osadčuks	

Promocijas darba autors

Jelgava

2017

INFORMĀCIJA

Darba izpilde: Pētījumi tika veikti laika posmā no 2010. gada 1. septembra līdz 2017. gada 1. aprīlim Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Enerģētikas institūtā.

Promocijas darba vadītājs: Dr.habil.sc.ing., profesors Andris Šnīders.

Zinātniskā darba aprobācija: Zinātniskā darba izstrādes laikā tika publicēti 7 zinātniskie raksti, no kuriem 7 atbilst vispāratzītiem recenzējamiem zinātniskajiem rakstiem. Par pētnieciskajiem rezultātiem ziņots ar uzstāšanos 4 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kuras notika Latvijā un Lietuvā.

Publikācijas vispāratzītos recenzējamos zinātniskajos izdevumos

- Komass T. (2013) Load Effect on the Dynamic Parameters of the Wind Station. In:19th International scientific conference ,, Research for rural development 2013": Proceedings, 2013. Latvia, Jelgava.
- 2. Komass T. (2013) Vertical Axes Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator Simulation in MATLAB SIMULINK. In: 13th International scientific conference "Engineering for rural development": Proceedings, Latvia, Jelgava.
- 3. Komass T., Sniders A. (2013) Design and Verification of the Vertical Axis Wind Turbine Simulation Model. In: 14th International scientific conference "Engineering for rural development": Proceedings, May 29-30, 2014. Latvia, Jelgava,.
- 4. Komass T. (2015) VAWT Blade Aerodynamic Torque Analysis with the Help of Matlab Tools. *American Journal of Energy and Power Engineering*, Vol.2, No.2, p. 20-26.
- 5. Komass T. (2015) Mathematical Modelling and Calculation of Vertical Axis Wind Turbine Pitch System Using Matlab Tools, *AASCIT Journal of Energy*, Vol.2, No.3, p.9-15.
- 6. Komass T. (2015) Vertical Axes Wind Turbine with Permanent Magnet Generator Emergency Brake System Simulation in MATLAB Simulink. *International Journal of Engineering Research and General Science*, Vol.4, Iss.3, p. 12-17.
- 7. Komass T. (2016) Experimental Analysis of Vertical Axis Wind Turbine Active Pitch Control System with Permanent Magnet Synchronous Motor using MATLAB Simulink tools. *Journal ENERGETIKA*, Vol.62, No. 1-2, p. 56-68.

Ziņojumi zinātniskajās konferencēs

- Komass T. (2013) Load Effect on the Dynamic Parameters of the Wind Station. In:19th International scientific conference ,,Research for rural development 2013", May 15-17, 2013. Latvia, Jelgava: LLU.
- 2. Komass T. (2013) Vertical Axes Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator Simulation in MATLAB SIMULINK. In: 13th International scientific conference "Engineering for rural development", May 23-24, 2013. Latvia, Jelgava: LLU.
- 3. Komass T., Sniders A. (2013) Design and Verification of the Vertical Axis Wind Turbine Simulation Model. **In:** *14th International scientific conference "Engineering for rural development"*: Proceeding, May 29-30, 2014. Latvia, Jelgava: LLU.
- Komass T. (2016) Experimental Analysis of Vertical Axis Wind Turbine Active Pitch Control System with Permanent Magnet Synchronous Motor using MATLAB Simulink tools. In: 13th International Conference of young scientists on energy issues: Proceeding, May 26, 2016. Lithuania, Kauna.

Pētniecisko rezultātu patenti

- 1. Komass T., Zhivets A., (2014) *Controlling Vertical Axis Rotor-Type Wind Turbine*. World Intellectual Property Organisation Nr.WO2014/162312 A1, 09.10.2014.
- 2. Komass T., Šnīders A. (2014) Vertikālās Ass Vēja Turbīnas Spārnu Stiprinājuma Skava ar Aptveršanas Principu. LR Patents Nr.14910-B, 20.12.2014.

Publikācijas citos pētījuma novirzienos

- 1. Komass T. (2012) Solid fuel boiler automation for briquette use. **In:** *18th International scientific conference "Research for rural development 2012"*: Proceedings, 2012. Latvia, Jelgava:LLU.
- 2. Komass T., Sniders A. (2012) Statistical Analyses of Municipal Heat Supply In: 11th International scientific conference "Engineering for rural development": Proceedings, 2012. Latvia, Jelgava: LLU.
- 3. Sniders A., Komass T. (2012) Invariant Method of Load Independent Pressure Control in Steam Boiler. In: 53rd International scientific conference of Riga Technical University dedicated to the 150th anniversary of Riga Polytechnic Institute: Proceedings, 2012. Latvia, Riga: RTU.
- 4. Sniders A., Komass T. (2013) Simulation of Multi-Link Invariant Control System for Steam Boiler. In: 12th International scientific conference "Engineering for rural development 2013": Proceedings, Latvia, Jelgava: LLU.

Ziņojumi citos pētījuma novirzienos

- 1. Komass T. (2012) Solid fuel boiler automation for briquette use. In: *18th International scientific conference "Research for rural development 2012"*, May 16-18, 2012, Latvia, Jelgava: LLU.
- 2. Komass T., Sniders A. (2012) Statistical Analyses of Municipal Heat Supply In: 11th International scientific conference "Engineering for rural development", May 24-25, 2012, Latvia, Jelgava: LLU.
- Sniders A., Komass T. (2012) Invariant Method of Load Independent Pressure Control in Steam Boiler. In: 53rd International scientific conference of Riga Technical University dedicated to the 150th anniversary of Riga Polytechnic Institute, October 12, 2012, Latvia, Riga: RTU.
- 4. Sniders A., Komass T. (2013) Simulation of Multi-Link Invariant Control System for Steam Boiler. In: 12th International scientific conference "Engineering for rural development 2013", May 23–24, 2013, Latvia, Jelgava: LLU.

ANOTĀCIJA

Komass T. Vertikālās ass vēja rotora energoefektivitātes uzlabošana ar spārnu leņķa aktīvo regulēšanu: promocijas darbs lauksaimniecības inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing) zinātniskā grāda iegūšanai, Jelgava, LLU, 2017. Kopējais darba apjoms 156 lpp, 14 tabulas, 144 attēli un 15 pielikumi. Promocijas darbā izmantoti 158 informācijas avoti.

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Enerģētikas institūtā no 2011.gada septembra līdz 2017. gada aprīlim.

Zinātniskā darba mērķis: teorētiski un eksperimentāli izpētīt un pamatot vertikālās ass vēja elektrostacijas (VAVES) energoefektivitātes paaugstināšanas risinājumus ar spārnu leņķa aktīvo regulēšanu un spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modeļu pielietojumu VAVES izstrādes un ekspluatācijas procesos.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- 1. Teorētiski izpētīt esošās VAVES simulācijas metodes, izstrādāt VAVES simulācijas modeli, izmantojot MATLAB *Simulink* pakotni. Veikt simulācijas modeļa pārbaudi izmantojot eksperimentālos datus.
- 2. Analizēt pašreizējās uz VAVES rotoru reducētā aerodinamiskā griezes momenta aprēķinu un simulācijas metodes, izstrādāt simulācijas modeli un ar paplašinātu aprēķinu algoritmu veikt optimālo spārnu aerodinamisko leņķu aprēķinu.
- 3. Veikt pētījumus par VAVES rotora simulācijas un inerces momenta aprēķinu metodēm. Izmantojot rotora simulācijas modeli, veikt petījumu par VAVES rotora inerces momenta ietekmi uz VAVES lietderības koeficienta ietekmi.
- 4. Veikt teorētiskos pētījumus par pašreizējiem VAVES lietderības koeficienta paaugstināšanas risinājumiem un spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izmantošanas iespējām. Izstrādāt simulācijas modeli MATLAB Simulink vidē spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmai, validācijai izmantojot eksperimentāli iegūtos datus.

Darbs ir strukturēts 4 nodaļās:

1.nodaļā analizēta problemātika saistībā ar vēja energoresursu izmantošanu elektroenerģijas ražošanā izmantojot maza un vidēja izmēra vēja elektrostacijas, vertikālās ass vēja elektrostacijas priekšrocības salīdzinājumā ar horizontālās ass vēja elektrostaciju, apskatīti vēja elektrostaciju energoefektivitātes uzlabošanas risinājumi;

2. nodaļā apskatītas simulācijas metodes un risinājumi vēja elektrostacijas rotoram, vēja enerģijai, ģeneratoram, aerodinamiskajam spēkam, mehāniskajam pārvadam kopumā dodot iespēju sastādīt kopēju vertikālās ass vēja stacijas simulācijas modeli;

3. nodaļā veikta vertikālās ass vēja elektrostacijas aktīvas spārnu regulēšanas sistēmas simulācijas sistēmas izstrāde, apkopojot teorētiski analizēto informāciju no horizontālās ass vēja elektrostaciju aktīvajām spārnu leņķa regulēšanas sistēmām;

4. nodaļā, izmantojot pētījumos iegūto informāciju, ir veikta spārnu iestatīšanas lenķa ekonomiskā ieguvuma analīze, iespējamās izmaksas un plānotais ieguvums.

Pētījumu rezultāti apstiprina iepriekš izvirzīto hipotēzi par to, ka vertikālās ass vēja stacijas lietderības koeficients var tikt paaugstināts, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, kas ar vadības programmu spētu veikt spārnu leņķa regulēšanu pie nestacionāra vēja ātruma un tā radītās aerodinamiskās slodzes uz regulējamo spārnu pie nestacionārā vēja elektrostacijas rotora rotācijas ātruma.

ANNOTATION

Komass T. Energy efficiency improvement for vertical exis wind rotor with active pitch control: Research paper for obtaining a doctoral degree in agricultural engineering (Dr.sc.ing), Jelgava, LLU, 2017. The research paper consists of 156 pages, it contains 14 tables, 144 pictures and 15 annexes. The research paper made use of 158 information sources.

The research paper has been developed in Technical faculty of Latvia University of Agriculture, Institute of Agricultural Power Engineering over the period from September, 2011 till April, 2017.

Goal of the research paper: to provide theoretical and experimental basis for integrated use of the vertical axis wind turbine simulation model in modern production and development processes and prove applicability of the simulation model for wind power station blade pitch angle adjustment system.

In order to achieve the goal of the research the following tasks have been set:

- 1. to study theoretically the existing VAWPP simulation methods, develop VAWPP simulation model with use of MATLAB *Simulink* package. Carry out testing of the simulation model with use of experimental data;
- 2. to analyze currently existing VAWPP rotor-reduced aerodynamic torque estimate and simulation methods, develop the simulation model and by means of extended estimate algorithm to carry out the calculation of optimal aerodynamic angles of blades;
- 3. to carry out studies of VAWPP rotor simulation and inertia moment calculation models, carry out study of VAWPP rotor inertia moment impact on VAWPP efficiency factor;
- 4. to carry out theoretical studies of current methods of increasing VAWPP efficiency factor and possibilities of using the blade pitch control system, as well as of the existing studies. Develop the simulation model in MATLAB *Simulink* environment for the blade pitch control system, using the experimentally obtained data for the validation.

The paper consists of 4 sections:

Section 1 analyses the key issues covering application of wind energy in electric power production using small and medium-sized wind turbine, the advantages of vertical axis wind power stations over horizontal axis wind power stations, reviews solutions for improvement of performance of wind power stations.

Section 2 provides an overview of simulation methods and solutions for wind power station rotor, wind energy, generator, aerodynamic force, mechanical drive thus providing an opportunity to create the simulation model of a vertical axis wind turbine.

Section 3 is dedicated to the process of development of the system for simulation of a vertical axis wind power station active blade adjustment by summarising theoretically analysed information from horizontal axis wind power station blade pitch active adjustment systems.

Section 4 provides analysis of economic advantages of blade pitch adjustment, potential costs and expected benefits with reference to the research findings.

Research results prove the previously suggested hypothesis that the efficiency ratio of a vertical axis wind power station can be increased using the blade pitch angle adjustment control system that would be able to control the blade pitch at the unsteady wind velocity and the resulting aerodynamic load on the adjustable blade given the variable turbine rotor rotation speed with the help of an adaptive control programme.

ANMERKUNG

Komass T. Erhöhung der Energieeffizienz bei Vertikal-Windkraftanlagen durch aktive Kontrolle der Rotorblatt-Stellung: Forschungsarbeit zur Erlangung eines Doktortitels in Agrartechnologie (Dr.sc.ing), Jelgava, LLU, 2017. Die Forschungsarbeit umfasst 156 Seiten, 14 Tabellen, 144 Bilder und 15 Anhänge. Die Forschungsarbeit nutzt 158 Informationsquellen.

Die Forschungsarbeit wurde im Zeitraum von September 2011 bis April 2017 an der Technischen Fakultät der Lettischen Landwirtschaftlichen Universität, Institut für Agrar- und Energietechnik, erstellt.

Ziel der Forschungsarbeit: eine theoretische und experimentelle Grundlage, für die integrierte Anwendung des Vertikal-Windkraftanlagen Simulations-Modells in modernen Produktions- und Entwicklungsprozessen zu bieten sowie die Eignung des Simulations-Modells für das Kontrollsystem der Rotorblatt-Stellung bei Windkraftanlagen nachzuweisen.

Um das Ziel der Forschungsarbeit zu erreichen wurden folgende Aufgaben festgesetzt:

- 1. Analysieren bestehender Simulations-Methoden von Vertikal-Windkraftanlagen (VWKA), Entwickeln eines neuen Simulations-Modells für VWKA in MATLAB Simulink. Bestätigen des Simulations-Modells durch Versuchsdaten.
- Analysieren bestehender areodynamischer Drehmoments-Kalkulationen und Simulations-Methoden von VWKA, Entwickeln eines neuen Simulations-Modells unter Anwendung der vorliegenden Informationen. Entwickeln einer neuen Methode für die optimale Kalkulation des Rotorblatt-Winkels und Bestätigen des entwickelten Simulations-Modells durch Versuchsergebnisse.
- 3. Durchführen einer Studie zu Rotor-Simualtions- und Modellierverfahren von VWKA, Entwickeln eines neuen Simualtions-Modells in MATLAB Simulink und Bestätigen des Simulations-Modells durch Versuchsdaten.
- 4. Durchführen einer Studie zur Simulation und Modellierung des Rotorblatt-Winkel-Kontroll-Systems von VWKA. Analysieren der bestehenden Rotorblatt-Winkel-Kontroll-Methode von Horizontal-Windkraftanlagen und Entwickeln eines neues Systems für VWKA. Bestätigen des neuen Simulations-Modells für das Rotorblatt-Winkel-Kontroll-System durch Versuchsdaten.

Die Arbeit besteht aus 4 Abschnitten:

Abschnitt 1 analysiert die Kernfragen bei der Anwendung von Windenergie zur Stromerzeugung mit kleinen und mittelgroßen Windkraftanlagen, die Vorteile von Vertikalachsen-Windkraftanlagen im Gegensatz zu Horizontalachsen-Windkraftanlagen und bewertet Lösungen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Windkraftanlagen.

Abschnitt 2 stellt eine Übersicht von Simulations-Methoden und Lösungen für Windkraftanlagen-Rotoren, Windenergie, Stromerzeuger, aerodynamische Kräfte und mechanische Antriebe zur Verfügung, welche die Möglichkeit bieten das Simulations-Modell für Vertikalachsen-Windkraftanlagen zu entwickeln.

Abschnitt 3 widmet sich dem Entwicklungsprozess des Kontrollsystems zur Rotorblatt-Stellung bei Vertikalachsen-Windkraftanlagen, indem es die theoretisch analysierten Informationen des Systems zur Kontrolle der Rotorblatt-Stellung bei Horizontalachsen-Windkraftanlagen zusammenfasst.

Abschnitt 4 stellt Auswertungen der wirtschaftlichen Vorteile der Rotorblatt-Stellungs-Kontrolle, potentielle Kosten und erwartete Vorteile in Bezug auf die Forschungsergebnisse zur Verfügung.

Die Forschungsresultate belegen die zuvor unterbreitete Theorie, dass der Wirkungsgrad einer Windkraftanlage mit Vertikalachse mithilfe eines anpassungsfähigen Programms zur Kontrolle der Rotorblatt-Stellung erhöht werden kann, das in der Lage ist, die Rotorblatt-Stellung bei schwankenden Windgeschwindigkeiten und der daraus resultierenden aerodynamischen Kraft auf dem einstellbaren Flügel, unter Berücksichtigung der unregelmäßigen Rotorgeschwindigkeit, zu kontrollieren.

SATURS

ATTĒLU SARAKSTS	9
TABULU SARAKSTS	13
PIELIKUMU SARAKSTS	14
LIETOTIE SIMBOLI, SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI	15
IEVADS	18
1. VĒJA TEHNOLOĢISKO IEKĀRTU IZSTRĀDES UN IZMANTOŠANAS	
PROBLEMĀTIKA	19
1.1. Atjaunojamo energoresursu izmantošanas potenciāls un tā apgūšanas	
tendence	19
1.2. Likumdošana un tās ietekme uz vēja enerģijas ieguvi Latvijā	22
1.3. VES konstruktīvo risinājumu salīdzinošā analīze	25
1.3.1. Horizontālās ass VES konstruktīvie risinājumi	26
1.3.2. VAVES konstruktīvie risinājumi	31
1.4. VAVES izstrādes potenciāls un inovatīvi risinājumi Latvijā	33
1.5. VES konstruktīvo risinājumu salīdzinājums	35
1.6. Vēja stacijas enerģijas pārveides un pārvades sistēmu veidi un	to
pielietojums	36
1.7. Modelēšanas un simulācijas izmantošana VES pētījumos	38
1.8. Vēja stacijas vadības sistēmas struktūra un tālākas attīstības	
problemātika	39
1.9. Pētījumu pamatojums, struktūra un metodika	42
1.10. Pētījumu hipotēze, mērķis un uzdevumi	42
1.10. Darba tautsaimnieciskā nozīmība	43
2. VERTIKĀLĀS ASS VĒJA STACIJAS VADĪBAS PĒTĪJUMI UN	
SIMULĀCIJAS MODEĻU IZSTRĀDE	44
2.1. Vēja ātruma simulācijas metožu izpēte, simulācijas modeļa izstrāde	44
2.1.1. Vēja simulācijas modeļa validācija ar eksperimentālajiem datiem	46
2.2. Aerodinamiskā spēka analīze un simulācijas modeļa izstrāde Darius	
H-tipa rotora VAVES stacijai	50
2.3. VAVES rotora inerces aprēķinu pētījumi, rotora inerces ietekme	
uz VAVES darbību, simulācijas modeļa izstrādes kritēriji	58
2.4. VAVES rotora simulācijas modeļa validācija ar eksprimentālajiem datiem	63
2.5. Mehāniskā pārvada simulācijas metodes pētījumi, simulācijas modeļa	
izstrāde VAVES	67
2.6. PMSG tipa elektroģeneratora simulācijas modeļa izstrāde un validācija	69
2.7. Ģeneratora simulācijas modeļa validācija izmantojot	
eksperimentālos datus	76
2. nodaļas kopsavilkums un secinājumi	80
3. VERTIKALAS ASS VES SPARNU LEŅĶA AKTIVAS	
REGULESANAS SISTEMAS IZSTRADE	82
3.1. Spārnu leņķa aktīvās regulēšanas sistēmas konstruktīvā	
risinājuma analīze un izstrāde	82
3.2. Spārnu iestatīšanas leņķa aktīvās regulēšanas sistēmas	
simulācijas modeļa izstrāde un verifikācija	84
3.3. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas servo piedziņas	
sımulācijas modeļa izstrāde	88
3.4. Servo regulatora vadības algoritmu analīze un izstrāde	0.0
sımulācijas modelī	90
3.5. Servo motora simulācijas modeļa izstrāde un verifikācija	93
3.6. Servo regulatora simulācijas modeļa izstrāde	95

3.7. VAVES spārna ģeometrisko parametru analīze	
3.8. Spārna optimālā iestatīšanas leņķa pētījumi	
3.9. VAVES Spārnu regulēšanas sistēmas simulācijas modeļa izstrāde	104
3.10. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas servo sistēmas simulācijas	
modeļa validācija	110
3.11. Spārna leņķa regulēšanas sistēmas aerodinamiskā pretestības	
spēka eksperimentālie pētījumi	120
3. nodaļas secinājumi	125
4. PĒTĪJUMU REZULTĀTU ZINĀTNISKI-PRAKTISKĀ NOZĪME UN	
TO IEVIEŠANAS EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS	126
4.1. Elektroenerģijas cenas izmaiņas un tirgus situācija	126
4.2. Elektroenerģijas patēriņš un VAVES iegādes potenciāla analīze Latvij	ā 126
4.3. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora jaudas	
aprēķina metodika	128
4.4. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izmantošanas	
ekonomiskais pamatojums	132
4. nodaļas kopsavilkums un secinājumi	140
PRIEKŠLIKUMI	143
INFORMĀCIJAS AVOTI	

ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att.	VES kopējā uzstādītā jauda pret kopējo AER uzstādīto jaudu Latvijā	20
1.2. att.	AER un vēja stacijās gada laikā saražotā elektroenerģija Latvijā	20
1.3. att.	VES saražotās elektroenerģijas dinamika Latvijā	21
1.4. att.	Baltijas valstu VES uzstādītās jaudas salīdzinājums	21
1.5. att.	Mikroģeneratora atbilstības standarti	23
1.6. att.	Elektroenerģijas izmaksas sadalījums Latvijas mājsaimniecībā	
	(Informācija uz 01.07.2016.)	25
1.7. att.	VES iedalījums pēc konstruktīvā risinājuma	26
1.8. att.	Horizontālās ass pretvēja tipa vēja stacijas uzbūve	27
1.9. att.	VES enerģijas pārveide	28
1.10. att.	Horizontālās ass vēja rotora spārna leņķa aktīvās	
	iestatīšanas sistēma	29
1.11. att.	VES elektriskā jauda Pe kā funkcija no vēja ātruma	30
1.12. att.	Horizontālās ass VES lietderības koeficients n kā funkcija no vēja	
	rotora ātrgaitas koeficienta λ pie dažādiem spārna iestatīšanas	
	leņķiem φ	30
1.13. att.	Vertikālās ass vēja rotora galvenie konstrukcijas veidi	31
1.14. att.	Vertikālās ass VES konstrukcija	32
1.15. att.	Patenta EP1348075 B1 rotora un spārna profils	33
1.16. att.	Vertikālās ass vēja rotors ar diviem spārnu blokiem	34
1.17. att.	Vēja stacijas tiešs slēgums ar elektroenerģijas neregulējamu	
	slodzes patērētāju	36
1.18. att.	Vēja stacijas slēgums ar elektroenerģijas neregulējamu	
	slodzes patērētāju caur līdzstrāvas kopni	37
1.19. att.	Vēja stacijas regulējams slodzes elektriskais slēgums	
1.00	maiņstrāvas kopnē	37
1.20. att.	Vēja stacijas regulējams slodzes elektriskais slēgums	20
1.01 //	lidzstravas kopne	
1.21. att.	V eja stacijas regulejams slodzes elektriskais slegums izmantojot	20
1.00 -44	tikla invertoru	
1.22. att.	Modelesanas un simulacijas programmaturas iedalījums pec	20
1.22 off	Vodībog gietāmog ielvējā atmltīmo	
1.25. att.	Vadības sistemas ieksēja struktūra	40
1.24. all.	VES vadības iekartu sadalījums pec izplīdes lunkcijas	41
1.23. all.	VAVES modulāra simulācijas struktūra	41
2.1. att.	Vāja ātruma komponentes (Rolan A 2000)	
2.2. att.	Vēja ātruma simulācijas blokshēmas	
2.3. att	Vēja ātruma simulācijas rezultāti	+5
2.4. all.	Vēja atruma simulacijas iezultati	40
2.5. att. 2.6. att	Vēja vidējās vērtības aprēkiņu metodes	
2.0. att. 2.7. att	Vēja ātruma mērījumi Belģijas pilsētā Ostende	
2.7. att. 2.8. att	Vēja nagrieziena lenka mērījumi Beļģijas pilsēta Ostende	49
2.9. att.	Vēja virziena sadalījuma grafiks	
2.10. att.	Vēja rotora darba zonas	
2.11. att.	NACA0018 cēlējspēka un spiedējspēka koeficientu atkarība no	
	spārna relatīvā appūtes lenka pie dažādiem Reinoldsa skaitliem	52
2.12. att.	Viena spārna aerodinamiskā griezes momenta aprēkina	
	apakšsistēma "AerodynamicBlade'	54
2.13. att.	Viena spārna aerodinamiskā griezes momenta aprēķina	

	apakšsistēmas "AerodynamicBlade' iekšējā struktūra	54
2.14. att.	NACA0018 CL un CD koeficientu atlase pēc Re un α	55
2.15. att.	Spārnu griezes momenta simulācijas izejas dati	56
2.16. att.	Spārna FL un FD spēka projekcijas simulācijas izejas dati	56
2.17. att.	Spārna relatīvā appūtes lenka simulācijas rezultāti	57
2.18. att.	Griezes momenta aprēkina metode izmantojot vēja un	
	rotora lenkisko ātrumu	57
2.19. att.	Griezes momenta simulācijas rezultāti izmantojot vienkāršoto	
	aprēkinu	58
2.20. att.	Rotora spēku plūsmas struktūra	60
2.21. att.	Rotora apakšsistēma izmantojot atvērto pārvades funkciju	61
2.22. att.	Pārvades funkcijas apakšsistēmas pārbaudes scenāriju rezultāti	61
2.23. att.	Rotora apakšsistēma izmantojot State Space	62
2.24. att.	VAVES rotora reducētā griezes momenta simulācijas	
	raksturlīknes	62
2.25. att.	VES rotora pārejas procesu simulācijas modelis	63
2.26. att.	Saražotās enerģijas starpības atkarība no VES rotora	
	inerces momenta	64
2.27. att.	VES rotora modeļa simulētās rotācijas ātruma raksturlīknes	
	pie dažādiem inerces momentiem	65
2.28. att.	VES simulācijas modeļa reģistrētais ātrgaitas koeficients pie	
	dažādiem inerces momentiem	65
2.29. att.	VES simulācijas modela rotora rotācijas ātrums salīdzinājumā	
	ar eksperimentos nomērīto rotora rotācijas ātrumu	66
2.30. att.	VES simulācijas modela ātrgaitas koeficienta salīdzinājums	
	ar eksperimentos nomērīto VES ātrgaitas koeficientu	66
2.31. att.	Mehāniskā pārvada enerģijas plūsmas shēma	68
2.32. att.	Multiplikatora apakšsistēmas iekšējā struktūra	69
2.33. att.	PMSG ātruma izpildes simulācijas modeļa struktūra	71
2.34. att.	Simulācijas dati ģeneratora spriegumam un griezes momentam	72
2.35. att.	Ģeneratora apakšsistēma	72
2.36. att.	PMSG mehānisko pārejas procesu simulācijas apakšistēma	72
2.37. att.	PMSG simulācijas modeļa reģistrētie dati	73
2.38. att.	Simulācijas rezultāts pie J=2.2kg m ²	73
2.39. att.	Sprieguma avota apakšsistēma	74
2.40. att.	Sprieguma avota apakšsistēmas simulācijas rezultāti	74
2.41. att.	Idealizēta strāvas aprēķina apakšsistēmas iekšējā struktūra	75
2.42. att.	Strāvas avota simulācijas rezultāti	75
2.43. att.	Sprieguma mērījumu testa stenda elektriskā slēguma shēma	76
2.44. att.	Datu salīdzināšanas simulācijas modelis MATLAB Simulink vidē	78
2.45. att.	Formētais ātruma uzdevums simulācijas modelī no eksperimentā	
	izpildītā uzdevuma	79
2.46. att.	Ģeneratora Uf grafiskais salīdzinājums	79
2.47. att.	Ģeneratora sprieguma mērījumi strādājot ar mainīgu	
	ģeneratora slodzi	80
3.1. att.	Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas	
	konstrukcija ar reduktoru	83
3.2. att.	Spārnu leņķa regulēšanas sistēmas konstruktīvais risinājums	
	bez reduktora	83
3.3. att.	Spārnu iestatīšanas leņķa piedziņas vadības sistēmas struktūrshēma	84
3.4. att.	Spārnu iestatīšanas leņķa funkcijas struktūra	84
3.5. att.	VAVES leņķu izvietojums pie sistēmas nulles punkta	85

3.6. att.	VAVES analītiski aprēķinātie dinamiskie raksturojumi	
	atkarībā no vēja ātruma	86
3.7. att.	Servo regulatora struktūrshēma	87
3.8. att.	Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas struktūrshēma	88
3.9. att.	3 fāžu servo motora ekvivalentā shēma	90
3.10. att.	Servo motora regulatora vadības ķēdes pamatstruktūra	90
3.11. att.	Strāvas regulēšanas blokshēma	91
3.12. att.	Ātruma regulēšanas ķēdes uzbūve	92
3.13. att.	Kollmorgen AKD servo regulatora pozīcijas regulēšanas	
	blokshēma	92
3.14. att.	Servo motora simulācijas modeļa apakšsistēmas iekšējā uzbūve	93
3.15. att.	Servo motora elektriskā interfeisa simulācijas modeļa uzbūve	94
3.16. att.	Servo motora mehāniskās interfeisa simulācijas modeļa uzbūve	94
3.17. att.	Servo motora MATLAB Simulink modeļa pārbaudes rezultāti	95
3.18. att.	Ātruma regulēšanas kontūrs ietverot objektu sistēmas modelī	95
3.19. att.	Ātruma regulatora simulācijas reģistrētie dati ar dažādām objekta	
	inercēm, bet vienādiem PID regulatora parametriem	96
3.20. att.	Pozīcijas kontroles simulācijas modelis Simulink vidē ar P = 20	96
3.21. att.	Pozīcijas uzdevuma izpilde pie dažādām objekta inercēm	97
3.22. att.	Spārna konstrukcijas šķērsgriezums	97
3.23. att.	VAVES spārna leņķu izvietojums	99
3.24. att.	Lietderīgākā spārnu iestatīšanas leņķa aprēķinu	
	programmas struktūra	100
3.25. att.	Griezes momenta raksturlīknes rezultāti pie $\lambda = 3$	101
3.26. att.	Griezes momenta raksturlīknes rezultāti pie $\lambda = 2.5$	101
3.27. att.	Optimālā griezes momenta raksturlīknes rezultāti pie $\lambda = 2.0$	102
3.28. att.	Spārna relatīvā iestatīšanas leņķa α raksturlīknes	
	atkarībā no rotora ātrgaitas koeficienta	102
3.29. att.	Uzlaboto spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas φ raksturlīknes	
	atkarībā no rotora ātrgaitas koeficienta	103
3.30. att.	Uzlabotā spārnu appūtes leņķa β raksturlīknes atkarībā no rotora	
	ātrgaitas koeficienta	104
3.31. att.	Rotora spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas	
	simulācijas modelis	104
3.32. att.	Optimālā iestatīšanas leņķa korekcijas sistēmas uzdevuma	105
	aprēķinu tabula	105
3.33. att.	lestatisanas leņķa apreķina simulacijas blokshema	106
3.34. att.	Optimala apputes leņķa apreķina simulacijas blokshema	106
3.35. att.	Optimala apputes leņķa apreķina sistemas simulacijas rezultāti	10/
3.36. att.	Servo menanisma parbaudes simulacijas sistema ar apreķinatu	100
2 27 att	sparna iestatisanas leņķa raksturliknes signalu	108
5.57. att.	Sparna iestatisanas leņķa korekcijas servo menanisma uzdevuma	100
2 20	izplides simulacijas rezultati	109
5.58. att.	sparna iestatisanas leņķa korekcijas servo menanisma uzdevuma	100
2 20	izplides simulacijas rezultati	109
5.59. att.	spaina iestausanas ieņķa korekcijas servo menanisma uzdevuma	110
2 10 att	Izpliues simulaeijas iezultati	111
3.40. all.	MATI AD Simuliale vidā izveidetā game gietāmes ieromitāšanas	111
J. 4 1. all.	Programma	110
3 12 att	Sarvo motora ātruma mārījumi tulkšasitā	112 112
3.42. all.	$\bar{\Delta}$ truma jeregulēšanas eksperimentālie rezultāti	113 112
J. - J. all.	Au uma mogulosanas eksperimentane tezultati	113

3.44. att.	Servo motora ātruma vidējie rādītāji pie dažādām sistēmas slodzēm	114
3.45. att.	Simulācijas modelis laika konstantes aprēķina validācijai	115
3.46. att.	Servo motora griezes moments pie laika konstantes pārbaudes	115
3.47. att.	Servo motora laika konstantes pārbaudes simulācijas rezultāti	116
3.48. att.	Pozicionēšanas ieregulēšanas eksperimentālie rezultāti	117
3.49. att.	Optimālā iestatīšanas leņķa korekcija $\varphi(\theta)$	117
3.50. att.	Uzlabotā iestatīšanas leņķa korekcijas $\varphi(\theta)$ MATLAB Simulink	
	simulācijas modelis	118
3.51. att.	Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti (bez reduktora 30 min ⁻¹)	118
3.52. att.	Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti (bez reduktora 60 min ⁻¹)	119
3.53. att.	Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti (ar reduktoru 30 min ⁻¹)	119
3.54. att.	Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti (ar reduktoru 60 min ⁻¹)	120
3.55. att.	NACA0018 eksperimentālā spārna konstrukcija	121
3.56. att.	NACA0018 spārna aerodinamiskais pretestības spēks atkarībā	
	no spārna relatīvā appūtes lenka	122
3.57. att.	NACA0018 spārna aerodinamiskais pretestības spēks atkarībā	
	no spārna relatīvā appūtes lenka	122
3.58. att.	Spārna iestatīšanas lenka regulēšanas servo motora attīstītais	
	griezes moments atkarībā no vēja ātruma un relatīvā appūtes lenka	123
3.59. att.	Aerodinamiskā pretestības spēka eksperimentālie mērījumi	
	pie v = $3.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	123
3.60. att.	Aerodinamiskā pretestības spēka eksperimentālie mērījumi	_
	$ar v = 5.5m \cdot s - 1$	124
3.61. att.	Aerodinamiskā pretestības spēka eksperimentālie mērījumi	
	$ar v = 7.5m \cdot s - 1$	124
4.1. att.	NACA0012 un NACA0018 profila spārna ar hordu 1m projektēšana	
	Solidedge datorprogrammā	
4.2. att.	NACA0012 un NACA0018 profila spārna inerces momenta un	
	masas atkarība no hordas lieluma	130
4.3. att.	NACA0012 un NACA0018 profila spārna inerces moments kā	
	funkcija no spārna masas	130
4.4. att.	Plānotā VAVES saražotā elektroenerģija gada laikā	134
4.5. att.	Elektroenerģijas ieguvums izmantojot spārnu iestatīšanas lenka	
	regulēšanas sistēmu pie vēja ātruma 4 m·s ⁻¹ .MWh	135
4.6. att.	Elektroenerģijas ieguvums izmantojot spārnu iestatīšanas lenka	
-	regulēšanas sistēmu pie vēja ātruma 5 m \cdot s ⁻¹	
4.7. att.	Elektroenerģijas ieguvums izmantojot spārnu iestatīšanas lenka	
	regulēšanas sistēmu pie vēja ātruma 6 m·s ⁻¹	136
4.8. att.	Elektroenerģijas ieguvums izmantojot spārnu iestatīšanas lenka	
	regulēšanas sistēmu	136
4.9. att.	VAVES spārnu iestatīšanas lenka regulēšanas sistēmas izmaksas	
4.10. att.	VAVES spārnu iestatīšanas sistēmas atpelnīšanas analīze ar	
	VAVES jaudu < 20kW	
4.11. att.	VAVES spārnu iestatīšanas sistēmas atpelnīšanas analīze ar	
	VAVES jaudu > 20kW	139

TABULU SARAKSTS

1.1. tabula	HAVES un VAVES salīdzinājums	35
2.1. tabula	Vēja mēriekārtu mērīšanas parametri	48
2.2. tabula	Vēja ātruma un virziena mērījumu statistiskās	
	apstrādes dati	48
2.3. tabula	Ģeneratora fāzes spriegumu eksperimentālie dati	77
2.4. tabula	Ģeneratora līnijas sprieguma eksperimentālie dati	77
2.5. tabula	Ģeneratora fāzes un līnijas spriegumu eksperimentālo	
	mērījumu analīze	78
3.1. tabula	Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas eksperimentālā	
	stenda iekārtas	111
3.2. tabula	Servo regulatora ACSM1 automātiski nomērītās servo	
	mehānisma laika konstantes, s	114
4.1. tabula	Mājsaimniecību sadalījums pēc gada vidējā elektroenerģijas	
	patēriņa Latvijā, %	127
4.2. tabula	Latvijas mājsaimniecību sadalījums un skaits 2015. gadā pēc	
	elektroenerģijas patēriņa, to patērētā	
	elektroenerģija 2015.gadā, MWh	127
4.3. tabula	NACA0012 un NACA0018 NACA0012 un NACA0018	100
	servo sistēmas noklusējuma dati	129
4.4. tabula	NACA0012 un NACA0018 spārna profilu inerces	101
	momentu salīdzinājums	
4.5. tabula	Spārnu iestatīšanas leņķa servo mehānisma patērētā enerģija	132
4.6. tabula	Informācija par tirgū piedāvātajām VAVES, kuras iespējams	10.4
47 1 1	aprīkot ar spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu	134
4./. tabula	VAVES atmaksašanas periods pec naudas plusmas	140

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums	07.09.2014. datuma eksperimentālie vēja mērījumu rezultāti
2. pielikums	16.10.2014. datuma eksperimentālie vēja mērījumu rezultāti
3. pielikums	07.12.2014. datuma eksperimentālie vēja mērījumu rezultāti
4. pielikums	Spārna profila NACA0018 aerodinamisko koeficientu CL un CD raksturlīknes
5. pielikums	VES spārna aerodinamiskā spēka aprēķina programmas komandrinda
-	MATLAB Editor
6. pielikums	VES rotora simulācijas modeļa State Space matricu definīcijas MATLAB
	Editor vidē
7. pielikums	No WXT520 saņemto datu apstrādes programmas centrālais modulis CoDeSys
	V2.5 FBD valodā
8. pielikums	No WXT520 saņemto datu nolasīšanas programma CoDeSys V2.5 vides STL
	valodā
9. pielikums	No WXT520 saņemto datu apstrādes programmas CoDeSys V2.5 IL valodā
10. pielikums	VES eksperimentālo mērījumu reģistratora CoDeSys V2.5 vides STL
	programma datu reģistrēšanai MySQL datubāzē
11. pielikums	Optimālā spārnu iestatīšanas leņķa analīzes programma MATLAB Editor vidē
12. pielikums	VES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modelis
	MATLAB Simulink vidē
13. pielikums	Servo mehānismu eksperimentālo mērījumu apstrādes komandrinda MATLAB
	Editor pakotnē
14. pielikums	FlyFox-20kW rotora inerces analīzes komandrinda MATLAB Editor pakotnē
15. pielikums	Eksperimentālā spārna izstrāde

LIETOTIE SIMBOLI, SAĪSINĀJUMI UN APZĪMĒJUMI

А	stāvokļa jeb sistēmas matrica	$ m K_{f}$	pastiprinājuma koeficients frekvencei, iegūstams eksperimentāli
a _{sm}	servo motora paātrinājums	Kg	ģeneratora pastiprinājums
В	ieejas matrica	K _{mul}	multiplikatora pārvades koeficients
c	spārna profila hordas garums	K_t	rotora pārvades koeficients
С	izejas matrica	K _t	servo motora griezes momenta konstante
D_m	apsteidzes matrica	Ku	pastiprinājuma koeficients spriegumam, iegūstams eksperimentāli
D	spārna spiedspēks	L	spārna cēlējspēks
D_r	diametrs	1	spārna garums
ei	tinuma spriegums	La	servo motora tinuma induktivitāte
f1(s)	Laplasa transformācijas ieejas sprieguma frekvence	M(s)	Laplasa transformācijas multiplikatora vārpstas griezes momentam
f ₂ (s)	Laplasa transformācijas izejas frekvence	Ma	spārna kopējais aerodinamiskais griezes moments
Fa	spārna aerodinamiskais spēks	Ma	rotora aerodinamiskais griezes moments
i	pārnesuma attiecība	Ma.sp.	spārna aerodinamiskais griezes moments
ia	tinuma strāva	$M_{g.n} \\$	PMSG nominālais griezes moments
J	inerces moments	M_{m}	lēngaitas vārpstas griezes moments
J_{g}	PMSG inerces moments	$M_{mul.h}$	ātrgaitas vārpstas griezes moments
$\mathbf{J}_{\mathrm{mul}}$	multiplikatora inerces moments	M _{mul.1}	lēngaitas vārpstas griezes moments
J _{mul.h}	ātrgaitas vārpstas inerces moments	M _{r.nom}	rotora nominālais griezes moments
J_r	rotora inerces moments	M_{sl}	slodzes griezes moments
\mathbf{J}_{sm}	rotora inerces moments	M_{sm}	servo motora griezes moments

Ke	servo motora sprieguma konstante	n _{g.ref}	ģeneratora ātruma uzdotā vērtība
$\eta_{ m mul}$	multiplikatora lietderības koeficients	Vkop	kopējais vēja spēka vektors
n _{mul.h}	ātrgaitas vārpstas rotācijas ātrums	Vn	vēja ātruma troksnis
n _{mul.1}	lēngaitas vārpstas rotācijas ātrums	φ	vēja virziena leņķis
R	rotora rādiuss	ω0	leņķiskais ātrums tukšgaitā
Ra	servo motora tinuma aktīvā pretestība	$\omega_{g}(s)$	Laplasa transformācijas ieejas sprieguma leņķiskais ātrums
Re	Reinoldsa skaitlis	ω _{g.n}	nominālais PMSG leņķiskais ātrums
Rg	aktīvā pretestība	ω_{mul}	multiplikatora leņķiskais ātrums ieejas vārpstā
S	Laplasa konstante	ω _r	rotora rotācijas leņķiskais ātrums
Te	ģeneratora elektriskā laika konstante	$\omega_r(s)$	Laplasa transformācija rotora leņķiskajam ātrumam
T _m	mehāniskā pārvada laika konstante	ω _{r.nom}	rotora nominālais leņķiskais ātrums
T_{mul}	multiplikatora inerces laika konstante	ω _{sm}	motora leņķiskais ātrums
T_r	rotora laika konstante	$\ddot{\Theta}_{mul.h}$	ātrgaitas vārpstas paātrinājums
T _{sm.e}	elektriskā laika konstante	ΔM_g	PMSG griezes momenta starpība
$T_{sm.m}$	mehāniskā laika konstante	$\Delta \omega_{g}$	PMSG rotācijas leņķis kā ātruma starpība
u(t)	ieeja jeb kontroles vektors	μ	dinamiskā viskozitāte
U ₂ (s)	Laplasa transformācijas izejas spriegumam	$\dot{x}(t)$	stāvokļa vektors
Ug	ģeneratora spriegums	Evaves.g.	VAVES saražotā elektroenerģija gada laikā
V	vēja ātrums	Evaves.d.	VAVES saražotā elektroenerģija dienas laikā
v(s)	Laplasa transformācija vēja ātrumam	P _{VAVES.}	VAVES elektriskā jauda pie noteikta vēja ātruma
Vb	vēja ātruma bāze	E _{SS.P.G}	spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora gada laikā patērētā elektroenerģija

Vg	vēja ātruma brīze	Ess.p.d	spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora dienas laikā patērētā elektroenerģija
Vr	vēja ātruma kāpums	P _{ss}	spārnu leņķa regulēšanas sistēmas servo motora darba jauda
Vr	tangenciālais vēja spēka vektors	E _{VES.SS.Bruto}	spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora gada laikā iegūtā bruto elektroenerģija, MWh
Vr	radiālais vēja spēka vektors	Evaves.ss.Neto	spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora dienas laikā iegūtā neto elektroenerģija, kWh
Wr	vēja spēka radiālā projekcija	ξ	eksperimentāli noteiktais enerģijas ieguvums izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu
W_{τ}	vēja spēka tangenciālā projekcija	θ	rotora pagrieziena leņķis
X_{g}	reaktīvā pretestība	λ	ātrgaitas koeficients
y(t)	izejas vektors	ρ	gaisa blīvums

IEVADS

Enerģētikas nozīme Latvijā ir padziļinātas uzmanības vērta, pamatojoties uz Eiropas Savienības izvirzītiem uzdevumiem, kas ir saistīti ar energoneatkarību, energoefektivitāti un atjaunojamo energoresursu izmantošanas īpatsvaru (Latvijas Republikas tiesību akti, 2016). Visas izvirzītās prasības tiešā veidā skar arī Latvijas elektroenerģētiku, tās ražošanu un patēriņu. Primārā elektroenerģētikas problēma ir energoneatkarība. Pēc 2016. gada datiem enerģijas imports Latvijā vidēji sastāda 21 % no saražotās elektroenerģijas, taču šis rādītājs ir mainīgs atkarībā no apskatāmā perioda un tirgus situācijas (Centrālās statistikas pārvalde, 2016).

Latvija pēc atjaunojamo energoresursu (turpmāk – AER) izmantošanas ierindojas 3. vietā aiz Austrijas un Zviedrijas, pateicoties lielajam hidroelektrostaciju saražotajam apjomam. Tā kā elektroenerģijas cena salīdzinot ar Skandināvijas valstīm Latvijā ir augstāka par 50-70 %, tad elektroenerģijas izmantošana siltumapgādē nav izplatīta un tas vēl aizvien rada valstī lielu atkarību pēc kurināmās dabasgāzes, kas ir primārais siltumenerģijas avots Latvijā, tālāk sekojot koksnei un citiem kurināmajiem produktiem.

Upju resursi Latvijas teritorijā ir pietiekami noslogoti, lai vēl vairāk paplašinātu elektroenerģijas ieguvi no hidroelektrostacijām, tāpēc viens no perspektīviem risinājumiem energoneatkarības veicināšanai valstiskā mērogā ir vēja enerģētikas attīstība divos primārajos virzienos (Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs, 2015):

- veidojot jaunus vēja parkus, kas jau tiek īstenots Latvijas rietumu teritorijas daļā, kur darbojas 3 lielākie vēja parki Latvijā;
- uzstādot mazas un vidējas jaudas vēja stacijas ar nominālo elektrisko jaudu līdz 100 kW decentralizētā veidā Latvijas lauku un urbanizētajās teritorijās.

Lai veicinātu valstiskā mērogā vēja staciju uzstādīšanu, ir nepieciešams tam paredzēt likumu, kas norādītu visu kārtību, atvieglojumus un citus rīcības plānus personām, kas ir gatavi investēt vēja staciju iegādē un uzstādīšanā. Lai Latvijas valsts iegūtu vēl vairāk, tad labākais risinājums būtu izmantot esošo zinātnisko un ražošanas potenciālu, lai valsts mērķu labā izstrādātu savas vēja stacijas, kas izpildītu specifiskā pielietojuma prasības. Pasaulē daudzās valstīs politiski tiek izmantoti un stimulēti iekšējie resursi valsts līmeņa pasūtījumiem, kas ir pareiza rīcība, jo stimulē ražošanu, rada jaunas darba vietas un dod iespēju rasties jauniem uzņēmumiem un paplašināt pieredzi ikvienam uzņēmumam šādos projektos.

Efektīvam un augstvērtīgam jauna produkta izstrādes darbam ir nepieciešams izmantot jaunas iestrādes un tehnoloģijas. Latvijas zinātnieki ir pētījuši ar vēja enerģētiku saistītas tēmas, sākot ar vēja enerģētikas potenciālu Latvijas atsevišķās teritorijās un valstī kopumā un beidzot ar atsevišķu risinājumu izstrādi. Latvijas zinātnieki ir autori vairākiem vēja stacijas patentiem, kas ir ļoti specifiski un ar lielu potenciālu nākotnē. Tas nozīmē, ka nozīmīgs ir ikviens pētījums, kas palīdzētu attīstīt vēja enerģētikas izmantošanas iespējas Latvijas teritorijā, tādā veidā palīdzot iegūt lielāku neatkarību no fosilajiem kurināmajiem enerģētikā.

Pamatojoties uz vēja enerģētikas attīstības veicināšanas aktualitāti, tika izvēlēta promocijas darba tēma par vertikālās ass vēja stacijas energoefektivitātes uzlabošanu ar spārnu leņķa aktīvo regulēšanu. Kā galvenais uzdevums tika izvirzīts spārnu leņķa aktīvās regulēšanas servosistēmas izpēte un tās simulācijas modeļu izstrāde, pielietošana VES projektēšanā un ražošanā.

Promocijas darbā apskatīti pašreizējie pētījumi par vēja enerģētiku un vertikālās ass vēja staciju izmantošanu, uzlabošanu, aprēķiniem un efektivitātes palielināšanu. Pēc esošo pētījumu analīzes tika izvirzīti promocijas darba mērķi, uzdevumi, izstrādāta pētījumu programma, izvēlētas pētījumu metodes un apzināts kopējais pētījuma apjoms.

1. VĒJA TEHNOLOĢISKO IEKĀRTU IZSTRĀDES UN IZMANTOŠANAS PROBLEMĀTIKA

Pasaulē tiek plaši strādāts pie atjaunojamo energoresursu (turpmāk - AER) apzināšanas un efektīvas izmantošanas. Liels uzsvars tiek likts tieši uz esošo tehnoloģiju uzlabošanu un jaunu izstrādi. Pie atjaunojamiem energoresursiem tiek pieskaitīti vējš, saule, hidroenerģētika, ģeotermālais siltums, biogāze, biomasa, kā arī atkritumu poligonu un notekūdeņu attīrīšanas iekārtu saražotās gāzes.

Alternatīvās enerģijas apguve saistās ar dabisku procesu korelāciju pret cilvēka izveidotām iekārtām un tehnoloģijām. Dabisko procesu apzināšanās un izpratne ir svarīga, lai spētu izmantot jaunākās tehnoloģijas jaunu risinājumu izstrādē. Mūsdienu tehnoloģijas paplašina tehnoloģiskās iespējas jauniem risinājumiem kādā veidā ir iespējams analizēt un pētīt jaunu tehnoloģiju attīstošus risinājumus (International Energy Agency, s.a.).

Izmantojot modelēšanu un datorsimulācijas, ir iespējams veikt pietiekami precīzus un noderīgus pētījumus, samazinot pētījuma izmaksas un paātrinot nepieciešamo rezultātu iegūšanas laiku.

1.1. Atjaunojamo energoresursu izmantošanas potenciāls un tā apgūšanas tendence

Latvijas energoapgādē atjaunojamo energoresursu īpatsvars tradicionāli ir bijis nozīmīgs. 2016. gadā kopējā primāro energoresursu patēriņā AER aizņēma 34.4 %. Visvairāk izmantotie atjaunojamo energoresursu veidi ir kurināmā koksne (24.5 %) un hidroenerģijas resursi (70.0 %). Vēja enerģija, biogāze, biomasa tiek izmantoti ievērojami mazākā apmērā. Savukārt saules enerģiju šobrīd izmanto nelielos apjomos pilotprojektu formā (Centrālās statistikas pārvalde, 2016a).

Lielāko daļu AS "Latvenergo" saražotās elektroenerģijas iegūst trijās lielākajās hidroelektrostacijās (turpmāk - HES), t.i., Ķeguma HES, Pļaviņu HES un Rīgas HES. 2015. gadā tajās saražoja 1805 GWh jeb vidēji 47 % no kopējā AS "Latvenergo" saražotā elektroenerģijas apjoma. Ķeguma HES kopējā jauda ir 264 MW, Pļaviņu HES – 893.5 MW un Rīgas HES – 402 MW (Centrālās statistikas pārvalde, 2016a).

Eiropas Parlamenta un Padomes 2009. gada 23. aprīļa direktīva 2009/28/EK par AER izmantošanas veicināšanu, kas stājās spēkā 2009. gada 25. jūnijā, tika izstrādāta ar nolūku radīt Eiropas Savienības (turpmāk – ES) dalībvalstīs kopēju plānu AER izmantošanai, nosakot obligātus mērķus kopējam AER īpatsvaram energoresursu gala patēriņā (Eiropas Savienības Oficiālais Vēstnesis, 2009). Saskaņā ar Direktīvas 2009/28/EK I pielikuma A daļu no AER saražotās elektroenerģijas īpatsvars 2020. gadā noteikts 40 % apmērā no kopējā bruto gala patēriņa. Latvijā 2013. gadā tas bija 37.6 %, 2015. gadā – 34.4 % (Centrālās statistikas pārvade, 2016).

Latvijā uzstādīto vēja elektrostaciju (turpmāk – VES) kopējā elektriskā jauda ir palielinājusies no 30 MW - 2010. gadā līdz 69 MW - 2015. gadā. VES būvniecības kritums pēdējos gados izskaidrojams ar atbalsta samazinājumu AER elektroiekārtu uzstādīšanā, jaunu tehnoloģiju attīstībā (1.1. att.).



1.1. att. VES kopējā uzstādītā jauda pret kopējo AER uzstādīto jaudu Latvijā

No AER saražotās elektroenerģijas apjoms AS "Latvenergo" un neatkarīgo ražotāju elektrostacijās 2012. gadā kopā sastādīja 4109 GWh, kas ir pēdējo 5 gadu laikā lielākais saražotās elektroenerģijas daudzums. Kopējā saražotā elektroenerģija no AER ir kritusies pēdējos 3 gados, kur 2015. gadā tika saražotas 2766 GWh. VES saražotās elektroenerģijas daudzums pēc 2012. gada ik gadu ir pieaudzis vidēji par 5 % no iepriekšējā gadā saražotās elektroenerģijas daudzuma. (Centrālās statistikas pārvade, 2016) (1.2. att.).



1.2. att. AER un vēja stacijās gada laikā saražotā elektroenerģija Latvijā

VES gada kopējais saražotais elektroenerģijas apjoms arī ir mainīgs lielums, korelējot ar mainīgo klimatisko vēja ātrumu, ko pierāda saražotās elektroenerģijas daudzuma pieaugums no 2013. gada līdz 2015. gadam, neskatoties uz to, ka šajā laika posmā nav tikusi palielināta VES uzstādītā kopējā elektriskā jauda. Mainoties vēja vidējam ātrumam, gada griezumā kopējā saražotā elektroenerģija no VES var pieaugt vai samazināties, pamatojoties uz ciešo sakarību starp vidējo vēja ātrumu un VES saražoto enerģiju (1.3. att.). Pēdējos gados paaugstināto VES saražotās elektroenerģijas daudzumu ir iespējams pamatot ar VES ekspluatācijas stundu palielināšanos, dīkstāves stundu samazināšanos (Bezrukovs V., 2015).



1.3. att. VES saražotās elektroenerģijas dinamika Latvijā

2014. gada nogalē Baltijas valstīs uzstādītā VES jauda bija 647 MW. Kopējo Baltijas vēja enerģijas potenciālu vērtē no 4,5 līdz 7 TWh gadā (Igaunijā – 4 TWh, Latvijā līdz 1.5 TWh, Lietuvā – 1.5 TWh) (Enefit, 2015). Kopējā VES uzstādītā jauda 2014. gadā Latvijā bija 69 MW, kamēr Igaunijā 302 MW un Lietuvā – 276 MW (Official Statistics Portal of Republic of Lithuania, s.a.; Estonian Wind Power Association, s.a.) (1.4. att.).



1.4. att. Baltijas valstu VES uzstādītās jaudas salīdzinājums

Igaunijā un Lietuvā ir tendence palielināt VES uzstādīto jaudu. Lietuvā tiek realizēts vērienīgs VES parka projekts ar kopējo elektrisko jaudu 60 MW, kas ir 87 % no Latvijas kopējās uzstādītās VES jaudas (Seenews-Renewables, 2015).

Eiropā plaši tiek attīstīti lielas jaudas VES parki, kuros tiek apvienots liels daudzums VES, kur vienas stacijas jauda bieži vien ir robežās no 0.5 MW līdz pat 4 MW (The European Wind Energy Association, s.a.). Eiropā uzstādīto vēja staciju kopējā elektriskā jauda ir 142 GW. 2015. gadā, salīdzinot ar 2014. gadu, elektriskā jauda tika palielināta par 6.3 %, kas ir 12.8 GW (WindEurope, 2016).

Vēja parks Grobiņas pagastā tika uzstādīts 2002. gadā, kas tolaik pēc elektriskās jaudas bija lielākais vēja parks Baltijā. Tajā ietilpa 33 VES ar jaudu 0.6 MW un kopējo vēja parka jaudu 19.8 MW. (BNS, 2002). Nozīmīgs ir arī 2012. gadā Alsungas pagastā uzbūvētais vēja parks, ko sauc par "Reģu vēja parku". Tajā ietilpst 10 vēja stacijas ar vienas stacijas elektrisko jaudu 250 kW, sastādot parka kopējo jaudu 2.5 MW (Lēvalde A., 2011).

Latvijas teritorijā lielākās jaudas VES parks tika uzstādīts 2012. gadā Popes un Tālgales pagastos, kas atrodas netālu no Ventspils. Vēja parkā ietilpst 9 vēja stacijas ar katras stacijas elektrisko jaudu 2.3 MW. Vēja parka kopējā elektriskā jauda ir 20.7 MW. (Kursītis, 2012). Tas ir pēc elektriskās jaudas lielākais vēja parks Latvijā, kurš ir lielāks par Grobiņas pagastā uzstādīto vēja parku. Jāpiemin, ka vēja parkos Latvijā tiek uzstādītas VES ar horizontālu rotoru, kas ir mūsdienās vēja parkos vienīgais izmantotais konstruktīvais veids.

1.2. Likumdošana un tās ietekme uz vēja enerģijas ieguvi Latvijā

Vēja enerģijas ieguve Latvijā saistās ar virkni noteikumu, kas ierakstīti likumdošanā. Kā pamats ir Elektroenerģijas tirgus likums par elektroenerģijas tirgus nosacījumiem, kas nosaka kārtību, kādā notiek enerģijas apguves process no tā likumiskās puses. Elektroenerģijas ražošana no AER nozīmē divpusēju sadarbību starp ražotāju un pircēju. Atkarībā no VES jaudas ir paredzēta noteikta kārtība, kā ražotājs var veikt elektroenerģijas pārdošanu valsts elektrotīklā (Latvijas Republikas tiesību akti, 2016a).

Atbilstoši Latvijas Valsts likumdošanai elektroenerģijas ģenerācijas iekārtas, t.sk. VES, līdz 16 A (220 V vai 400 V) ir iekļautas mikroģeneratoru grupā (Latvijas Republikas tiesību akti, 2016a). AER īpatsvara palielināšanai Latvijā ir izveidota neto norēķina sistēma, kuras ietvaros sadales sistēmas operators, ņemot vērā ar lietotāju noslēgto vienošanos, veic uzskaiti par lietotāja patērēto un saražoto elektroenerģiju. Lietotāja maksājums tiek aprēķināts no patērētās elektroenerģijas apjoma atskaitot sistēmā nodotās elektroenerģijas apjomu (Sadales tīkls, s.a.a). Latvijā 2015. gadā tika noslēgti 209 neto uzskaites sadarbības līgumi par kopējo elektrisko jaudu līdz 1155 kW ar nosacīti vidējo jaudu vienā pieslēguma punktā 5.52 kW, kas ir tikai 50 % no maksimāli atļautās pieslēguma jaudas (Sadales tīkls, s.a.b).

Tiesības izmantot neto norēķinu sistēmu ir fiziskām personām vai dzīvokļu īpašnieku biedrībām, kurām pieder vai kuru lietošanā ir viena vai vairākas AER iekārtas, kuru kopējā nominālā jauda nepārsniedz 11 kW pie 400 V (Latvijas Republikas tiesību akti, 2016a).

Vadošais elektroenerģijas pircējs Latvijā ir SIA "Elektrum Latvija" (Elektrum, 2016). Elektroenerģijas sadale un pārvade notiek valsts elektriskajos tīklos, ko apsaimnieko uzņēmums AS "Sadales tīkli". Lai elektroenerģiju varētu ražot un pārvadīt valsts elektriskajā tīklā, ražotājam ir nepieciešams izpildīt noteiktas prasības elektroenerģijas kvalitātei (Sadales tīkls, 2016a). Mājsaimniecība neto uzskaitē var tikt pievienota izvēloties savu mikroģeneratoru un pieslēdzot to tīklam atbilstoši likumā noteiktajām prasībām.

Iekārtām, kas veic elektroenerģijas nodošanu tīklā, ir jābūt atbilstošas kvalitātes, kas ir noteikts ar standartu LVS EN 50438 "Prasības mikroģeneratoru pievienošanai paralēli publiskajiem zemsprieguma tīkliem" (Sadales tīkls, 2016a). Saražotās un tīklā nodotās elektroenerģijas kvalitātes prasības ir noteiktas vairākos standartos. Lai nodrošinātu elektroenerģijas kvalitāti un drošu iekārtas ekspluatāciju, VES iekārtas uzstādītājam ir nepieciešams izpildīt standartos noteiktās darbības (1.5. att.). Ir liels daudzums atbilstības standartu, pēc kuriem ir jābūt visam atbilstoši izpildītam. Tie ir svarīgi, lai nodrošinātu valstiskā līmenī nepieciešamo enerģijas kvalitāti un drošu iekārtas ekspluatāciju (Latvijas valsts standarts, 2008.).



1.5. att. Mikroģeneratoru atbilstības standarti

Ja VES jauda nepārsniedz maksimāli pieļaujamo – 11 kW pie 400 V, tad elektroenerģijas nodošanas process kopējā tīklā ir atvieglots. Gadījumā, ja maksimālā jauda pārsniedz 11 kW pie 400 V, tad būvniecības un elektrotīkla pieslēguma procesā iesaistās AS "Latvenergo", SIA "Elektrum Latvija" un AS "Sadales tīkls", kā arī attiecīgās pašvaldības būvvalde un VES būvniecības publiskās apspriedes komisija.

Ja VES uzstādītā jauda ir virs 11 kW pie 400 V, tad stājas spēkā virkne noteikumu par stacijas pieslēguma atļaujas iegūšanu (Latvijas Republikas tiesību akti, 2012):

- 1. stacijas saimniekam jānodrošina elektrolīnija līdz tuvākajam sprieguma transformācijas punktam;
- 2. stacijas saimniekam jānodrošina visas līnijas pieslēguma izmaksas transformācijas punktā;
- 3. gadījumā, ja tuvākais pieslēguma punkts neatbilst stacijas pieslēguma prasībām, tad stacijas saimniekam ir jāveic pieslēguma punkta rekonstrukcija;
- 4. stacijas saimniekam jānodrošina pieslēguma punktā visas releju aizsardzības un telemehānikas iekārtas pieslēguma aizsardzības nodrošināšana;
- 5. pēc pieslēguma veikšanas stacijas saimniekam jāgarantē, ka stacijā tiek nodrošinātas visas elektrosistēmas aizsardzības;
- nododamā sprieguma kvalitāte tiek reglamentēta pēc energostandarta LEK-018 "Barošanas sprieguma raksturlieluma normas publiskajā elektroapgādes tīklā", kas nosaka elektroenerģijas kvalitāti;
- stacijās ar jaudu lielāku par 50 kW jāuzstāda reaktīvās jaudas kompensācijas iekārtas, lai nodrošinātu reaktīvās jaudas attiecību pret aktīvo jaudu (vērtību moduļu attiecība) mazāku par 0.4 (tgφ < 0.4 vai cosφ > 0.929);
- 8. stacijas saimniekam par saviem līdzekļiem jāierīko ģeneratoru izstrādātās elektroenerģijas uzskaite, skaitītājiem un strāvmaiņiem jāatbilst likuma "Par mērījumu

vienotību" un "Tīkla kodeksa", kā arī AS "Sadales tīkls" iekšējo normatīvo dokumentu prasībām (ja elektrostacijas elektriskā jauda < 50 kW, un tās pašpatēriņš ir < 10 % no izstrādātās enerģijas, pieļaujams neierīkot izstrādātās elektroenerģijas uzskaiti);

- 9. stacijas saimniekam jāizstrādā projekts elektroenerģijas sistēmas tīklu izmaiņām, ieskaitot releju aizsardzību un automātiku, elektrostacijas un elektroenerģijas sistēmas saskaņotas darbības nodrošināšanai (projektā jāuzrāda ģeneratora un saites transformatora aktīvā un reaktīvā pretestība, to nominālā jauda un spriegums, jāiekļauj elektrostacijas releju aizsardzības darbības apraksts, releju aizsardzības iestatījumu aprēķini elektrostacijas pieslēguma vietai);
- 10. elektrostacijai jānodrošina ģeneratoru automātiska atslēgšana starpfāžu īsslēguma vai zemesslēguma gadījumā tuvākajā ar elektrostaciju saistītajā elektroenerģijas sistēmas tīklā, kuru ietekmē ģenerators;
- 11. lai izslēgtu nesinhrona sprieguma padošanu no elektroenerģijas sistēmas, elektrostaciju ar sinhronajiem ģeneratoriem pieslēguma vietās jāuzstāda iekārtas ģeneratoru automātiskai atslēgšanai no elektroenerģijas sistēmas;
- 12. VES saimniekam jāuzstāda spriegummaiņi, sinhronisma uztveršanas un sprieguma kontroles releji, ģeneratoru sprieguma vektoru nobīdes izmaiņas momentānas darbības releji, kā arī jāuzrāda dokumentāls apliecinājums elektrostacijas saražotās elektroenerģijas kvalitātes pārbaudes atbilstībai IEC 61400-21 standarta prasībām.

Lai nodrošinātu atbilstošu elektroenerģijas kvalitāti un energoapgādes drošumu lietotājiem, elektroenerģijas ražotājam jāiesniedz AS "Sadales tīkls" dokumentāls apliecinājums par VES projektēšanas un izgatavošanas atbilstību sekojošu standartu prasībām (Latvijas Republikas tiesību akti, 2012):

- 1. LVS EN 61400-1:2006/A1:2011 "Vējturbīnas. 1.daļa: Projektēšanas prasības";
- 2. LVS EN 61400-2:2006 "Vējturbīnas. 1.daļa: Mazo vējturbīnu projektēšanas prasības";
- LVS EN 61400-3:2009 "Vējturbīnas. 3. daļa: Piekrastes zonas vējturbīnu projektēšanas prasības (IEC 61400-3:2009)";
- 4. "Vēja elektrostacijas pieslēguma tehniskie noteikumi", LEEA, Rīga, 2008 tikai elektrostacijām ar jaudu 250 kW un lielāku.

Elektroenerģijas ražotājam tiek dota iespēja pārdot saražoto elektroenerģiju, aprēķinot pēc tā brīža elektroenerģijas biržas cenas (Latvijas Republikas tiesību akti, 2016b). Saņemot neto uzskaites iespējas, mājsaimniecībā ražotājam ir iespēja samaksāt tikai starpību starp patērēto un saražoto vai iegūt ienākumus gadījumā, ja tiek saražots vairāk nekā patērēts. Taču nedrīkst aizmirst to, ka neto uzskaite paredz atmaksāt patērētās elektroenerģijas sadales un pārvades pakalpojumus, kā arī abas noteiktās valsts komponentes, kas ir par AER un koģenerācijām. Tas nozīmē, ka, ja starpība starp patērētās elektroenerģijas pārvadi un sadali, un par abām valsts noteiktajām komponentēm (Latvijas Republikas tiesību akti, 2016b).

Mājsaimniecībām Latvijā maksa par elektroenerģiju tiek sastādīta no četrām sastāvdaļām. Pirmā sastāvdaļa ir elektroenerģija, otrā sastāvdaļa ir elektroenerģijas sadales un pārvades pakalpojumi. Pēdējo sastāvdaļu veido divas komponentes, kur viena ir par AER saražotās enerģijas, bet otra par koģenerācijas staciju saražotās elektroenerģijas izmantošanu, kas kopā sastāda 0.027 EUR·kWh⁻¹ (1.6. att.).

Elektroenerģija – Elektrum Ekonomiskais	0.05483 EUR/kWh	
Sadales un pārvades pakalpojumi	0.0564 EUR/kWh	
Atjaunojamo energoresursu komponente	0.01054 EUR/kWh	
Koģenerācijas obligātā komponente	0.01625 EUR/kWh	
	+	
PVN nodoklis	21 %	

1.6. att. Elektroenerģijas izmaksas sadalījums Latvijas mājsaimniecībās (Informācija uz 01.07.2016.).

Latvijas likumdošanas noteiktais elektroenerģijas iepirkuma atmaksas veids parāda, ka paaugstināt lielāku VES ekonomisko potenciālu ir iespējams, izmantojot kvazi-autonomas sistēmas. Taču šāds virziens ir attīstāms tieši mazajās saimniecībās ar aktīvāku elektroenerģijas patēriņu. Likumdošanas sakārtošana šādu sistēmu izveidei ir nepieciešama, lai paaugstinātu cilvēku interesi uzstādīt savās lauku saimniecībās VES ar jaudas lielumu no 10 kW līdz 50 kW. VES ar šādu elektrisko jaudu pie Latvijas vidējā vēja ātruma 5 m·s⁻¹ spēj nodrošināt elektroenerģiju vidēji vienai līdz 5 mājsaimniecībām vai vienai nelielai lauku saimniecībai. VES izmantošanas uzlabošanai ne vienmēr ir nepieciešams finansiāls atbalsts. Vieglāka projekta īstenošanas procedūru, kas turpina nodrošināt nepieciešamo iekārtas ekspluatācijas drošumu un cilvēku labklājību, ir iespējams uzskatīt par efektīvu instrumentu cilvēku lielākai ieinteresētībai VES iegādē.

1.3. VES konstruktīvo risinājumu salīdzinošā analīze

Komerciālās VES tiek iedalītas divās galvenajās pamatgrupās pēc rotora vārpstas konstruktīvā izveidojuma: horizontālās ass un vertikālās ass. Horizontālās ass VES konstruktīvā uzbūve ir ievērojami daudzveidīgāka salīdzinājumā ar vertikālās ass VES, kam ir daudzveidīgāka rotora uzbūve. Horizontālās ass VES konstrukcijas pamatā ir propellera tipa rotors, turpretī vertikālās ass VES rotors var tikt izveidots no dažādiem spārnu konstrukcijas veidiem, kurus iedala divās pamatgrupās. Horizontālās ass VES iedalījums izveidojies vēsturiski, kad VES konstrukcija tika mainīta atkarībā no nepieciešamās uzstādīšanas vietas un uzstādāmās jaudas (1.7. att.).

Vertikālās ass vēja stacijas konstruktīvi izveidotas ar mazāk specifiskiem iedalījuma atzariem, primāri tās iedalot tikai pēc darba aerodinamiskā spēka, kas var būt cēlējspēks vai spiedspēks (1.7. att.). Atkarībā no VES uzstādīšanas reģiona ir iespēja izvēlēties vispiemērotāko VES konstrukciju. Pamatojoties uz to, ka VES mūsdienās tiek uzstādītas visās klimatiskajās zonās gan apdzīvotos, gan neapdzīvotos reģionos. Šī iemesla dēļ pēc vairāku gadu aktīvas nozares attīstības ir izveidojies sazarots iedalījums.



1.7. att. VES iedalījums pēc konstruktīvā risinājuma

1.3.1. Horizontālās ass VES konstruktīvie risinājumi

Komerciālie VES risinājumi mūsdienās vispilnīgāk ir atstrādāti horizontālās ass vēja rotoriem, tāpēc vēja parki galvenokārt tiek veidoti, izmantojot horizontālās ass VES. 1887. gadā Skotijas akadēmiķis James Blyth izveidoja pirmo horizontālās ass vēja staciju ar jaudu 12 kW, lai veiktu savas vasaras mājas elektrifikāciju. Pateicoties mūsdienu tehnoloģijām, 2014. gadā tika uzbūvēta mūsdienās jaudīgākā vēja stacija "Vestas V164-8MW", kuras jauda ir 8.0 MW (MHI Vestas Offshore Wind, s.a.). Eiropā vēja parkos visizplatītākais vienas vēja stacijas jaudas diapazons ir no 1 līdz 2.5 MW, kur vienā vēja parkā var būt vairāki desmiti vēja staciju (The European Wind Energy Association, s.a.).

Horizontālās ass vēja stacijas iedalās divos veidos - pretvēja un pavēja. Pretvēja rotors strādā ar regulēšanas sistēmu, kas veic rotora spārnu pagriešanu atbilstoši vēja virzienam. Vējš šajā gadījumā vispirms sasniedz rotora spārnus un tikai pēc tam torni. Pavēja rotora gadījumā vējš vispirms sasniedz torni un tikai pēc tam rotora spārnus. Šāds rotors automātiski pagriežas atkarībā no vēja virziena (Centurion Energy, 2013). Pavēja tipa rotors tiek izmantots mazas jaudas vēja stacijās ar elektrisko jaudu līdz 10 kW. Tā kā šāds rotors pagriežas pa vējam bez regulēšanas sistēmas, tad samazinās ražošanas un apkalpošanas izmaksas.

Horizontālās ass VES uzbūve var atšķirties atkarībā no elektriskās jaudas. Mazas jaudas vēja stacijām iekšējā konstrukcija ir daudz vienkāršāka, nodrošinot pamatfunkcijas, kas ir nepieciešamas VES darbībai. Lielas jaudas vēja stacijām visi darbības mehānismi un agregāti ir ievietoti gondolā. Gondolas izmēri daudzās VES ir pat lielas tehniskās telpas izmērā, kur tehniskais personāls veic nepieciešamos darbus pie iekārtām pasargāti no ārējiem laika apstākļiem. Vēja kinētiskās enerģijas pārveidošana mehāniskajā enerģijā sākas ar VES spārna

rotora rotāciju, kur tālāk ar rotora vārpstu mehāniskā enerģija tiek padota caur multiplikatoru uz ģeneratora vārpstu, kurš mehānisko enerģiju pārveido elektriskajā enerģijā (Encyclopaedia of Alternative Energy, 2011). Lai uzlabotu VES lietderības koeficientu, tiek izmantota spārnu iestatīšanas leņķa un gondolas pagrieziena leņķa regulēšanas sistēma, veicot vēja ātruma un virziena mērīšanu ar speciāliem mēraparātiem (1.8. att).



1.8. att. Horizontālās ass pretvēja tipa VES uzbūve

1 – rotora spārni; 2 – rotors; 3 – spārna iestatīšanas leņķis; 4 – rotora bremze; 5 – rotora vārpsta; 6 – multiplikators; 7 – elektroģeneratora vārpsta; 8 – elektroģenerators; 9 – kontrolleris; 10 – vēja ātruma sensors; 11 – gondola; 12 – gondolas pagriešanas mehānisms; 13 – gondolas pagriešanas elektrodzinējs; 14 – vēja stacijas masts.

Vēja enerģijas izmantošana tiek aprakstīta ar termodinamikas, spēka vektoru, spiediena fizikālo efektu likumiem, kuru rezultātā vēja kinētiskā enerģija tiek pārveidota VES rotora mehāniskajā enerģijā. Vēja kinētiskā enerģija E_c ir aprēķināma pēc formulas (Ragheb M., 2014):

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot t, \qquad (1.1)$$

kur m – gaisa plūsmas masa, kg \cdot s⁻¹;

- v vēja lineārais ātrums, $m \cdot s^{-1}$ -,
- t laiks, s.

Gaisa plūsmas masu nosaka vēja rotora appūtes laukums, gaisa blīvums un vēja lineārais ātrums:

$$m = \rho \cdot v \cdot S, \tag{1.2}$$

kur ρ – gaisa blīvums, kg·m⁻³;

S - rotora appūtes laukums, m².

No izteiksmēm 1.1. un 1.2. var aprēķināt vēja jaudu Pv:

$$P_V = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot t\right)}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$
(1.3)

Ikvienas VES nozīmīgs energoefektivitātes rādītājs ir lietderības koeficients η, kas nosaka, cik lietderīgi pievadītā vēja kinētiskā enerģija tiek pārveidota elektriskajā enerģijā. VES lietderības koeficients ir atkarīgs no sekojošiem faktoriem: spārnu aerodinamiskās kvalitātes, spārna tipa, rotora ātrgaitas koeficienta, spārnu relatīvā appūtes leņķa, vēja stacijas mehānisko pārvadu kvalitātes un ģeneratora lietderības koeficienta. VES kopējo lietderības koeficientu izsaka sakarība (Serebryakov A., 2014):

$$\eta = \eta_a \cdot \eta_m \cdot \eta_e, \quad \eta_a = \frac{P_a}{P_v}, \quad \eta_m = \frac{P_m}{P_a}, \quad \eta_e = \frac{P_e}{P_m}, \quad (1.4)$$

kur η_a – rotora spārnu aerodinamiskais lietderības koeficients;

- η_m mehānisko pārvadu lietderības koeficients;
- $\eta_e ~-$ elektroģeneratora un elektrisko iekārtu kopējais lietderības koeficients;
- P_a aerodinamiskā jauda, W;
- $P_m uz$ ģeneratoru reducēta mehāniskā jauda, W;
- Pe elektrotīklā ģenerētā elektriskā jauda, W.

Ar speciāliem mēraparātiem iespējams veikt atsevišķā mezgla jaudas lielumu mērījumu, tādā veidā ir iespējams noteikt katra mezgla zudumus, salīdzinot ieejošās un izejošās jaudas lielumus. Vēja jauda P_v, kas tiek aprēķināta pēc vēja ātruma, iedarbojas uz VES rotoru, kuram izejā tiek iegūta rotora aerodinamiskā jauda P_a. Mehāniskie pārvadi kā, piemēram, vārpstas, gultņi un multiplikators izejā pārvada mehānisko jaudu P_m. Enerģijas pārveides posma nobeigumā, veicot mehāniskās enerģijas pārveidošanu elektriskajā enerģijā, izejā tiek saražota lietderīgā elektroenerģija P_e (Qasim A.Y., 2012) (1.9. att.).



1.9. att. VES enerģijas pārveide

$$\begin{split} 1-v\bar{e}j\check{s}; P_v-v\bar{e}ja \ jauda; \ 2-VES \ rotors; P_a-rotora \ aerodinamiskā \ jauda; \eta_a-aerodinamiskais lietderības koeficients; 3-VES mehāniskais pārvads; P_m-mehāniskā \ jauda, \eta_m-mehānisko pārvadu lietderības koeficients; 4-VES elektroģenerators un elektroiekārtas; P_e-elektriskā jauda; \eta_e-elektriskais lietderības koeficients. \end{split}$$

Komerciālo produktu tehniskajās pasēs tiek uzrādīts, ka VES izejas jauda ir elektriskā jauda (Hu P., 2009). Lai noteiktu kopējo VES lietderības koeficientu, pietiek nomērīt stacijas elektrisko jaudu un vēja ātrumu, pēc kura iespējams aprēķināt gaisa plūsmas jaudu:

$$\eta = \frac{P_e}{P_v}.$$
(1.5)

28

VES rotora lietderības koeficients tiek ierobežots ar Betza kritēriju, kas nosaka, ka tās lietderības koeficients nevar būt lielāks par 0,5926 (Ragheb M., 2014). Vējam, izejot caur rotoru, tiek patērēta enerģija gaisa daļiņu berzes un rotora radītās gaisa plūsmas pretestības pārvarēšanai (Hameed M.S., 2013).

Horizontālās ass VES visefektīvākā lietderības koeficienta paaugstināšanas metode ir spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas veikšana vēja stacijas darbības laikā. Vēja stacijās tiek izmantoti inženiertehniski risinājumi, kas leņķa iestatīšanu veic aktīvā vai pasīvā veidā. Aktīvo spārna leņķa iestatīšanu realizē ar elektrisko, hidraulisko vai pneimatisko piedziņu, kur, izmantojot vadības sistēmas signālu, leņķi regulē kā funkciju no gaisa plūsmas ātruma (1.10. att.). Mūsdienās VES spārnu iestatīšanas leņķa aktīvā regulēšana galvenokārt tiek veikta ar elektrisko piedziņu, izmantojot augstas precizitātes servomehānismus (Sachin K., 2012). Iestatīšanas leņķa pasīvā regulēšana notiek, izmantojot rotora rotācijas ātrumu, gravitācijas vai centrbēdzes spēkus. Šo spēku iedarbībā servomehānisms veic iestatīšanas leņķa izmaiņu.



1.10. att. Horizontālās ass VES spārna leņķa iestatīšanas servomehānismi
1 - rotora spārna stiprinājuma un atbalsta gultnis; 2 – elektriskais servo motors; 3 – pārvada mehānisms;
4 - hidrocilindra pozīcijas sensors; 5 – hidrocilindrs ar atgriezenisko saiti.

Horizontālās ass vēja rotora spārnu iestatīšanas leņķis tiek regulēts pēc vēja ātruma. Dīkstāves režīmā VES spārni ir izgriezti no vēja tā, lai vēja plūsma radītu vismazāko aerodinamisko spēku uz spārna aktīvo laukumu. Uzsākot darbu, vēja rotora spārni tiek iegriezti vējā, sasniedzot augstāko rotora lietderības koeficientu. Posmā starp minimālo un nominālo gaisa plūsmas ātrumu rotora spārna leņķis tiek iestatīts tā, lai nodrošinātu lietderības koeficienta maksimālo vērtību. Gaisa plūsmas ātruma posmā no v_{nom} līdz v_{max} spārna aktīvais leņķis tiek ieregulēts kā funkcija no vēja ātruma $\varphi = f(v)$ tā, lai VES elektroģeneratora jauda nepārsniegtu nominālo vērtību (1.11. att.) visā vēja izmaiņas apgabalā virs vnom (Schlecht B., 2011).



1.11. att. VES elektriskā jauda Pe kā funkcija no vēja ātruma

VES ātrgaitas koeficients λ nosaka aerodinamisko lietderības koeficentu. VES optimālais ātrgaitas koeficients ir atkarīgs no kontrukcijas veida un rotora spārnu dizaina. VES ātrgaitas koeficients tiek aprēķināts pēc sekojošas izteiksmes:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{\nu},\tag{1.6}$$

kur R – rotora rādiuss, m;

ω – rotora leņķiskais ātrums, rad·s⁻¹.

Horizontālās ass VES lietderības koeficients ir funkcija no ātrgaitas koeficienta un iestatītā spārna leņķa $\eta = f(\varphi, \lambda)$ (1.12. att.). Palielinot vai samazinot iestatīto spārna leņķi, neuzturot to maksimuma punktā, samazinās rotora lietderības koeficients η . Rotoriem, kam netiek koriģēts spārna iestatīšanas leņķis, spārni tiek iestatīti 6 grādu leņķī, kas tiek uzskatīts par optimālāko iestatīšanas leņķi (Vpturbines, s.a.).



1.12. att. Horizontālās ass VES lietderības koeficients η kā funkcija no vēja rotora ātrgaitas koeficienta λ pie dažādiem spārna iestatīšanas leņķiem φ

Ātrgaitas koeficients ir atkarīgs no rotora konstrukcijas. Horizontālās ass VES optimālo ātrgaitas koeficientu pamatā nosaka spārnu skaits rotorā. Jo lielāks spārnu skaits, jo optimālais ātrgaitas koeficients samazinās. Vidēji VES ar 3 spārniem optimālais ātrgaitas koeficients ir 6 līdz 7 (The Renewable Energy Website, s.a.). Ātrgaitas koeficients atkarīgs ne tikai no spārnu skaita rotorā, bet arī no spārna profila. Izmainoties spārna profilam, rotora optimālais ātrgaitas koeficients var samazināties vai palielināties. Tas ir izskaidrots ar plūsmas virziena izmaiņu applūstot spārna profilam (Bursa A., 2012).

1.3.2. VAVES konstruktīvie risinājumi

Vertikālās ass vēja rotori bija pirmās vēja enerģijas iekārtas, kuras tika pielietotas jau 7.-10. gadsimtā ūdens pārsūknēšanai, kā arī graudu apstrādei. Johann Ernst Elias Bessler bija pirmais, kurš lika tālākus pamatus vertikālās ass vēja rotoru pielietojumos Furstenburgas pilsētā Vācijā 1745. gadā. Sigurds J. Savonius 1922. gadā Somijā izgudroja savonius tipa vertikālās ass vēja stacijas rotoru, kas darbojas ar spiedspēka palīdzību, un ko mūsdienās plaši izmanto un uzlabo (REUK, 2014). 1931. gadā franču aerodinamikas inženieris Georges Jean Marie Darius izgudroja un patentēja pirmo industriālo vertikālās ass vēja stacijas veidu, kuru vēl šodien sauc izgudrotāja vārdā (Ramasamy N., s.a.).

Mūsdienās komerciālos VES izstrādājumos tiek pielietoti četri galvenie vertikālās ass rotora veidi (1.13. att.). Vispopulārākie un tehnoloģiski efektīvākie ir Darius H-Tipa un Helix-Tipa rotori. Mazāk populāri ir Darius klasiskais rotors un Savonius. Savonius tipa rotora būtiskākā atšķirība no Darius rotoriem ir tāda, ka to darbina spiedspēks, nevis cēlējspēks. Pētījumi ir pierādījuši, ka lietderības koeficients Savonius rotoriem ir zemāks salīdzinājumā ar Darius rotoriem (Widodo W.S., 2012).



1.13. att. Vertikālās ass vēja rotoru galvenie konstrukcijas veidi a – Darius klasiskais rotors; b – Darius H-tipa rotors; c – Darius Helix-Tipa rotors; d – Savonius rotors.

Neatkarīgi no rotora tipa VES jaudu nosaka vēja rotora kopējais appūtes jeb darba virsmas laukums. Darius vēja rotora darba virsmas laukumu S aprēķina sekojoši (D'Ambrosio M., 2010):

$$S = \frac{2}{3} \cdot D^2, \tag{1.7}$$

kur D_r – rotora diametrs, m.

Darius H-tipa un Savonius rotora appūtes laukumu izsaka (Sigernes F., 2016):

$$S = l \cdot \mathbf{D},\tag{1.8}$$

kur 1 – rotora spārna garums, m.

Darius H-tipa rotora veids ir daudz pētīts. Eksperimentos ir pierādīts, ka efektīvākais risinājums ir ar 3 vai 4 spārniem uz viena rotora (Andrej J.F., 2009). Spārnu skaits un spārna hordas garums ietekmē gaisa plūsmas izplūdi caur VES rotoru. VES rotora gaisa plūsmas izplūdes rādītājs ir parametrs, kas raksturo gaisa plūsmas izplūdi caur rotoru. Tas primāri nosaka rotora konstrukcijas galvenos parametrus: rādiusu, spārnu skaitu, spārna hordas izmēru (Taher G.A., 2012). Rotora gaisa plūsmas izplūdes koeficients tiek aprēķināts pēc izteiksmes:

$$\sigma = N \cdot c \cdot \mathbf{R}^{-1},\tag{1.9}$$

kur N - rotora spārnu skaits;

c – spārna hordas garums, m;

R – rotora rādiuss, m.

Ir divi galvenie vertikālās ass rotora lāpstiņu veidi, kur katrs strādā ar savu aktīvā spēka veidu – cēlējspēks vai spiedspēks. Spiedspēks tiek izmantots Savonius tipa rotoros, bet cēlējspēks - Darius tipa rotoros. Spiedspēks tiek izmantots vairāk pie zemākiem vējiem un ar zemākiem rotora ātrgaitas koeficientiem. Vidēji stiprā un stiprā vējā Savonius lāpstiņu forma ierobežo elektroenerģijas iegūšanas apjomus. Rotoriem ar spiedspēku ātrgaitas koeficients ir no 0.5 līdz 1.2 (Miau J.J., 2012).

Vairums VAVES mūsdienās izmanto cēlējspēku. Īpaši izveidots rotora spārns ir spējīgs būtiski palielināt iegūstamās jaudas apjomu, ja tiek uzstādīts vietās ar vidēji stipru un stipru vēju. VES konstrukcijas, kas izmanto cēlējspēka enerģiju, ar spārnu skaitu līdz 3 ir ātrgaitas rotori, kas nozīmē, ka to ātrgaitas koeficients ir lielāks par 2 (Eriksson S., 2013).

VAVES konstrukcija (1.14. att.) sastāv no rotora, kas var būt Darius vai Savonius tipa. Tālāk enerģija tiek pārvadīta, izmantojot mehānisko pārvadu uz ģeneratoru. Gan mehāniskais pārvads, gan ģenerators bieži vien tiek ievietots iekšā VES masta konstrukcijā, lai būtu pasargāts no ārējo apstākļu iedarbes un izskatītos estētiski. VES apstādināšanai normālas darbības režīmā (apkope, profilakse), bet, jo īpaši ekstremālās situācijās (tehniski bojājumi, vētra u.c.), tiek izmantotas dažādas konstrukcijas mehāniskās bremzes (Bati A.F., 2012).



1.14. att. VAVES konstrukcija

1 - rotors; 2 - spārni; 3 - spārna iestatīšanas leņķa servomehānisms; 4 - rotora bremze; 5 - rotora vārpsta;
6 - multiplikators; 7 - elektroģeneratora vārpstas bremze; 8 - elektroģenerators;9 - elektroģeneratora vārpsta;
10 - vēja stacijas masts; c - spārna hordas garums; R - VES rotora rādiuss; L - spārna garums.

Mūsdienās vēl aizvien ir liels apgrūtinājums izstrādāt VAVES ar lielu elektrisko jaudu (Ion N., 2012). Lielākā VAVES ar jaudu 2 MW ir uzbūvēta 2006. gadā projektā "Vertiwind turbine". 2017. gadā plāno pabeigt pirmo vēja parku, izmantojot 13 šādas vēja elektrostacijas, uzstādot tās Francijas provincē "Golf Du Lion" līcī. Vēja stacijas konstrukcija ir īpatnēja ar to, ka tā ir paredzēta jūras reģionam ar ūdens dziļumu līdz pat 200 m (Dodd J., 2014).

Mājsaimniecībā izmantotās VAVES ir ar elektrisko jaudu līdz 20 kW. Vispopulārākās ir VES līdz 5 kW. Tās tiek izmantotas gan sinhronā slēgumā ar elektrisko tīklu, gan patērētāju tiešai autonomai energoapgādei.

Prakse ir pierādījusi, ka horizontālās ass vēja stacijas ar jaudu līdz 5 kW lietderības koeficients ir $0.2 < \eta < 0.35$. VAVES lietderības koeficients ir $0.15 < \eta < 0.20$. Samazinātās ražošanas izmaksas un daudzveidīgāks pielietojums atsver vertikālās ass VES zemo lietderības koeficienta trūkumu (Alison R., 2008).

Vertikālās ass vēja stacijas lietderības koeficienta n uzlabošana, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa korekciju, ir efektīvs risinājums, kas dotu iespēju iegūt VES ar labāku lietderības koeficientu. Ir veikti dažādi pētījumi par spārnu iestatīšanas leņķa korekciju VAVES, taču mūsdienās komerciāli nav pieejama neviena šāda veida VES, kur būtu izmantota spārnu aktīvā leņķa korekcijas sistēma (Sachin K., 2012).

Patentos tiek aprakstīta spārnu regulēšana ar centralizētu mehānismu vai ar neatkarīgu piedziņu katram spārnam atsevišķi (Chougule P., 2014). Salīdzinot ar horizontālās ass vēja stacijām, spārnu uzstādīšanas leņķa korekcijas sistēmas vertikālās ass vēja stacijās ir ar papildus apgrūtinājumiem. Tas ir izskaidrojams ar VES rotora dažādajām konstrukcijām, kā arī regulēšanas servo mehānismu energoapgādi VES rotorā (Radhunathan V.R., 2011; Paluszek A.M., 2012).

1.4. VAVES izstrādes potenciāls un inovatīvi risinājumi Latvijā

2001. gada 14. novembrī Leonīds Ņikitins, Mihails Stečurins un Aleksandrs Ščerbina reģistrē starptautisku patentu "Vertical axis wind turbine" Nr.CA2433905 C, kas patentēts vairāku valstu patentu birojos (ASV, Vācija Itālija, Beļģija). Starptautisku ievērību ieguvis patentā aprakstītais VAVES rotora tips ar spārnu izvietojumu blokos (Scerbina A., 2009). Patenta autori un turētāji ir Latvijas pilsoņi un uzņēmumi. Izgudrojuma līdzautori Leonīds Ņikitins un Mihails Stečurins ir pieredzējuši speciālisti ar zināšanām aviācijas nozarē (Vertical axis wind turbine, 2001).



1.15. att. 2006.gada patenta EP1348075 B1 rotora un spārna profila ilustrējums
1 - rotora aploces diametrs; 2 - rotora spārnu bloks; 3 - spārns; 4 - spārna profila atainojums.

VAVES rotora lielākā īpatnība ir spārnu izvietojums blokā. Vienā blokā tiek izvietoti 4 spārni. Spārna profils ir nesimetrisks un ģeometriskais izvietojums tiek precīzi aprakstīts patentā, kas arī ir svarīgākā informācija vēja enerģijas ieguves tehnoloģijai ar patentā aprakstīto augsto lietderības koeficientu (1.15. att.).

2002.gadā viens no autoriem un patenta turētāja kompānijas WEA izpilddirektors Aleksandrs Ščerbina apgalvoja, ka rotora aerodinamiskais lietderības koeficients ir 0,82 un spējīgs ražot elektroenerģiju sākot no 2 līdz 24 m·s⁻¹, kas netiek izpildīts ar nevienu mūsdienu VES. Patenta autori apgalvo, ka optimālā konstrukcija ir eksperimentāli pārbaudīta un tā ir ar diviem spārna blokiem, kur katrā blokā ir 4 spārni (Latvijas Vēstnesis, 2002) (1.16. att.).

2009.gada februārī tika aizsākts projekts pie 40 kW jaudīgas VES izveides, izmantojot jauno tehnoloģiju ar režģa veida rotoru. Projektā tika iegūts un izmantots ES līdzfinansējums. Projekta kopējās izmaksas sastādīja 171 438.89 LVL, no kuriem 49 833.28 LVL bija ES finansējums. Projekts tika pieteikts no SIA "Latekols" puses un kompānijas izpilddirektors vārdiem pārliecinoši apgalvo, ka pateicoties šim projektam tālāk tiks aizsākta VES pārbaude un sērijveida ražošana (Ar ES atbalstu izstrādāts jauna vēja ģeneratora prototips, 2010; Pankovska E., 2012).



1.16. att. Vertikālās ass vēja rotors ar diviem spārnu blokiem 1 – rotora spārnu bloks; 2 – bloka spārns; 3 – rotors; 4 – VES tornis; ASV patents US 20090202356 A, 2009.

Projekta gaitā veiktie pētījumi un analīze parāda, ka sākotnējā izvirzītā hipotēze par divu bloku rotoru ar 4 spārniem vienā blokā kā optimālāko risinājumu, ir apšaubāma. Jaunākā informācija liecina, ka trīs bloku rotors dotu lielāku aerodinamisko griezes momentu M_a, jo ceturtais spārns darbojas pārāk lielā ēnas zonā, un nerada pietiekami labu aerodinamisko spēku un strādā kā bremzējošs elements (Nikitins L., 2011).

Darba autoram, strādājot pie šī projekta no 2011. gada par vadības sistēmas izstrādes inženieri, bija iespēja redzēt VES attīstību un iegūt papildus informāciju par projekta tālāko potenciālu. 2014. gada rudenī tika izstrādāts VAVES prototips Beļģijas pilsētā Ostendē, kur tas tika 3 mēnešus pārbaudīts un analizēts speciālā Gent universitātes poligonā. Iegūtie rezultāti liecināja par 2002. gada izstrādātā patenta tehnoloģiskām nepilnībām, kurās ir nepieciešams veikt optimizāciju ar bloku skaitu un spārnu skaitu blokā.

2015. gadā aizsākās vērienīgas investīcijas jaunas VAVES izstrādē ar elektrisko jaudu 25 kW. VAVES projekta investors ir Armands Garkāns, kurš 2016. gadā atklāja kompānijas tālākos plānus un padarīto. VAVES tika izveidots prototips, kurš ir uzstādīts pasaulē lielākajā VES laboratorijā ASV. Pēc kompānijas SIA "Genuine Wind Corporation" plāniem VAVES tiks testēta 2016. gadā un tālāk sāks plānot sērijveida ražošanu (Kesnere R., 2016).

1.5. VES konstruktīvo risinājumu salīdzinājums

Informācija, salīdzinot horizontālās ass vēja elektrostaciju (turpmāk – HAVES) starp vertikālās ass vēja elektrostaciju (turpmāk – VAVES), mūsdienās tiek pasniegta dažādās formās. Parādās vairāki dokumenti, pēc kuru satura tiek sniegta pārlieku pozitīva informācija par kādu no konkrētajiem veidiem. Apstrādājot visu informāciju, kas ir apskatīta, tika sastādīts salīdzinājums starp HAVES un VAVES. Priekšrocības un trūkumi tiek apskatīti divos appūtes laukuma S diapazonos, < 100 m² un > 100m². VAVES izteiktākā atšķirība ir spēja strādāt pie mazāka vēja ātruma, taču tās darbību ierobežo lielās gaisa plūsmas, pamatojoties uz to, ka VAVES neizmanto spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu. VES ar appūtes laukumu zem 100 m² ir mazāk trokšņaini un spēj sākt ražot enerģiju pie mazāka vēja ātruma. HAVES neatkarīgi no appūtes lauka lieluma ir vidēji ar vienādu ātrgaitas koeficientu, pamatojoties uz līdzīgu konstrukciju.

1.1. tabula

Rādītāji	S < 100 m ²		$S > 100 m^2$	
Rotora veids	Horizontāls	Vertikāls	Horizontāls	Vertikāls
Spārna profils	Nesimetrisks	Simetrisks	Nesimetrisks	Simetrisks
Vēja virziena	Aktīvs vai	Netiek	Aktīvs	Netiek
sekošanas	pasīvs	pielietots		pielietots
mehānisms				
Spārna iestatīšanas	Aktīvs vai	Netiek	Aktīvs vai	Netiek
leņķa mehānisms	pasīvs	pielietots	pasīvs	pielietots
Trokšņa līmenis	(5 – 60 dB)	(0 – 10 dB)	(10 – 70 dB)	(10 – 30 dB)
V _{min}	$2.5 - 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.5 - 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$4.5 - 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$3.0-5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
V _{max}	$\sim 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\sim 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Rotora pašstarts	pie v > 3 m·s ⁻¹	pie v > 4 m \cdot s ⁻¹	pie v > 3 m·s ⁻¹	pie v > 4 m \cdot s ⁻¹
Multiplikatora	Pēc izvēles	Pēc izvēles	Nepieciešams	Nepieciešams
izmantošana				
λ	~ 6	~ 3 līdz 4	~ 6	~ 3 līdz 4
Masta augstums	$L_{masts} = 5 \cdot D$	$L_{masts} = 2 \cdot D$	$L_{masts} = 2 \cdot D$	$L_{masts} = 1.5 \cdot D$

HAVES un VAVES salīdzinājums

HAVES un VAVES priekšrocības vai trūkumi jāvērtē un jāsalīdzina atkarībā no konkrētā pielietojuma. Atkarībā no pielietojuma ir iespējams izvērtēt, kurš no veidiem būs pats piemērotākais. Mūsdienās lielu tirgus daļu ar appūtes laukumu līdz 100 m² aizņem tieši VAVES, jo to īpašības vairāk piemērotas urbanizētiem vides apstākļiem. Taču, apskatot lielas jaudas VES, kuru appūtes laukums ir virs 100 m², piedāvājums no VAVES ir ļoti mazs un, sasniedzot noteiktu jaudas līmeni, komerciālo produktu piedāvājumā nav neviena produkta ar vertikālo asi. Komerciālie VAVES produkti tiek piedāvāti ar nominālo jaudu līdz 100 kW, kur appūtes laukums ir aptuveni no 150 m² līdz 200 m². Pašlaik tas ir lielākās jaudas VAVES, kas ir iegādājams ar visiem atbilstības sertifikātiem (Gardiner G., 2011).

VAVES izmantošanas rādītāju uzlabošanai elektriskās jaudas diapazonā no 10 kW līdz 100 kW nepieciešams veikt jaunas izstrādes iekārtas efektivitātes palielināšanai. Izmantošanas intensitāte līdz 10 kW ir pietiekoši liela un VAVES optimizācijā ir maz iespējamo veicamo efektivitātes uzlabošanas uzdevumu. Taču, apskatot jaudas diapazonu no 10 kW, uzstādīšanas intensitāte ir maza un VAVES efektivitāte ir zemāka, salīdzinot ar HAVES (Halstead R, 2011). VAVES lielākai komercializēšanai nepieciešams veikt dažādas jaunas izstrādes: rotora konstrukcijas un mehāniskā pārvada uzlabošanu, energoefektivitātes paaugstināšanu ar spārnu leņķa aktīvo regulēšanu, elektroģeneratora speciālas konstrukcijas izstrādi. Pētījumu šajā sfērā ir pārlieku maz un tie nav sasaistīti ar reāliem pielietojumiem komercializētās VAVES. Tas nozīmē, ka nepieciešams veikt padziļinātus pētījumus tieši energoefektivitātes paaugstināšanā, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa aktīvo regulēšanu VAVES, kas varētu radīt efektīvāku VAVES izmantošanu tautsaimniecībā.

Promocijas darbā kā pētījuma objekts tiek apskatīta VAVES un tās spārnu regulēšanas sistēma. Pamatojoties uz pētījumu trūkumu šajā nozarē, ir nepieciešams padziļināti pētīt vertikālās vēja stacijas simulācijas modeļu izstrādi un to produktīvu pielietojumu jaunu tehnoloģiju un produktu izstrādē.

1.6. Vēja stacijas enerģijas pārveides un pārvades sistēmu veidi un to pielietojums

VES, neatkarīgi no tās konstruktīvā izpildījuma, ir iekārta, kurā notiek enerģijas vairākkārtēja pārveidošana. Vispirms vēja kinētiskā enerģija tiek pārveidota vēja rotora mehāniskajā enerģijā, bet rotora darbinātais elektroģenerators to pārveido elektriskajā enerģijā. Atkarībā no VES pielietojuma var būt klasificējamas dažādas elektroenerģijas pārveidošanas un pārvadīšanas ierīces.

Mūsdienās vēja rotora mehāniskās enerģijas pārveidošanai elektriskajā enerģijā arvien vairāk tiek izmantoti pastāvīgo magnētu sinhronie ģeneratori (turpmāk – PMSG), kas atšķirībā no elektriskās ierosmes sinhronajiem ģeneratoriem ar rotorā iebūvētiem ierosmes tinumiem ir bezkontaktu elektriskās mašīnas ar rotorā iebūvētu pastāvīgo magnētu ierosmi. Pateicoties šādai konstrukcijai, PMSG ir augstāks lietderības koeficients un ievērojami augstāks ekspluatācijas drošums salīdzinājumā ar elektriskās ierosmes sinhronajiem ģeneratoriem, tādēļ PMSG ir piemērotāki VES ekspluatācijas apstākļiem (Khan S.A., 2013).

Darba pētījumos tiek likts uzsvars uz 3 fāzu 400 V PMSG izmantošanu vēja stacijās, kas ir kā viens no praktiskākajiem un ērtākajiem, un ekonomiskākajiem risinājumiem. PMSG izejas spriegums ir kā funkcija no rotora leņķiskā ātruma $U_{g.iz.} = f(\omega_g)$ un izejas strāva ir funkcija no slodzes pretestības un ģeneratora izejas sprieguma $I_{g.iz.} = f(U_{g.iz.}, R_{sl})$ (Abdessamad B., 2013). Pirmsākumos, izmantojot vēja stacijas tiešā slēgumā ar slodzi, tika iegūtas vienkāršās sistēmas, kuras sastāvēja tikai no enerģijas avota un patērētāja (1.17. att.). Šāds slēgums var tikt izmantots saimnieciskā ūdens sildīšanai un telpu apsildei (Raj C.T., 2009).



1.17. att. VES tiešs slēgums ar neregulējamu slodzes patērētāju

1 - pastāvīgo magnētu sinhronais ģenerators; 2 - elektroenerģijas pārvades līnija; 3 - neregulējams maiņstrāvas patērētājs (slodze).

Dažus patērētājus, piemēram, tehnoloģiskā ūdens sildītājus un telpu apsildes iekārtas var pieslēgt VES, izmantojot gan maiņstrāvas kopni, gan līdzstrāvas kopni (Hendrik V., 2012). Izmantojot līdzstrāvas kopni, tiek paaugstināts spriegums un ir iespējams simetriski slogot trīsfāžu ģeneratoru ar vienfāzes slodzi, piemēram, elektroenerģijas akumulatoru uzlādei, saimnieciskā karstā ūdens ieguvei un telpu apsildei (Ihor S., 2011).
Slodzes pieslēgumu elektroģeneratoram var izveidot ar maiņstrāvas vai līdzstrāvas kopni. Izmantojot sistēmā līdzstrāvas kopni, nepieciešams pielietot vadāmos vai nevadāmos taisngriežus. Taisngrieža izejā, uzstādot pasīvos vai aktīvos filtrus, iespējams nodrošināt nepieciešamās kvalitātes spriegumu un strāvu (1.18. att.) (Muszyński M., 2013).



1.18. att. Vēja stacijas slēgums ar elektroenerģijas neregulējamu slodzes patērētāju caur līdzstrāvas kopni

1 – pastāvīgo magnētu sinhronais ģenerators; 2 – taisngriezis (vadāms vai nevadāms); 3 – sprieguma un strāvas filtrs (aktīvais vai pasīvais); 4 – elektriskā slodze.

Neregulējams pieslēgums ar maiņstrāvas vai līdzstrāvas kopni var būt neefektīvs, jo nav iespējams regulēt ģeneratora slodzi. Slodze mainās patvaļīgi atkarībā no vēja ātruma, jo elektroģeneratora vārpstas rotācijas ātrums un izejas spriegums ir lineāras funkcijas no vēja ātruma $\omega_g = f(v)$ un Ug = f(v), bet vēja stacijas jauda ir kubiska funkcija $P_g = f(v^3)$. Tas nozīmē, ka pie pazemināta vēja ātruma elektroģenerators strādā nenoslogots, kā rezultātā vēja stacijas lietderības koeficients ir pazemināts (Pandey K.K., 2012).

Izšķir trīs primāros slogošanas veidus: 1 – slogošana maiņstrāvas kopnē ar aktīvu slodzi; 2 – slogošana līdzstrāvas kopnē ar aktīvu slodzi; 3 – slogošana ar elektriskā tīkla invertoru. Slogošana, izmantojot maiņstrāvas kopni, ir viens no vienkāršākajiem variantiem. Regulēšanai maiņstrāvas kopnes slēguma shēmā tiek izmantota iekārta ar tiristoriem, kas veic slodzes regulēšanas funkciju (1.19. att.). Šāds regulēšanas veids ir ērts saimnieciskā ūdens uzkarsēšanai un telpu apsildei, jo elektriskā slodze var tikt regulēta atkarībā no vēja ātruma (Channaveer. P.M., 2012).



1.19. att. Vēja stacijas regulējams slodzes elektriskais slēgums maiņstrāvas kopnē 1 – pastāvīgo magnētu sinhronais ģenerators, 2 – slodzes regulators, 3 – elektriskā slodze.

Vēja stacijas slodzes regulēšana līdzstrāvas kopnē ir plašāk izmantots regulēšanas veids, jo tas ir ērti piemērojams gan vienfāzes, gan trīs fāžu PMSG, gan arī līdzstrāvas patstāvīgo magnētu ģeneratoram (turpmāk – PMG). Šādā slēgumā regulēšanas iekārta atrodas starp filtru un slodzi (Abdessamad B.,2013). Slodzes regulēšana tiek veikta pēc maksimālā slodzes punkta sekošanas principa mērot vēja stacijas rotora rotācijas ātrumu vai vienkāršākā variantā ģeneratora izejas spriegumu (1.20. att.). Tas var tikt piemērots tautsaimniecībā, kur ir iespējams veikt akumulatora bateriju uzlādi, saimnieciska ūdens sildīšanu un telpu apsildi (Andrew K., 2010).



1.20. att. Vēja stacijas regulējams slodzes elektriskais slēgums līdzstrāvas kopnē 1 – pastāvīgo magnētu sinhronais ģenerators; 2 – taisngriezis (vadāms vai nevadāms); 3 – filtrs (aktīvais vai pasīvais); 4 – slodzes regulators; 5 - patērētājs (slodze).

VES viens no izplatītākajiem slodzes regulēšanas veidiem ir regulēšana ar tīkla invertoru (1.21. att.). Šādā gadījumā slodzes regulēšanas funkciju veic elektriskā tīkla invertors, kas ir kompleksa iekārta, kurā apvienots spēka un vadības interfeiss. Pārsvarā gadījumu tas ir gatavs un sertificēts izstrādājums, kas veic VES ģeneratora komutāciju ar elektrisko tīklu. AS "Sadales tīkli" ir publicējuši sarakstu ar izmantojamajiem invertoriem, pieslēdzot savu mikroģeneratoru valsts elektriskajiem tīkliem (Sadales tīkls, 2016b). Invertors ir iekārta, kas pārsvarā gadījumu satur sekojošas komponentes: vadāmo taisngriezi, pasīvos un aktīvos strāvas un sprieguma filtrus, līdzstrāvas sprieguma regulēšanas bloku, vadības bloku un pašu sprieguma invertoru, kas veic komutācijas procesu ar elektrisko tīklu (Damodarareddy K., 2013).



1.21. att. Vēja stacijas regulējams slodzes elektriskais slēgums izmantojot tīkla invertoru 1 – pastāvīgo magnētu sinhronais ģenerators; 2 – taisngriezis (vadāms vai nevadāms); 3 – filtrs (aktīvais vai pasīvais); 4 – DC sprieguma regulēšanas iekārta; 5 – invertors; 6 – elektriskais tīkls.

Vēja stacijas elektrisko slēgumu ar tīkla invertoru parasti izmanto tad, ja VES elektriskā jauda ir lielāka par 1 kW. Vēja stacijas elektriskās jaudas diapazonā no 0.1 līdz 1 kW tiek bieži izmantotas autonomās sistēmās, kur tiek izmantots pārsvarā gadījumu līdzstrāvas pastāvīgo magnētu ģenerators un slodze tiek regulēta, izmantojot līdzstrāvas kopnes slodzes regulēšanas iekārtu. Slodze, galvenokārt akumulatoru baterijas līdz 48 V spriegumam, tiek regulēta, izmantojot maksimālās slodzes punkta atsekošanas algoritmu (turpmāk – MPPT) (Bharanikumar R., 2010; Barambones O. 2012).

Ja VES saražoto elektrisko enerģiju izmanto tikai saimniecības vajadzībām, tad nav racionāli to nodot vispirms kopējā elektriskajā tīklā un pēc tam iepirkt no tīkla. Daudz lietderīgāk ir izmantot vienkāršu regulējamu slēgumu līdzstrāvas vai maiņstrāvas kopnē elektroenerģijas autonomai padevei uz patērētajiem, kā arī pārpalikuma enerģijas uzkrāšanai, lai to izmantotu brīžos, kad VES nedarbojas. Finansiālais ieguvums būtu pilna elektroenerģijas tarifa cena kopā ar visām pievienotajām maksām par pārvadi un papildus komponentēm. Zinātniskajos darbos tiek nepietiekami pētītas VES slogošanas iekārtas un to modelēšanas risinājumi enerģijas izmantošanā pie patērētāja.

1.7. Modelēšanas un simulācijas izmantošana VES pētījumos

VES pētījumos aktīvi tiek izmantota datortehnikas programmatūra kā instruments noteiktu darbību veikšanai. Tās iedala divās apakšgrupās: multifizikālais un matemātiskais

instruments. Multifizikālajam instrumentam nepieciešams definēt nepieciešamos ieejas parametrus. Lietotājam nav iespējams sastādīt matemātiskos vienādojumus fizikālo procesu aprakstam, jo tie ir slēgti programmas lietotājam. Datorprogrammas, kuras simulē fizikālos procesus, kas tiek aprakstīti ar lietotāja noteiktiem matemātiskajiem vienādojumiem, formulē kā matemātiskos instrumentus.

Ar datorprogrammatūras palīdzību ir iespējams strādāt pie problēmu risināšanas un pētījumu veikšanas, neizmantojot reālus fiziskus objektus (Wu D., 2007). Pirms datorprogrammas izvēles svarīgi saprast funkcijas, kuras jārisina, lai veiktu pētniecisko uzdevumu (1.22. att.).



1.22. att. Modelēšanas un simulācijas programmatūras iedalījums

VAVES fizikālo procesu modelēšanai tiek plaši izmantoti kā matemātiskie instrumenti, tā arī multifizikālie instrumenti. Multifizikālo instrumentu izmantošana vēl aizvien ir pārliecinoši nepieciešama, jo aerodinamiskie objekti vēl aizvien tiek aktīvi optimizēti un tiek plaši strādāts pie jaunu rotora dizainu izstrādes (Hameed M.S., 2012).

Pētījumos par VAVES fizikālo funkciju modelēšanu atklājas virkne trūkumu, kuri var būtiski iespaidot pētījumu rezultātu ticamību. Lielākajā daļā VAVES pētījumu tiek vienkāršota aerodinamiskā griezes momenta M_a aprēķināšanas metodika, izmantojot horizontālās ass VES modelēšanas vienādojumus. Pētījumos par M_a aprēķinu metodēm vertikālās ass un horizontālās ass vēja stacijām ir pierādījies, ka aprēķinu metodes krasi atšķiras (Singh M., 2008).

Izstrādātā simulācijas modeļa pārbaude tiek veikta 3 soļos: modeļa kompilācija, verifikācija, validācija. Simulācijas modeļa validācija ikvienā pētījumā ir sagādājusi lielākās grūtības. Simulācijas modeļa salīdzināšana ar eksperimentāliem datiem ir grūtākais posms, jo iegūt eksperimentālos datus bieži vien ir sarežģīts un dārgs process.

Darbā simulācijas tiek veiktas izmantojot Mathworks izstrādāto produktu MATLAB ar tā simulācijas pakotni *Simulink*. MATLAB ir pasaulē viena no vadošajām fizikālo procesu simulācijas un to aprakstošo matemātisko vienādojumu aprēķinu programmām, ar kuras palīdzību ir veikts lielākais vairums pētījumu.

1.8. Vēja stacijas vadības sistēmas struktūra un tālākas attīstības problemātika

Līdz ar VES attīstību un pieaugot jaunu algoritmu izpildes vajadzībām, attīstījās to vadības iekārtas un to iespējas. Pirmo VES funkciju nodrošināšanai tika izmantotas vienkāršas analogas vadības iekārtas, papildinātas ar releju loģiskajām vadības shēmām. Mūsdienās VES

vadībai tiek izmantoti programmējamie loģiskie kontrolleri (PLK) un dažādas pusvadītāju, digitālās un analogās mēriekārtas (Muhamed M.A.B., 2012).

PLK sistēmas loģiskā uzbūve tiek sastādīta no vairākiem interfeisiem. Secīgi pirmais ir signālu, informācijas nolasīšanas interfeiss. Nolasītā informācija no ārējās perifērijas tiek apstrādāta un filtrēta atbilstoši nepieciešamajam signālam. Filtrētā informācija tiek izmantota divos paralēlos interfeisos, kur abi ir sastādīti pēc lietotāja izveidotas loģikas (1.23. att.).



1.23. att. VES vadības sistēmas iekšējā struktūra

Tehnoloģijas nodrošināšanai tiek izmantots loģiskās programmas interfeiss, kas atkarībā no nolasītās ieeju informācijas sastāda nepieciešamo izeju stāvokli. Paralēli tam tiek analizēta ieejas informācija un atkarībā no tehniskām novirzēm tiek reaģēts uz iekārtu neatbilstošu darbību, kas tālāk izsauc VES apstādināšanu vai iekārtas tehniskā personāla brīdināšanu (Naik R., 2015). Apstrādājot loģisko programmu un iekārtu diagnostiku, tiek ierakstīts izeju stāvoklis, kas veic iekārtu darbināšanu.

VES vadības sistēma atbilstoši tehniskajam uzdevumam, izpilda vairākas vadības un kontroles funkcijas: bremžu sistēmas vadību, spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanu, gondolas pagrieziena leņķa kontroli, elektriskās slodzes regulēšanu, slodzes vai tīkla diagnostiku, ģeneratora diagnostiku, MPPT (*Maximal Power Point Tracking*) un tīkla sinhronizāciju (1.24. att.).

PLK nolasa informāciju no ikviena VES mezgla un iekārtas, kurā ir uzstādīti mērīšanas sensori. Atsevišķi mezgli, kā, piemēram, nomērītais vēja ātrums nodrošina informāciju ģeneratora slodzes regulēšanas sistēmai un spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmai. Vēja virziena mērījumi nepieciešami vertikālās VES spārnu iestatīšanas leņķa, vai horizontālās VES gondolas pagrieziena leņķa regulēšanas iekārtām.

VAVES lietderības paaugstināšanas risinājums ir spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma, kas spēj uzraudzīt VES optimālāko spārna iestatīšanas leņķi. HAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma ir pieejama lielākai daļai piedāvāto VES. VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma komerciāli netiek piedāvāta. Lai piedāvātu nākotnē VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma komerciāli netiek piedāvāta. Lai piedāvātu nākotnē VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma komerciāli netiek piedāvāta. Lai piedāvātu nākotnē VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, ir nepieciešams izpētīt tās iespējamos tehniskos risinājumus. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšana nodrošina ar atsevišķu PLK, vai VES vadības PLK. Atkarībā no sistēmas mērījumiem par vēja virzienu, rotora rotācijas ātrumu un pagrieziena leņķi, tiek aprēķināts spārna optimālais iestatījuma leņķis. Izmantojot servo mehānismus, ir iespējams veikt aprēķinātā iestatīšanas leņķa izpildi (Abbas F.A.R., 2010).



1.24. att. VES vadības iekārtu sadalījums pēc izpildes funkcijas

 $\begin{array}{l} 1-\text{centrālās vadības sistēma; } 2-vēja mērīšanas interfeiss; } 3-\text{spārnu iestatīšanas leņķa regulēšana un mērīšana; } \\ 4-\text{mehānisko pārvadu diagnostika; } 5-\text{elektroģeneratora slodzes regulēšana un stāvokļa uzraudzība; } \\ 6-\text{elektriskā tīkla mēriekārtas un tīkla invertora vadība; } 7-vējš, 8-\text{rotors un spārni; } 9-\text{mehāniskais pārvads; } \\ 10-\text{elektroģenerators; } 11-\text{elektriskais tīkls vai kāda cita veida slodze; } v-vēja ātrums; } \phi-vēja virziens; \\ \phi-\text{spārnu iestatīšanas leņķis; } n_r-\text{rotora rotācijas ātrums; } \phi_{uzd}-\text{spārnu iestatīšanas leņķa uzdevums; } \\ n-\text{mehānisko vārpstu rotācijas ātrums; } \theta-\text{rotora pagrieziena leņķis; } n_g-ģeneratora rotācijas ātrums; } \\ P_g-ģeneratora elektriskā jauda; P_{uzd}-ģeneratora jaudas uzdotā vērtība; U_e-tīkla spriegums; I_e-tīkla strāva; \\ P_e-tīkla elektriskā jauda. \end{array}$

Servo regulators sastāv no loģiskās vadības un spēka interfeisa. Servo regulatoram, vadot servo mehānismu, tiek izpildīts uzdotais spārna iestatīšanas leņķa uzdevums. Servo regulatoram loģiskās vadības elektroniskā shēma nodrošina sastādītās loģiskās programmas izpildi un servo regulatora un servo piedziņas diagnostiku. Servo piedziņa un servo regulators ir noslēgts mezgls (1.25. att.).



1.25. att. VES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas vadības sistēmas uzbūve 1 - vēja plūsma, 2 - VES spārns, 3 - spārna iestatīšanas leņķa mēriekārta, 4 - spārnu iestatīšanas leņķa vadībassistēma, 5 - servo mehānisma pagrieziena leņķa mēriekārta, 6 - servo regulatora vadības bloks,7 - barošanas iekārtas mēriekārtas, 8 - barošanas iekārta, 9 - servo regulatora spēka interfeiss, 10 - servoregulators, 11 - servo piedziņa, 12 - reduktors un mehāniskais pārvads, P_v - vēja jauda, n_{sp} - rotora spārnaātrums, n_{servo} - servo motora rotācijas ātrums, U_{servo} - servo motora spriegums, f_{servo} - servo motora frekvence,U_{baroš} - barošanas spriegums.

VES simulācijas modeļi dod iespēju ne tikai simulēt fizikālos procesus, bet arī sastādīt vadības sistēmas loģisko programmu. Programmu ir iespējams pārbaudīt ar sastādīto VES

simulācijas fizikālo objektu. Šāds risinājums palīdz pārbaudīt vadības sistēmas loģisko programmu pat līdz 95 % no kopējām kļūdām. Atkarībā no sastādītā VES fizikālā modeļa, ir iespējams iegūt tuvinātu vai precīzu vadības sistēmas programmu. MATLAB *Simulink* lietotājam nodrošina vadības sistēmas programmas konvertāciju no Simulink grafiskās programmas valodas uz PLK valodu ST (Structural text) (Kodati P. 2011).

Sastādītā simulācijas modeļa neatbilstība reālam objektam rada lielāko risku vadības sistēmas precizitātes nodrošināšanai. Reāla objekta mērījumiem ir nepieciešams veikt simulācijas objekta pārbaudi un tālāk to ir iespējams izmantot jaunu vadības sistēmas programmas algoritmu izstrādei.

1.9. Pētījumu pamatojums, struktūra un metodika

Līdz šim pieejamās literatūras un zinātnisko pētījumu apraksti liecina, ka VES izpēte ir bijusi un būs aktuāla arī turpmāk, taču informācija šajos avotos parāda to, ka trūkst vienota mērķa visiem darbiem kopumā. Mērķis ir panākt pētījumu rezultātu izmantošanu tautsaimniecībā, komerciālo ieguvumu, ekonomisko iespaidu. Darbos trūkst pētījumu realizācijas iespējas un pamatojuma to attīstīt tālāk, lai tas kļūtu par izmantojamu komerciālu produktu. Liels esošo pētījumu trūkums ir VAVES simulācijas modeļu verifikācija un validācija ar reāliem eksperimentālajiem datiem. Pētījumu daudzums par vertikālās ass vēja elektrostacijas spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmā ir nepietiekošs. Tas ir iemesls, kāpēc šīs sistēmas izstrādē ir nepieciešams pievērst īpašu uzmanību.

Balstoties uz apskatītajiem pētījumiem, nepieciešams izstrādāt VAVES simulācijas modeli, kas būtu izmantojams uzņēmumiem jaunu produktu izstrādē. Ir nepieciešams veikt pētījumus spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas konstruktīvajos risinājumos regulēšanas algoritmu izstrādē, radot jaunus realizējamus un izmantojamus algoritmus.

1.10. Pētījumu hipotēze, mērķis un uzdevumi

Pētījumu veikšanai izvirzītā hipotēze

vertikālās ass vēja elektrostacijas lietderības koeficients var tikt paaugstināts, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, kas ar atbilstošu vadības programmu veiktu spārnu leņķa regulēšanu pie nestacionāra rotora rotācijas ātruma un mainīga vēja ātruma uz regulējamo spārnu radītas aerodinamiskās slodzes.

Izvirzītā hipotēze sevī iekļauj vertikālās ass vēja stacijas darba rakstura izpēti, spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izpēti, nestacionārās vēja enerģijas ietekmes analīzi, rotora inerces ietekmi uz vēja elektrostacijas darbību un izejas elektrisko jaudu.

Zinātniskā darba mērķis ir teorētiski un eksperimentāli pamatot vertikālās ass vēja elektrostacijas simulācijas modeļa daudzpusīgo pielietojumu mūsdienu ražošanas un izstrādes procesos, vēja elektrostacijas spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas programmas izmantošanas iespējas.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti esoši uzdevumi:

- 1. teorētiski izpētīt esošās VAVES simulācijas metodes, izstrādāt VAVES simulācijas modeli, izmantojot MATLAB *Simulink* pakotni. Veikt simulācijas modeļa pārbaudi izmantojot eksperimentālos datus;
- analizēt pašreizējās uz VAVES rotoru reducētā aerodinamiskā griezes momenta aprēķinu un simulācijas metodes, izstrādāt simulācijas modeli, un, ar paplašinātu aprēķinu algoritmu, veikt optimālo spārnu aerodinamisko leņķu aprēķinu;
- veikt pētījumus par VAVES rotora simulācijas un inerces momenta aprēķinu metodēm. Izmantojot rotora simulācijas modeli, veikt petījumu par VAVES rotora inerces momenta ietekmi uz VAVES lietderības koeficienta ietekmi;

4. veikt teorētiskos pētījumus par pašreizējiem VAVES lietderības koeficienta paaugstināšanas risinājumiem un spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izmantošanas iespējām. Izstrādāt simulācijas modeli MATLAB *Simulink* vidē spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmai, validācijai izmantojot eksperimentāli iegūtos datus.

1.10. Darba tautsaimnieciskā nozīmība

- Pētījumu rezultātu ieviešana VES ražošanas procesā varētu likt tirgū parādīties pavisam jaunas paaudzes vēja stacijām, kuras spētu saražot vairāk elektroenerģijas un būtu izmantojamas daudzos līdz šim neizmantotos apvidos. Tas palielinātu saražotās elektroenerģijas kopējo daudzumu, palielinātu AER saražotās enerģijas īpatsvaru un energoneatkarību, samazinātu enerģijas importu un palielinātu eksportu.
- Izmantojot pētījumos izveidotās simulācijas un vadības metodes, Latvijā ir iespējams izveidot VES izstrādi. Tādā veidā iespējams izveidot jaunus VES ražošanas uzņēmumus, kas, pateicoties jaunajām VES tehnoloģijām, būtu spējīgi konkurēt ar citiem pasaulē vadošajiem VES ražošanas uzņēmumiem.
- 3. Jaunā simulācijas modeļa izmantošana dos iespēju izstrādāt ātrāk un precīzāk jaunus produktus, kā arī optimāli pielāgot iekārtu un mezglu parametrus, tādā veidā iegūstot mazāku pašizmaksu produktam un palielinot tā konkurētspēju pasaules tirgū.
- 4. Pētījumu pamatojums ir aplūkojams ES enerģijas neatkarības attīstības vadlīnijās (Ministru kabineta rikojums, 2016), pēc kurām ir paredzēts ieguldīt finansiālos līdzekļus jaunu tehnoloģiju attīstībā, kas uzlabotu vēja enerģijas apguves daudzumu, lietderību (International Energy Agency, 2016).

2. VERTIKĀLĀS ASS VĒJA STACIJAS VADĪBAS PĒTĪJUMI UN SIMULĀCIJAS MODEĻU IZSTRĀDE

VAVES modeļa izstrāde ir nepieciešama, lai uzlabotu jaunu produktu attīstību un ātrāku nonākšanu lietotāja sektorā. Simulācijas modeļa struktūru ir nepieciešams izveidot modulāru. Katram VES mezglam tiek izveidota atsevišķa apakšsistēma. Tas nodrošina iespēju lietotājam to ērti un vienkārši izņemt vai pievienot modelim. Lai realizētu pētījuma mērķi, ir nepieciešams apskatīt katru VES mezglu, kuram pakārtoti ir nepieciešams izstrādāt simulācijas modeļa apakšsistēmu (2.1. att.).



2.1. att. VAVES modulāra simulācijas modeļa struktūra

1 – gaisa plūsmas aerodinamiskā griezes momenta simulācijas apakšsistēma; 2 – VES rotora simulācijas apakšsistēma; 3 – mehāniskā pārvada simulācijas apakšsistēma; 4 – ģeneratora simulācijas apakšsistēma; 5 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma; v – gaisa plūsmas ātrums, m s⁻¹; M_a – aerodianmiskais griezes moments, Nm; ω_r – rotora rotācijas ātrums, rad s⁻¹; θ_r – rotora pagrieziena leņķis, °; ω_m – mehāniskā pārvada izejas rotācijas ātrums, rad s⁻¹; θ_m – mehāniskā pārvada izejas pagrieziena leņķis, °; ω_g – ģeneratora vārpstas rotācijas ātrums, rad s⁻¹; θ_g – ģeneratora vārpstas pagrieziena leņķis, °; ϕ – gaisa plūsmas leņķis pret ziemeļu virzienu, °.

Izvēloties šādu simulācijas modeļa struktūru, ir iespējams ērti sastādīt VES simulācijas modeli pēc noteiktas uzbūves. Lai nodrošinātu pilnīgu savietojamību ar reāliem objektiem, ir nepieciešams katrai apakšsistēmai veidot parametru ievades logu. Pievienojot apakšistēmu simulācijas modelim un ievadot reālā objekta parametrus, tiek iegūts funkcionējošs simulācijas modeļa elements. Modulārais simulācijas modeļa risinājums dos plašāku pielietojamību. Iegūstot jaunus fizikālā objekta pētījumu rezultātus, ir ērti veikt atsevišķu apakšsitēmu uzlabojumus vai pielāgojumus jaunajiem rezultātiem.

2.1. Vēja ātruma simulācijas metožu izpēte, simulācijas modeļa izstrāde

Vēja ātrums un gaisa masa nosaka vēja kinētiskās enerģijas lielumu, kas var tikt pārveidots elektriskajā enerģijā. Gaisa plūsmas ātruma modelēšana tuvināti dabiskam vējam ir svarīgs nosacījums VES darbības pētījumos. Analizējot pētījumus, kuros tiek izmantota vēja ātruma modelēšana, tika apskatīti tās galvenie veidi. Viens no veidiem, kā parādīt vēja ātruma kompleksi nestacionāro raksturu, ir to sadalīt atsevišķās komponentēs. Šāds risinājums ir ērts, jo dod iespēju veikt specifisku nosacījumu analīzi. Vēja ātrumu var sastādīt no četrām raksturīgām komponentēm (2.2. att.):

$$v(t) = v_b(t) + v_r(t) + v_g(t) + v_n(t), \qquad (2.1)$$

kur $v_b(t) - v\bar{e}ja \bar{a}truma b\bar{a}ze, m \cdot s^{-1};$

- $v_r(t) v\bar{e}ja \bar{a}truma k\bar{a}pums, m \cdot s^{-1};$
- $v_g(t) v\bar{e}ja \bar{a}truma brīze, m \cdot s^{-1};$
- $v_n(t) v\bar{e}ja \bar{a}truma troksnis, m \cdot s^{-1}$.

Pētījumu nolūkos reizēm ir nepieciešams simulācijas modeli pakļaut noteiktiem nosacījumiem, kuri dabā nepastāv, bet ir iespējams veikt kritisku nosacījumu pārbaudi. Tādā veidā ir iespējams pārbaudīt simulācijas modeļa reakciju uz dabā reti piedzīvojamiem nosacījumiem par vēja ātruma izmaiņu.



2.2. att. **Vēja ātruma komponentes (Rolan A., 2009)** a – vēja ātruma bāze, m·s⁻¹; b – vēja ātruma kāpums, m·s⁻¹; c – vēja ātruma brīze, m·s⁻¹; d – vēja ātruma troksnis, m·s⁻¹.

Pētījumos retāk tiek apskatītas gaisa plūsmas ātruma modelēšanas metodes ar Van Der Hoven aprēķinu un Veibula sadalījumu. Šīs metodes izmantošanas priekšrocība ir vēja ātruma simulācijas rezultātu atbilstība dabīgam vējam, bet trūkums ir vērtību atkārtojamība, jo aprēķinu metodes katru reizi ģenerē citu vēja ātruma skaitļu virkni. Standarts IEC 61400-12-1 norāda, ka vēja modelēšana, izmantojot Veibula sadalījumu, precīzāk atbilst dabiska vēja nestacionārajam raksturam.

VES simulācijās tiek izvēlētas divas galvenās metodes: sastādot vēja ātrumu no 4 komponentēm un veicot dabiska vēja ātruma mērīto datu ielādi MATLAB *Simulink* vidē. Sastādīt lietotāja izvēlētu vēja ātruma modeli Matlab *Simulink* vidē iespējams divos veidos. Viens no ērtākajiem veidiem, izmantojot bloku "*Signal Builder*". Pirms simulācijas ir iespējams vizuāli pārbaudīt signālu izejas vērtību grafiskā veidā. Otrajā variantā simulācijas modeli sastāda no 4 atsevišķiem blokiem: "*Constant*", "*Ramp*", "*Step*", "*Random Number*". Neatkarīgi no modeļa sastādītā veida iegūtais simulācijas rezultāts ir vienāds (2.3. att.).





a – simulācijas blokshēma izmantojot "Signal Builder" bloku; b – simulācijas blokshēma izmantojot atsevišķu komponenšu simulācijas blokus.

Sastādītā simulācijas blokshēma dod iespēju simulēt vēja ātruma nestacionāro raksturu un ierakstīt izejas datus blokā "*Scope*". Simulācijas rezultātā redzams, ka izejas vērtība atbilst četru primāro vēja simulēto raksturu summai. Sākumā tiek simulēts vēja ātruma kāpums, kam paralēli pastāv trokšņa komponente. Sākumā tiek simulēta 15 s ilga vēja ātruma brīze, kas atkārtojas divas pilnas reizes (2.4. att.).



2.4. att. Vēja ātruma simulācijas rezultāti

 $\begin{array}{l} v(t) \text{ - summārais vēja ātrums, } m \cdot s^{-1}; \ v_n(t) - v \bar{e} ja \ \bar{a} truma \ troksnis, \\ m \cdot s^{-1}; \ v_r(t) - v \bar{e} ja \ \bar{a} truma \ k \bar{a} pums, \\ m \cdot s^{-1}; \\ v_b(t) - v \bar{e} ja \ \bar{a} truma \ b \ \bar{a} z e, \\ m \cdot s^{-1}; \\ v_g(t) - v \bar{e} ja \ \bar{a} truma \ b \ \bar{a} z e, \\ \end{array}$

Lai simulācijā varētu izmantot mērītos vēja ātruma datus, tos nepieciešams ievadīt MATLAB vidē ar bloka "*From Workspace*" palīdzību, tādā veidā atainojot dabiska vēja ātrumu, kāds ir bijis nomērīts dabiskā vidē. Šāds simulācijas modelis dod iespēju fizikālo procesu simulāciju pārbaudīt pie dabiska vēja ātruma.

Lai gan pastāv pētījumi, kuros vēlas panākt VES vadības izpildi bez vēja ātruma mērīšanas, taču pašreiz tie ir ekonomiski neizdevīgi, jo tādā gadījumā VES nestrādā ar optimālo lietderības koeficientu (Abo-Khalil A.G., 2010). Analizējot veiktos pētījumus par vēja stacijas un tās mezglu simulāciju, vēja ātruma simulācijai ir jānodrošina divas galvenās funkcijas: atkārtojamība un vērtību kopas sastādīšana ar nepieciešamo raksturu. Izvēlētais vēja ātruma simulācijas risinājums nodrošina galvenos izvirzītos nosacījumus, lai veiktu nepieciešamo darba uzdevumu izpildi un sasniegtu izvirzītos mērķus.

2.1.1. Vēja simulācijas modeļa validācija ar eksperimentālajiem datiem

Vēja ātruma nestacionāro raksturu ir iespējams analizēt izmantojot mērījumus dabiskā vidē. Lai izprastu tuvāk vēja ātruma un virziena nestacionāro raksturu, tika veikts eksperiments ar vēja ātruma mērījumiem. Eksperimentālo mērījumu un datu analīzes mērķis bija tuvāk iepazīt un izprast vēja nelineārās dabas raksturu. Analīzes rezultātā būtu iespējams izveidot MATLAB *Simulink* simulācijas modeļu tuvāku atbilstību dabiskam vēja nestacionārajam raksturam.

Eksperimenta realizēšanā izmantotas trīs iekārtas: ultraskaņas vēja ātruma un virziena mēraparāts, datu nolasīšanas un apstrādes kontrolleris, datu saglabāšanas dators. Vēja ātruma un virziena mērīšana tika veikta ar ultraskaņas mēriekārtu WXT520.

Mēriekārtai tiek izmantots komunikāciju modulis ar RS485 interfeisu un ACSII (*American Code Standard for Information Interchange*) datu apraides protokolu. Dati tiek sūtīti uz datu nolasīšanas un apstrādes kontrolleri PM573. ACSII datu pakotnes apstrādā nepieciešamajās vērtībās. Tālāk dati no PM573 tiek sagatavoti ierakstīšanai datora HP6425 MySQL datu bāzē. Dati no WXT520 uz PM573 tiek ierakstīti ar intervālu 1 s, ierakstot vidējo vērtību vēja ātrumam, vēja virzienam. Dati no PM573 uz HP6425 tiek ierakstīti izmantojot TCP/IP interfeisu (2.5. att.).



2.5. att. Vēja eksperimentālo mērījumu slēguma shēma

1 - vējš; 2 - WXT520 vēja ātruma un virziena mēriekārta; 3 - PM573 datu nolasīšanas un apstrādes iekārta;

 $4-dators\ ar\ uzstādīto\ datu\ saglabāšanas\ programmatūru\ MySQL;\ 5-TCP\ datu\ p\bar{a}rraides\ kanāls;$

6 – RS485 datu pārraides kanāls ar ACSII protokolu.

Dati tiek saglabāti MySQL datubāzē tabulas veidā. Izmantojot funkciju "SAVECSV" ir iespējams veikt datu saglabāšanu *.csv (*comma separated value*) faila formātā, un tālāk veikt datu apstrādi MATLAB *Editor* vidē atbilstoši standartā IEC6400 noteiktajai procedūrai. Datu masīvu pēc vidējās vērtības aprēķina principa var sagatavot divos veidos. Pie liela datu apjoma ir iespējams izmantot veidu, kurā 1 min gara perioda dati nepārklājas sava starpā (2.6. att.a). Tajā pat laikā standarts IEC61400 nosaka, ka, ja ir iegūts mazāks daudzums apstrādājamo datu, tad ir iespējams izmantot metodi, kurā vidējās vērtības aprēķins tiek pabīdīts par vienu mērījumu, kas šī eksperimenta gadījumā ir 1 s (2.6. att.b). Tādā veidā ir iespējams iegūt lielāku aprēķināto vidējo vērtību datu daudzumu pie mazāka kopējā reģistrētā datu perioda.



2.6. att. **Vēja datu vidējās vērtības aprēķinu metodes** a – vidējās vērtības aprēķins bez datu kopu pārklāšanās; b – vidējās vērtības aprēķins ar datu kopu pārklāšanos.

Ultraskaņas mēraparāta relatīvā kļūda ir ± 3 %. Tas nozīmē, ka, palielinoties vēja ātrumam, palielinās arī tā mērījuma absolūtā kļūda. Pie vēja ātruma 10 m·s⁻¹ mērījuma kļūda ir $\pm 0.3 \text{ m·s}^{-1}$. Šāda mērījumu precizitāte ir pietiekama, lai veiktu VES vadības algoritma izpildi. 2.1. tabula

Parametrs	Mēraparāts	Diapazons	Kļūda	Izšķirtspēja
Vēja ātrums	WXT520	$060 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	± 3 %	$0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Vēja virziens	WXT520	0360°	\pm 3 °	1°

Vēja mērīšanas mēriekārtu parametri

Mērījumi tika veikti Beļģijas pilsētā Ostendē laika posmā no 3.09.2014. līdz 12.11.2014. WXT520 mēraparāts tika novietots 12 m augstā mastā un tika pieslēgts pie nolasīšanas ierīces. Mēraparāts tika kalibrēts atbilstoši instrukcijā noteiktajiem kritērijiem. Mērīšanas poligonā tuvāk par 200 m neatradās neviens vēja šķērslis lielāks par 10m. Mērījumi tika reģistrēti 3 mēnešu periodā. Datu apstrāde tika veikta noteiktām dienām, kurām atšķīrās vidējie vēja rādītāji. Datu apstrādei tika izvēlētas sekojošas dienas: 7.09.2014 ar vidējo vēja ātrumu v_{vid} = 2.89 m·s⁻¹; 16.10.2014. ar v_{vid} = 4.8 m·s⁻¹; 06.11.2014. v_{vid} = 4.9 m·s⁻¹.

2.2. tabula

	Diena	07.09.2014.	16.10.2014.	06.11.2014.
v, m·s⁻¹	V _{vid}	2.86	4.88	4.90
	V _{min}	0.60	1.10	1.50
	V _{max}	5.86	8.46	7.67
	Vstd	0.89	1.20	0.86
	Vmed	2.89	5.10	4.87
φ, °	• vid	138	35	316
	φ _{min}	0	0	291
	• max	284	356	354
	• std	21.2	65.8	15.5
	\$ med	139	21	317

Vēja ātruma un virziena mērījumu statistiskās apstrādes dati

Izvēlēto dienu reģistrētie dati tika sadalīt grupās katrā pa 60 ierakstiem, kur katrs ieraksts ir ar intervālu 1 s. Grupu izveide tika izvēlēta ar pārklāšanās metodi pamatojoties uz precīzāku datu atainošanu (2.6.b. att.). Vēja ātruma analīze var tikt izpildīta izmantojot klasiskās statistikas formulas, taču to rezultāti nesniedz pietiekami labu izpratni par vēja nelineāro dabu. Vējš, kas tiek mērīts, ir tikai rezultāts dabiskiem dabā notiekošiem termiskajiem procesiem, kur siltās gaisa masas mijiedarbojas ar aukstajām gaisa masām un veido gāzu plūsmu, ko izjūtam kā vēju. Ir daudzi pētījumi, kuros mēģināts veikt vēja paredzēšanu, taču rezultāti pierāda, ka tam ir daudz lielāka mijiedarbība ar globālākiem procesiem, kas liedz lokāli izveidot vēja paredzēšanas formulējumu.

Izgatavojot VES un veicot tās sertifikāciju, tiek veikti tās jaudas raksturlīknes mērījumi. Šo mērījumu apstrādi nosaka standarts IEC 61400-12-1:2005 *Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. Šajā standartā ir norādītas metodes, kā tiek apstrādāti vēja mērījumu dati. Vēja ātrums tiek noteikts pēc vidējās aritmētiskās metodes laika periodu 1 min. Eksperimentāli tiek veikts viens mērījums 1 sekundē. Tātad vienā minūtē ir reģistrēti 60 mērījumi, no kuriem aprēķina vidējo lielumu:

$$v_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} v_{n,i,j}, \qquad (2.2.)$$

kur v_i – vidējais vēja ātrums noteiktā laika periodā;

- Ni laika periodā reģistrēto ierakstu skaits;
- j mērījuma kārtas skaitlis;
- i vidējo vērtību kārtas skaitlis.

Vēja datu apstrāde pēc standarta IEC61400 ir paredzēta VES analīzei, taču analīzes informācija par vēja ātrumu un leņķi norāda, ka vēja plūsmai ir neregulārs raksturs, kas ir vairāku parametru funkcija. Apskatot veikto mērījumu rezultātus, grafiski redzams, ka katrā mērījumu dienā, ir iegūts cits vēja ātruma grafiks un citas to vidējās vērtības un dinamika (2.7. att.).



2.7. att. Vēja ātruma mērījumi Beļģijas pilsētā Ostende

Vēja leņķa mērījumi 07.09.2014. ir no 89 ° līdz 200 °. Grafiski redzams ka vēja leņķa mērījumi ir stabilāki un to izmaiņas ātrums ir mazāks. Leņķa izmaiņas lielums ir mazāks, salīdzinot ar vēja ātruma izmaiņu (2.8. att.).



2.8. att. Vēja pagrieziena leņķa mērījumi Beļģijas pilsētā Ostende

Vēja pagrieziena leņķa simulācija tiek veikta, izmantojot Veibula sadalījumu. Pārbaudot dabiska vēja pagrieziena leņķa sadalījumu, ir redzams, ka tas tiek pakļauts Veibula sadalījumam. Visu trīs dienu veiktajos mērījumos ir redzams, ka dati ir pakārtoti Veibula sadalījumam (1. pielikums, 2. pielikums, 3. pielikums). Tas nozīmē, ka simulācijās izmantotais Veibula sadalījums dod iespēju vēja pagrieziena leņķi simulēt ar dabiska vēja virziena raksturu, radot iespēju simulācijas modeli pārbaudīt pēc iespējas tuvāk dabiskam vējam (2.9. att.).



2.9. att. Vēja virziena sadalījuma grafiks

Vēja pagrieziena leņķa jeb vēja virziena mērījumi ir svarīgi abu VES veidu vadības sistēmām. Horizontālās ass VES pēc vēja pagrieziena leņķa regulē rotora gondolas pagrieziena leņķi. VAVES pēc vēja pagrieziena leņķa regulē spārnu iestatīšanas leņķi, jo rotora pagrieziena leņķis tiek aprēķināts pret vēja leņķi, izmainoties vēja leņķim izmainās aprēķinātā leņķu starpība, kas liek pārrēķināt optimālo spārna iestatīšanas leņķa uzdevumu. VES vēja ātruma mērījumi ir jāfiltrē ar maza laika aiztures filtriem 0.5 - 2 s, lai būtu maza inerce, bet netiktu lieki svārstīta sistēma. Horizontālās ass VES rotora gondolas pagrieziena leņķi regulē ar garākā laika posmā nomērīto vidējo vēja ātruma virzienu.

2.2. Aerodinamiskā spēka analīze un simulācijas modeļa izstrāde Darius H-tipa rotora VAVES stacijai

VES simulācijas modelim adekvāti jāimitē aerodinamiskos spēkus, kas iedarbojas uz reālu VAVES. Horizontālās ass vēja rotora aerodinamiskā spēka aprēķins ir vienkāršāks rotora konstrukcijas dēļ. VAVES gadījumā pastāv funkcionālas sakarības starp vairākiem mainīgajiem, no kuriem daudzi parametri ir empīriski pieņemti un pētījumos vēl aizvien nav atklāts to precīzais matemātiskais aprēķins.

Lai noteikto kopējo aerodinamisko spēku, MATLAB *Simulink* vidē piemērotākā ir spēka vektoru aprēķinu metode. Šāda aprēķinu metode tiek plaši izmantota daudzos pētījumos, jo ir pierādījusi savu lietderību un pielāgojamību dažādām VAVES konstrukcijām (Islam M., 2008).

Aerodinamisko spēku lieluma un rakstura rādītājs ir ātrgaitas koeficients λ , ko izsaka ar rotora spārna lineārā ātruma un vēja lineārā ātruma attiecību: (Mohamed M.H., 2012):

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{v},\tag{2.3}$$

50

kur ω_r – rotora rotācijas leņķiskais ātrums, rad s⁻¹;

R – rotora rādiuss, m;

v – gaisa plūsmas ātrums, $m \cdot s^{-1}$.

Rotējot VAVES rotoram tiek mērīts rotora pagrieziena leņķis Θ robežās no 0 ° līdz 360 °. Mainoties rotora pagrieziena leņķim, mainās spārna relatīvais appūtes leņķis α (Asress M.B., 2013):

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\Theta}{\lambda + \cos\Theta}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{F_R}{F_\tau}\right),\tag{2.4}$$

kur Θ – rotora pagrieziena leņķis, °;

 $F_r - v\bar{e}ja sp\bar{e}ka radiālā projekcija, N;$

 F_{τ} – vēja spēka tangenciālā projekcija, N.

Gaisa masa, iedarbojoties uz rotora spārnu, zaudē daļu kinētiskās enerģijas, kas izmaina gaisa masas kustības ātrumu un virzienu. Ar multifizikālajām datorprogrammām tiek simulēti un pētīti aerodinamiskie procesi, kas parāda gaisa masas plūsmas kustību rotora konstrukcijā (Fiedler A.J., 2009). Kinemātisko spēku aprēķinu metodē vēja aerodinamisko kvalitāti nosaka Reinoldsa skaitlis, kas parāda, cik lielā mērā rotors ietekmē ieplūstošo vēja ātrumu un virzienu (Qingan L., 2015):

$$R_e = \frac{\rho v c}{\mu}, \qquad (2.5)$$

kur c – spārna profila hordas garums, m;

 ρ – gaisa masas blīvums, kg·m³;

 μ – dinamiskā viskozitāte, 1.78·10⁻⁵ Pa·s.

VAVES darba zona ir telpiska, pretēji HAVES darba zonai, kas ir plakne. VAVES darba zona tiek sadalīta četros primārajos kvadrantos, kurus nosaka pēc spārna rotācijas un vēja virziena (pavēja, pretvēja, priekšvēja, aizvēja). Rotoram rotējot un gaisa plūsmai virzoties cauri rotoram, katrā rotācijas kvadrantā ir atšķirīgi gaisa plūsmas rādītāji. Spārnam virzoties aizvēja daļā, vēja ātrums ir zemāks kā priekšvēja daļā (2.10. att). Svarīgs nosacījums labākai vēja novadīšanai rotorā ir rotora konstrukcija, kas neradītu aerodinamisko pretestību (Deglaire P., 2009).

Kinemātisko spēku aprēķinu metode neparedz veikt tiešu vēja ātruma analīzi, tāpēc daudzos pētījumos tiek atsevišķi apskatīta vēja analīze rotorā ar "*Double stream tube*" aprēķinu metodi, kas balstās uz visa rotora darba laukuma sadalījumu telpiskos sektoros (Guerts B., 2010). Aerodinamiskā spēka aprēķins atkarīgs no sektora, kurā tas atrodas. Šāda metode dod precīzākus rezultātus, taču lielākais trūkums šai metodei ir aprēķinu rezultātu validācija, jo pašreiz nav pieejami tādi eksperimentālie dati, ar kuriem būtu iespējams salīdzināt izstrādāto aprēķinu metodi (Hamid A.H.A., 2012).

Nozīmīgs ir spārna profils, pēc kura aerodinamiskajiem koeficientiem tiek aprēķināts aerodinamiskais spēks uz spārnu. Pētījumos tiek eksperimentēts ar dažādiem spārna profiliem. Neskatoties uz to, ka augstus cēlējspēka rezultātus uzrāda nesimetriska veida spārna profils, eksperimenti parāda, ka simetrisks spārna profils rada mazāku bremzējošo spēku un summāri kopējais aerodinamiskais spēks ir lielāks (Shires A., 2013).

Rotora rotācijas virziens VAVES ir atkarīgs no spārna profila novietojuma virziena. Pārsvarā gadījumu ražotāji ir izvēlējušies rotora rotācijas virzienu pretēji pulksteņa rādītāja virzienam. Taču nav konstruktīvi nekādu ierobežojumu apmainīt spārna profila virzienu un iegūt pretējā virzienā rotējošu VAVES rotoru (2.10. att.).



2.10. att. VAVES rotora darba zonas

1 – vēja virziens; 2 – rotora rotācijas virziens; 3 – rotora pagrieziena leņķis θ; 4 – spārns; 5 – rotora spārna kustības aploce; A – pretvēja – priekšvēja zona; B – pavēja – priekšvēja zona; C – pavēja – aizvēja zona; D – pretvēja – aizvēja zona.

Pētnieciskajā darbā tiek izmantots spārna profils NACA0018, kas ir viens no visplašāk lietotajiem profiliem. NACA0018 ir simetrisks spārna profils. To raksturo tā forma, kur spārna biezums ir robežās no 18 % līdz 30 % no spārna garuma. NACA0018 aerodinamiskie parametri ir brīvi pieejami NACA oficiālajā mājas lapā, kur ir informācija par cēlējspēka CL un spiedējspēka CD koeficientu atkarību no Reinoldsa skaitļa R_e un spārna relatīvā appūtes leņķa (Airfoil Tools, 2011).



2.11. att. NACA0018 cēlējspēka un spiedējspēka koeficientu atkarība no spārna relatīvā appūtes leņķa pie dažādiem Reinoldsa skaitļiem

Palielinoties $R_{e,}$ uzlabojas CL un CD rādītāji, kas nosaka spārna divus galvenos aerodinamiskos spēkus - cēlējspēku un spiedspēku. Pēc ražotāja uzrādītajiem datiem appūtes leņķis robežās -17 ° līdz +17 ° tiek uzskatīts par spārna efektīvāko darba appūtes leņķi

(Gerakopulos R., 2010) (2.11. att.). Kinemātisko spēku aprēķinā vēja ātrums tiek sadalīts divās projekcijās: tangenciālā projekcija v_{τ} , radiālā projekcija v_{r} . Tangenciālā projekcija ir vērsta kā pieskare rotācijas aplocei, taču radiālā projekcija ir vērsta perpendikulāri aplocei virzienā uz rotācijas centru. Tangenciālo, radiālo un kopējo vēja spēka vektorus skaitliski aprēķina pēc formulas (Habtamu B., 2011):

$$v_{\tau} = \cos\theta \cdot v + \omega \cdot R \,; \tag{2.6}$$

$$v_R = \sin \theta \cdot v \,; \tag{2.7}$$

$$v_{kop}^2 = v_\tau^2 + v_R^2, (2.8)$$

kur v_{τ} – tangenciālais vēja spēka vektors;

vr – radiālais vēja spēka vektors;

 v_{kop} – kopējais vēja spēka vektors.

Cēlējspēka projekcija uz spārna lineārā ātruma vektora ass ir spēks, kas veic vēja rotora rotācijas kustību. Spiedspēka projekcija uz spārna lineārā ātruma vektora ass ir bremzējošs spēks un ir vērsts pretēji kustības virzienam. Cēlējspēka un spiedspēka lielumu pie noteikta vēja ātruma nosaka cēlējspēka koeficients CL un spiedspēka koeficients CD. Pētījumi parāda, ka CL un CD koeficienti ir iegūstami tikai eksperimentāli (David A. Spera, 2008). Cēlējspēka un spiedspēka projekcijas uz spārna lineārā ātruma vektora ass aprēķināmi sekojoši (Gerald M.A., 2010):

$$F_L = \sin \alpha \cdot v_{kop}^2 \cdot CL \cdot \frac{c \cdot l \cdot \rho}{2}; \qquad (2.9)$$

$$F_D = \cos \alpha \cdot v_{kop}^2 \cdot CD \cdot \frac{c \cdot l \cdot \rho}{2}, \qquad (2.10)$$

kur 1 – spārna garums, m;

 F_L – cēlējspēka projekcija, N;

F_D – spiedspēka projekcija, N.

Kopējais aerodinamiskais spēks, kas veic rotora pagriešanu ir cēlējspēka projekcijas F_L un spiedspēka projekcijas F_D starpība. Griezes moments ir kā funkcija no summārā aerodinamiskā spēka un rotora rādiusa $M_{a.sp} = f(F_a, R)$:

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_D; \tag{2.11}$$

$$\mathbf{M}_{a.sp.} = \mathbf{F}_a \cdot \mathbf{R} \; ; \tag{2.12}$$

$$M_a = M_{a.sp.1} + M_{a.sp.n} + \dots + M_{a.sp.n+m},$$
(2.13)

kur F_a – kopējais aerodinamiskais spēks uz spārnu, N;

M_{a.sp.} – spārna aerodinamiskais griezes moments, Nm;

M_a – VAVES rotora summārais aerodinamiskais griezes moments, Nm.

Rotora kopējais aerodinamiskais spēks ir vienāds ar visu spārnu aerodinamisko spēku algebrisko summu. Spārniem atkarībā no rotora pagrieziena leņķa ir aprēķināms griezes moments. Ja uz rotora ir 3 spārni, tad tie simetriski nobīdīti ar 120 ° leņķi, ja 4 spārni, tad nobīdīti ar 90 ° leņķi.

Matemātisko vienādojumu sastādīšana MATLAB *Simulink* vidē dod iespēju veikt simulāciju visai sistēmai un analizēt izejas rezultātus pie dažādiem ieejas datiem. Tiek iegūts aerodinamiskā griezes momenta aprēķins, kas analizējams skaitliski vai grafiski. Simulācijas izejas dati var tikt izmantoti kā ieejas datu kopa citā izveidotā MATLAB *Simulink* apakšsistēmā.

MATLAB *Simulink* vidē tika izveidota apakšsistēma "*AerodynamicBlade*" sastādot to no iepriekš apskatītajiem vienādojumiem 2.2 - 2.12., kas veic aerodinamiskā griezes momenta aprēķinus, izmantojot kinemātisko spēku aprēķinu metodi. Pētījumu gaitā izstrādātās apakšsistēmas ieejā tiek formēti nepieciešamie ieejas signāli: rotora rādiuss, rotora leņķiskais ātrums, vēja ātrums, rotora pagrieziena leņķis, rotora ģeometriskais koeficients, un Reinoldsa skaitlis (2.12. att.).



2.12. att. Spārna aerodinamiskā griezes momenta aprēķina apakšsistēma "AerodynamicBlade"

Apakšsistēmas "*AerodynamicBlade*" iekšējā struktūra sastāv no ieejas signālu nolasīšanas portiem, matemātisko aprēķinu funkcijām, pārlūktabulām, izejas porta un ierakstīšanas porta. Sistēma sakārtota loģiskā matemātiskā aprēķinu secībā, lai cikla laikā tiktu veikts precīzs M_a aprēķins. Šajā aprēķinu modelī ir izvēlēts NACA0018 profils ar CL un CD rādītājiem pie atbilstoša Reinoldsa skaitļa (2.13. att.).



2.13. att. Viena spārna aerodinamiskā griezes momenta aprēķina apakšsistēmas "AerodynamicBlade" iekšējā struktūra

Lai simulācijas laikā varētu izmantot publicētos CL un CD koeficientu datus, tiek izmantotas divu dimensiju tabulas, kur atkarībā no R_e un α tiek atrasti nepieciešamie CL un CD koeficienti (4. pielikums). Simulācijas procesā nepieciešamajā momentā, kad izrēķināti visi tabulu ieejas dati, izejā tiek formēti izejas dati, izmantojot interpolācijas metodi (2.14. att.).



2.14. att. NACA0018 CL un CD koeficientu atlase pēc Re un a

MATLAB *Editor* vidē tika izstrādāta programma, kas veic simulācijas modeļa parametru iestatīšanu un simulācijas veikšanu. MATLAB *Editor* kods satur pamatfunkcijas (5. pielikums): darba virsmas notīrīšanu un sagatavošanu simulācijai, darba datu ielādi, simulācijas mainīgo rādītāju un konstanšu ievadi, ieejas datu aprēķinus, simulācijas modeļa aktivizēšanu, simulācijas izejas datu ierakstīšanu darba virsmā.

Izveidojot kopējo programmu MATLAB *Editor* vidē, nepieciešams pārbaudīt tās darbību un apskatīt iegūtos izejas rezultātus. Tika izvēlēti sekojoši simulācijas modeļa ieejas dati (5. pielikums):

1.	rotora ātrgaitas koeficients	$-\lambda = 2.0, 2.5, 3.0;$
2.	rotora spārna horda	-c = 1 m;
3.	āra gaisa temperatūra	−20 °C;
4.	vēja ātrums	$-v = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1};$
5.	spārna garums	-1 = 10 m;
6.	rotora pagrieziena leņķis	$-\theta = 0$ °360 °;
7.	vēja virziena leņķis	$-\phi = 0$ °.
	A and dimensiols and also an also	

Aerodinamiskā spēka aprēķina modelī rotors pagriežas ar soli 1 °. Simulācijas modeļa solis sim_Step = 0.01 s, kas nodrošina aprēķinu soli simulācijas modelim 0.01°. Simulācijas laikā tiek pārbaudīts griezes momenta aprēķins pie rotora pagrieziena leņķa no 0 ° līdz 360 °. Rotora pagrieziena leņķis 0 ° ir pret vēja pūšanas virzienu (2.5. att.). Simulācijas izejas rezultāti parāda, ka aprēķinātais vēja rotora griezes moments vienam spārnam ir atkarīgs no vēja rotora ātrgaitas koeficienta. Pētījumos pierādīts, ka VES ar trīs spārniem un spārna profilu NACA0018 optimālais ātrgaitas koeficients ir 3. Simulācijas modelim, kas pārbaudīts ar ātrgaitas koeficientiem 2.0, 2.5 un 3.0, redzams, ka, samazinoties ātrgaitas koeficienta 3 maksimālā un vidējā vērtība. Pie ātrgaitas koeficienta 3 maksimālais griezes moments ir aptuveni 4200 Nm, pie 2.5 jau tikai 3150 Nm un pie 2.0 griezes moments ir 2500 Nm. Maksimālais griezes moments ar ātrgaitas koeficientu 3 tiek sasniegts pie rotora pagrieziena leņķa 70° un 280°, ar ātrgaitas koeficientu 2.5 pie 60 ° un 290 ° un ar ātrgaitas koeficientu 2.0 pie 50 ° un 300 ° (2.15. att.).



2.15. att. Spārnu griezes momenta simulācijas rezultāti

Izpētot simulācijas procesā aprēķināto F_L un F_D spēku projekcijas izmaiņu, atkarībā no rotora pagrieziena leņķa, ir redzams, ka, samazinoties ātrgaitas koeficientam no 3 līdz 2.5, 2.0 cēlējspēka projekcija F_L samazinās no 950 N uz 750 N un uz 620 N. Spiedspēka izmaiņa ir pretēja, jo, samazinoties ātrgaitas koeficientam, spiedspēka projekcija F_D palielinās. Pie ātrgaitas koeficienta 3.0, $F_D = 130$ N, pie ātrgaitas koeficienta 2.5 F_D ir 175 N un pie ātrgaitas koeficienta 2.0 spiedspēks $F_D = 210$ N. Šādas F_D un F_L spēka projekcijas izmaiņas ir izskaidrojamas ar to, ka, samazinoties ātrgaitas koeficientam, palielinās relatīvais spārna appūtes leņķis. NACA0018 profilam, palielinoties spārna relatīvajam appūtes leņķim, samazinās CL un palielinās CD (2.16. att.).



2.16. att. Spārna FL un FD spēka projekcijas simulācijas izejas dati

Apskatot tuvāk simulācijas izejas datus, kas parāda spārna relatīvā appūtes leņķa izmaiņu atkarībā no ātrgaitas koeficienta, redzams, ka pie ātrgaitas koeficienta 3 appūtes leņķis ir 19°, kas ir optimāls spārna appūtes leņķis, taču, samazinot ātrgaitas koeficientu līdz 2.5, spārna relatīvais appūtes leņķis palielinās līdz 23°. Pie ātrgaitas koeficienta spārna relatīvais appūtes leņķis ir jau 28°, kas ļoti strauji palielina CD un samazina CL vērtību (2.17. att.).



2.17. att. Spārna relatīvā appūtes leņķa simulācijas rezultāti

Mūsdienu pētījumos, izmantojot simulācijas modeļus, bieži aerodinamiskais griezes momenta aprēķins tiek vienkāršots. Veicot griezes momenta aprēķinu vienkāršošanu, var iegūt vidējo griezes momenta lielumu (Ahmed M.H., 2011):

$$M_a = \frac{v^3 \cdot \rho \cdot R \cdot l \cdot \eta}{\omega_r}.$$
 (2.14)

Pielietojot rotora vienkāršotu modeli, tiek zaudēta griezes momenta pulsācija un rotora modelis neatbilst tiem nosacījumiem, kādi ir pie precīza griezes momenta aprēķina. Atsevišķos pētījumos tas tiek pielietots, taču to nevar izmantot padziļinātos VES mezglu pētījumos. MATLAB *Simulink* vidē, izveidojot vienkāršotu VES rotora aerodinamiskā griezes momenta aprēķinu, ir iespējams simulēt tikai vienkāršotus pārejas procesus, jo šādā aprēķina gadījumā nav iespējams iegūt griezes momenta raksturu, bet gan tikai tā vidējo vērtību. Vienkāršotā aprēķina modelis, izmantojot vidējos vēja ātruma datus un rotora rotācijas ātrumu, ir izveidots, izmantojot matemātisko aprēķinu blokus (2.18. att.). Šādas apakšsistēmas izmantošana ir noderīga, veicot simulācijas pēc vidējiem rādītājiem. To var izmantot pētījumos par VES vidējo saražoto elektroenerģiju garākā laika periodā.



2.18. att. Griezes momenta aprēķina metode izmantojot vēja un rotora leņķisko ātrumu

Izstrādātais vienkāršotais griezes momenta aprēķina simulācijas modelis tika pārbaudīts ar sekojošiem ieejas parametriem:

- 1. rotora ātrgaitas koeficients $-\lambda = 3.0;$
- 2. vēja ātrums

 $-v = no 3.5 līdz 4.4 m \cdot s^{-1};$ -1 = 10 m;

-R = 5 m.

spārna garums
 rotora rādiuss

Simulācijas rezultāti parāda, ka izejas aerodinamiskais griezes moments ir cieši atkarīgs no vēja ātruma. Samazinoties vēja ātrumam, samazinās arī vēja rotora griezes moments un pretēji, palielinoties vēja ātrumam, izejas vēja rotora griezes moments palielinās (2.19. att.) Šāda rotora griezes momenta simulācijas metode nodrošina vidējo rādītāju simulāciju, pateicoties kam ir iespējams veikt rotora pamatfunkciju analīzi. Izmantojot šādu simulācijas metodi, nav iespējams analizēt VES rotora aerodinamiskā griezes momenta vai spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas pārejas procesus. Vienkāršotais aprēķins var būt noderīgs pētot VES darbību garākā laika posmā.



2.19. att. Griezes momenta simulācijas rezultāti izmantojot vienkāršoto aprēķinu

Promocijas darbā tiek izstrādāts komplekss VAVES simulācijas modelis, kas ietver visu primāro VAVES iekārtu simulāciju, kā arī spārnu regulēšanas sistēmu, kas ir jaunievedums šāda tipa VES. Lai sasniegtu izvirzītos mērķus un simulācijas modelis atbilstu reālam objektam, nepieciešams izmantot spēka vektoru aprēķinu metodi, jo vienkāršotā aprēķinu metode nenodrošinās precīzu aerodinamiskā griezes momenta aprēķinu uz vienu spārnu atkarībā no rotora relatīvā pagrieziena leņķa pret vēju.

2.3. VAVES rotora inerces aprēķinu pētījumi, rotora inerces ietekme uz VAVES darbību, simulācijas modeļa izstrādes kritēriji

Zinātniskajos rakstos tiek analizēti aerodinamiskie pārejas procesi vēja rotorā. Pētījumi pierāda to, ka vēja rotora inerces lielums var ietekmēt saražotās elektroenerģijas daudzumu, taču pētījumos pietrūkst informācijas, kas pierādītu, kāda ir šī ietekme un cik lielā mērā tas ir saistīts ar pašas VES slodzes regulēšanas sistēmas izpildījumu (Yang C.X., 2013). VAVES rotorā saņemtā aerodinamiskā enerģija tiek pārvadīta caur rotācijas vārpstām un multiplikatoru uz ģeneratoru. Vēja ātruma izmaiņa rada griezes momenta izmaiņu, taču VES rotors ir inerciāls objekts, kam atkarībā no konstrukcijas ir savs inerces moments (Johan M., 2006).

Pārejas procesu no vēja ātruma izmaiņas līdz VES rotora rotācijas ātruma izmaiņai var aprakstīt kā pirmās kārtas inerciālu posmu, ko izsaka pārvades funkcija:

$$W_t(s) = \frac{\omega_r(s)}{v(s)} = \frac{K_t}{T_r \cdot s + 1}$$
, (2.15)

kur $W_t(s) - VES$ rotora pārvades funkcija;

 $\omega_r(s)$ – Laplasa transformācija no rotora leņķiskā ātruma, rad·s⁻¹;

v (s) – Laplasa transformācija no vēja ātruma, m s⁻¹;

 $T_r - VES$ rotora inerces laika konstante, s;

 $K_t - VES$ rotora pārvades koeficients, rad·m⁻¹.

VES rotora inerci nosaka tā konstrukcija un masa. Izmantojot mūsdienu datorprogrammas VES projektēšanā, var samērā precīzi aprēķināt vēja turbīnas rotora inerces momentu, kura analītiskais aprēķins kompleksai konstrukcijai ir komplicēts uzdevums. VAVES rotora pārejas procesa laiku nosaka tā inerces laika konstante (Ran L.,2004):

$$T_r = \frac{J_r \cdot \omega_{r.nom}}{M_{r.nom}},\tag{2.16}$$

kur J_r – VES rotora inerces moments, kg·m²;

 $\omega_{r.nom}$ – VES nominālais leņķiskais ātrums, rad·s⁻¹;

M_{r.nom} – VES rotora nominālais griezes moments, Nm.

Pētījumos norāda to, ka VES rotors ir nestacionārs objekts, kura inerces laika konstante mainās pārejas procesa laikā, līdz ar to laika konstantes aprēķins pēc rotora nominālajiem parametriem nesniedz precīzu pārejas procesa norisi. Ir izvirzīti priekšlikumi veikt laika konstantes pāraprēķinu katrā simulācijas ciklā, sastādot aprēķina modeli (2.16) MATLAB *Simulink* vidē brīvas pieejas formā. Tas nodrošinātu daudz precīzāku pārejas procesa simulāciju (Minh Q.D, 2015).

Vairākos pētījumos tiek apskatīta rotora pārejas procesa simulācija MATLAB *Simulink* vidē ar *"State Space"* modeli. *State Space* izmantošana tiek pamatota ar precīzu dinamisko procesu modelēšanu. Matemātiski tas tiek aprakstīts šādi (Codina G.O., s.a.):

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t);$$
(2.17)

$$y(t) = C(t)x(t) + D_m(t)u(t),$$
(2.18)

kur $\dot{x}(t)$ – stāvokļa vektors (*State Vector*);

- y(t) izejas vektors (*Output Vector*);
 - u(t) ieeja jeb kontroles vektors (*Control Vector*);
 - A stāvokļa jeb sistēmas matrica (*State or System matrix*);
 - B ieejas matrica (*Input matrix*);
 - C izejas matrica (*Output matrix*);
 - D_m apsteidzes matrica (*Feedforward matrix*).

VES reducētās enerģijas pārneses ātrums ir atkarīgs no rotora inerces momenta J_r un griezes momenta starpības ΔM starp reducēto griezes momentu M_a un slodzes griezes momentu M_{sl} . *State Space* matricas, reizinot ar J_r^{-1} , iegūst aprēķina formulas:

$$I_H \cdot \ddot{\theta} = \sum M = M_A - M_{Sl} \qquad (2.19)$$

Modeļa State Space stāvokļa vektors:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/I_H \\ 0 \end{bmatrix} \Sigma M.$$
(2.20)

Modela State Space izejas vektors:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$
 (2.21)

VES rotora spārnu summārais griezes moments tiek reducēts mehāniskajā enerģijā, kas ir izejas enerģija pēc pārejas posma rotora spārnos. Aerodinamiskā griezes momenta iedarbības rezultātā rotoram veidojas pagrieziena leņķis un rotācijas leņķiskais ātrums (2.20. att.). Ātrumu, ar kādu izmainoties vēja spēkam izmainās reducētā mehāniskā enerģija, apraksta ar rotora laika konstanti τ_r (Tang C., 2008).



2.20. att. Rotora spēku plūsmas struktūra

 $\begin{array}{l} 1-spārna kopējais aerodinamiskais griezes moments M_{a1}, Nm; 2-spārna izkliedētā spēka plūsma;\\ 3-pirmais spārns; 4-rotora rotācijas ātrums \omega_r un pagrieziena leņķis 0; 5-otrais spārns; 6-otrā spārna izkliedētā spēka plūsma; 7-otrā spārna kopējais aerodinamiskais griezes moments M_{a2}, Nm; 8-lēngaitas vārpsta ar reducēto mehānisko griezes momentu M_m, Nm; 9-rotora konstrukcija ar inerces momentu I_r, kg·m². \end{array}$

Izmantojot MATLAB *Simulink* instrumentus, iespējams izveidot divus galvenos simulācijas modeļus, izmantojot abas matemātiskās metodes. VES simulācijas modelis tiek sastādīts no vairākām apakšistēmām. VES rotors tiek sastādīts atsevišķā apakšistēmā, kas nozīmē, ka darba gaitā tiek izstrādātas divas rotora apkšsistēmas. Pirmā apakšsistēma tiek sastādīta, izmantojot atvērtās pārvades funkcijas, otrā apakšsistēma tiek sastādīta, izmantojot state Space. Lai apakšsistēmas būtu viegli aizvietot vienu ar otru, tad tās tiek izveidotas, izmantojot vienādus ieejas un izejas signālus (Muljadi E., 2012).

VES rotora simulācijas pamatā, izmantota pārvades funkcija, kas izveidota atvērtā veidā un, sastādot ar noteiktiem signālu ieejas un izejas portiem, iespējams tālāk izmantot kopējā rotora simulācijas modelī. Uz apakšsistēmas attiecīgajiem ieejas portiem tiek padoti ieejas dati: slodzes griezes moments, kopējais aerodinamiskais griezes moments, rotora leņķiskais ātrums un nominālais rotora aerodinamiskais griezes moments (2.21. att.).



2.21. att. Rotora apakšsistēma izmantojot atvērto pārvades funkciju

Sastādot apakšsistēmu un izmantojot pārvades funkciju, tika veiktas apakšsistēmas modeļa pārbaudes, lai pārliecinātos par apakšsistēmas atbilstošu funkcionālo darbību. Pārbaude tika veikta pie 3 dažādiem ieejas signāliem, lai precīzāk parādītu apakšsistēmas atbilstību dabiskam VES rotora darbam.

Apakšsistēmas pārbaudei tika izvēlēti 3 scenāriji. Visiem 3 scenārijiem tika izvēlēts vienāds simulācijas laiks 15 s. Visos scenārijos piektajā sekundē tika formēts M_a kāpums no 0 līdz 1000 Nm. 2. scenārijs parāda to, ka slodzes griezes moments padara lielāku rotora laika konstanti un ieskriešanās norit lēnāk, kur laika posmā līdz 15 s rotors vēl nav ieskrējies. 1. un 3. scenārijs parāda to, kā pie vienāda aerodinamiskā griezes momenta ar dažādiem rotora inerces momentiem, mainās rotora ieskriešanās ātrums. Samazinot rotora inerces momentu, samazinās kopējais rotora ieskriešanās laiks no 7 s līdz 1 s (2.22. att.).



2.22. att. Pārvades funkcijas apakšsistēmas pārbaudes scenāriju rezultāti

Pielietojot MATLAB *Simulink* papildfunkcijas "*Control Toolbox*" un izmantojot *State Space*, var sastādīt simulācijas apakšsistēmu. *State Space* ieejas matrica un stāvokļa matrica dod iespēju izejā iegūt pilnu informāciju par rotora pagrieziena leņķi un rotora leņķisko ātrumu (2.23. att.).



2.23. att. Rotora apakšsistēma izmantojot State Space

Lai veiktu *State Space* pārveidojumus, nepieciešams tos formalizēt MATLAB *Editor* vidē, kur tiek definētas visas nepieciešamās matricas un to matemātiskie pārveidojumi no "*continuous*" uz "*discrete*". *Editor* vidē sākotnēji tiek nodefinētas matricas, tālāk to reizinājums un beigās tiek veikts pārveidojums uz diskrēto simulācijas laiku, kur simulācijas solis *sim_Step* = 0.001 (6. pielikums).

Simulink apakšsistēmas pārbaude, izmantojot State Space aprēķinu principu, sniedza acīmredzamus rezultātus par to, ka sistēma ir atvērta atšķirībā no pārvades funkcijas ar negatīvu atgriezenisko saiti, kas nozīmē to, ka nav redzama ātruma nostabilizēšanās. Ieejā, padodot aerodinamisko griezes momentu, ātrums turpina pieaugt un nav novērojama tā nostabilizēšanās. Tāpat kā pārvades funkcijas gadījumā, simulācijas rezultāti parāda, ka ir cieša saite izejas ātrumam un tā pieaugumam ar ieejas aerodinamisko griezes momentu un objekta inerces momentu (2.24. att.).



2.24. att. VAVES rotora reducētā griezes momenta simulācijas raksturlīknes

Izstrādātās VES rotora apakšsistēmas, izmantojot divas dažādas matemātiskās metodes, adekvāti apraksta VES darbību. Izmantojot šīs apakšsistēmas, iespējams veikt tālāku VES simulācijas modeļa un tā apakšsistēmu validāciju. Izstrādātās apakšsistēmas ir ērtas lietošanā un, ievadot nepieciešamos ieejas parametrus, var tikt pielāgotas jebkuram rotora veidam.

2.4. VAVES rotora simulācijas modeļa validācija ar eksprimentālajiem datiem

Rotora inerces ietekme uz VAVES darba kvalitāti un saražotās elektroenerģijas daudzumu ir teorētiski un eksperimentāli nosakāma. Izmantojot sastādīto simulācijas modeli, VAVES rotoram ir iespējams izpētīt rotora inerces momenta ietekmi uz saražoto elektroenergijas daudzumu. Pirms simulācijas modelis tiek izmantots šim eksperimentam, tas tiek validēts ar eksperimentālajiem datiem, izmantojot paša sastādītu validācijas metodi. Eksperiments tika veikts 2015. gada trešajā ceturksnī Beļģijas pilsētā Ostendē. Eksperimentālais VES objekts bija VAVES "Flyfox-20kW". "Flyfox-20kW" sastāv no divu bloku rotora ar četriem spārniem katrā, rotora diametrs un spārna garums ir 7.5 m.

Eksperimenta mērķis bija pārbaudīt, izmantojot eksperimentālos datus, vai simulācijas modelis atbilst VES darbam un tālāk pēc simulācijas modeļa validācijas noskaidrot rotora inerces ietekmi uz VES saražoto elektroenerģijas daudzumu. Izmantojot verificētu un validētu simulācijas modeli, ir iespējams mainīt VES rotora inerces momentu un analizēt, kā mainās simulācijas modelī aprēķinātais VES saražotās elektroenerģijas daudzums. Šāds eksperiments, izmantojot VES, ir ekonomiski dārgs. Tas ir izdarāms tikai uzbūvējot vairākus vienādus VES rotorus ar dažādiem inerces momentiem. Taču dabiska vēja gadījumā tā raksturs neatkārtojas, tas nozīmē, ka nav iespējams reālā objektā atkārtot vienādus ieejas nosacījumus. VES simulācija dod iespēju veikt šo eksperimentu, izmantojot validētu VES simulācijas modeli.

Eksperimentālie dati reģistrēti no "Flyfox-20kW" vadības sistēmas, ar kuras palīdzību tiek vadīta VAVES un arī reģistrēti dati tālākai VAVES analīzei un optimizācijai. Saražotās enerģijas dati tiek lasīti no elektrotīkla invertora ACS800-11 caur Modbus TCP protokolu. Vēja dati tiek reģistrēti ar ultraskaņas mērīšanas iekārtu WXT520 (7. pielikums). Dati par vēja plūsmu tiek nolasīti caur RS485 interfeisa ASCII protokolu (8. pielikums). Datu nolasīšanas un reģistrēšanas cikls 1 s, izmantojot izstrādātas datu apstrādes programas (9. pielikums). Dati tiek reģistrēti MySQL datubāzē, no kuras pēc pieprasītā perioda tiek pārvietoti dati uz MS Excel formāta failu (10. pielikums). Datus bez statistiskas apstrādes pārveido MATLAB datu formātā. Tālāk dati tiek pievienoti simulācijas modelim. Simulācijas modelis tiek sastādīts MATLAB *Simulink* vidē. VES simulācijas modelis tiek sastādīts, izmantojot iepriekš apskatītās un pārbaudītās VES mezglu simulācijas apakšsistēmas. Rezultātu grafiskajai analīzei tika izveidota apakšsistēma "DataVerificationBlock" (2.25. att.).



2.25. att. VAVES rotora pārejas procesu simulācijas modelis

"Flyfox-20kW" izstrādātāji sniedz informāciju par to, ka projektētais rotora inerces moments ir $J_r = 5070 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Inerces momenta noteikšanai tika izveidota programma MATLAB *Editor* vidē, ar kuras palīdzību tika atkārtoti veikta simulācija, mainot VES rotora inerces momentu no 1000 līdz 1100 kg \cdot m² ar soli 10 kg \cdot m². Eksperimentālo mērījumu sērijas ilgums ir 3530 s ar sekojošiem vēja rādītājiem: v_{vid} = 5.0 m \cdot s⁻¹, v_{min} = 2.0 m \cdot s⁻¹, v_{max} = 7.0 m \cdot s⁻¹. Noslēdzot vienas simulācijas ciklu, dati tiek saglabāti atsevišķā masīvā. Noslēdzot visu eksperimenta ciklu, kopējais simulācijas datu masīvs uzskatāmi parāda, cik tuvināti simulācijas modelis ir reālai VAVES (14. pielikums):

$$\gamma = \frac{(E_{eksp} - E_{sim})}{E_{eksp}} \cdot 100\%, \qquad (2.22.)$$

kur Eeksp – eksperimenta mērījumu laikā saražotā elektroenerģija, kWh;

E_{sim} – simulācijas modelī aprēķinātā elektroenerģija, kWh,

 γ – simulācijas un eksperimentālo rezultātu relatīvā kļūda.

Eksperimentālie diennakts dati ar vidējo vēja ātrumu 5 m·s⁻¹ un simulācijas rezultāti ar šādiem pašiem nosacījumiem parāda to, ka iegūtā simulācijas modeļa rotora inerce ir tuvināti ražotāju noteiktajai vērtībai 5070 kg·m². Kad simulācijas modelim iestatītais inerces moments ir mazāks par eksperimentālās VAVES, tiek saražots lielāks daudzums elektroenerģijas. Palielinot simulācijas modeļa rotora inerces momentu, saražotās elektroenerģijas daudzums samazinās. Enerģijas izmaiņas lielums atkarībā no inerces izmaiņas pakļaujas logoritmiskai funkcijai ar ticamību 0.9607. Lineāras funkcijas sakritība ir nedaudz mazāka par logoritmiskas funkcijas sakritību 0.9524 (2.26. att.).



2.26. att. Saražotās enerģijas starpības atkarība no VES rotora inerces momenta

Simulācijas modeļa reģistrēto rezultātu salīdzināšanas nolūkos tiek veikta VES simulācija ar 3 dažādiem VES rotora inerces momentiem: 3000 kg·m²; 5000 kg·m², 6500 kg·m². Eksperimenta mērķis ir validēt simulācijas modeļa atbilstību reālas VAVES darbam. Apskatoties VAVES ieskriešanās procesu, ir redzams, ka VES ar lielāku rotora inerces momentu ieskrienas lēnāk. VES ar mazāko inerces momentu ieskrienas straujāk, taču arī tālākā VAVES darbā ir redzams, ka VES rotora ātruma izmaiņa pie mazāka rotora inerces momenta ir pārāk strauja, kas nozīmē to, ka VES rotora inerces moments ir lielāks par 3000 kg·m². Pie šāda inerces momenta simulācijas eksperimentālo datu sakritība ir R² = 0.590. VAVES rotora simulācijas rezultāti ar inerces momentu 6500 kg·m² parāda to, ka rotora reakcija uz vēja izmaiņu ir lēnāka kā "FlyFox-20kw" rotoram un datu sakritība samazinās pat līdz R² = 0.529 (2.27. att.).



2.27. att. VES rotora modeļa simulētās rotācijas ātruma raksturlīknes pie dažādiem inerces momentiem

Simulācijas modeļa reģistrētie VES ātrgaitas koeficienta dati parāda, ka rotoram ar lielāku inerces momentu ir grūtāk uzturēt optimālo ātrgaitas koeficientu. Ātrgaitas koeficienta simulācijas rezultāti liecina, ka tuvāk reālas VAVES datiem atbilst simulācijas rezultāti modelim ar inerces momentu 5000 kg·m² (2.28. att.).



2.28. att. VES simulācijas modeļa reģistrētais ātrgaitas koeficients pie dažādiem inerces momentiem

 $\lambda_{eksp} - eksperimentāli nomērītais ātrgaitas koeficients; \lambda_{sim} - simulācijas modelī nomērītais VES ātrgaitas koeficients; J_r - VES rotora inerces moments, kg m².$

Pie vēja izmaiņas simulācijas VES reaģē līdzvērtīgi reālas VAVES reakcijai uz tādu pašu vēja izmaiņu. Simulācijas un eksperimentālo datu statistiskā analīze parāda datu sakritību ar $R^2 = 0.842$. Grafiskais pētījums apstiprina simulācijas modeļa atbilstību reālas VAVES darbam (2.29. att.).

 $[\]omega_{eksp}$ – eksperimentāli nomērītais VES rotācijas ātrums; ω_{sim} – simulācijas modelī nomērītais VES rotācijas ātrums; J_r – VES rotora inerces moments.



2.29. att. VES simulācijas modeļa rotora rotācijas ātrums salīdzinājumā ar eksperimentos nomērīto rotora rotācijas ātrumu

 ω_{eksp} – eksperimentāli nomērītais VES rotācijas ātrums, rad·s⁻¹; ω_{sim} – simulācijas modelī reģistrētais VES rotācijas ātrums, rad·s⁻¹; J_r – VES rotora inerces moments, kg·m².

Simulācijas modelis izveidots ar līdzvērtīgu slodzes regulēšanas algoritmu, kāds tas ir VES "FlyFox-20kW". Izmantojot šo algoritmu, ir iespējams pārbaudīt, vai simulācijas modelim uzdotais ātrgaitas koeficients tiek ieregulēts līdzvērtīgi reālas VAVES darbā nomērītajam ātrgaitas koeficientam (2.30. att.).



2.30. att. VES simulācijas modeļa ātrgaitas koeficienta salīdzinājums ar eksperimentos nomērīto VES ātrgaitas koeficientu

 λ_{eksp} – eksperimentāli nomērītais VES ātrgaitas koeficients; λ_{sim} – simulācijas modelī nomērītais VES ātrgaitas koeficients; J_r – VES rotora inerces moments, kg·m².

Veikto pētījumu rezultātā izstrādāts un aprobēts reālas VES simulācijas modelis MATLAB *Simulink* vidē. Aprobētam simulācijas modelim ir liela nozīme VES industrijā, jo tas dod iespēju veikt dažādus eksperimentus, neizmantojot reālu VES. Šāds risinājums ietaupa finansiālos līdzekļus, kā arī paātrina eksperimenta norisi. Modeļa atvērtā forma dod iespēju to ērti adaptēt specifiskiem uzdevumiem VES pētniecībā un projektēšanā.

2.5. Mehāniskā pārvada simulācijas metodes pētījumi, simulācijas modeļa izstrāde VAVES

VES aerodinamiskās enerģijas mehāniskā pārvades sistēma sastāv no vēja rotora lēngaitas vārpstas, multiplikatora un ātrgaitas vārpstas. Analizētajos zinātniskajos pētījumos tiek apskatīts risinājums, neizmantojot multiplikatoru VES konstrukcijā un aizvietojot to ar pastāvīgo magnētu sinhrono daudzpolu ģeneratoru. Pastāvīgo magnētu daudzpolu ģeneratorus ir iespējams veidot dažādās konstrukcijās, panākot nepieciešamo lēngaitas ātrumu (Chertok D.H., 2004).

Multiplikatora simulācijas modeļa izstrāde ir svarīga, jo ne vienmēr tiek izmantoti daudzpolu PMSG, jo VAVES zemā ātrgaitas koeficienta dēļ ir nepieciešams liels polu pāru skaits, lai nodrošinātu zemos apgriezienus. Pamatojoties uz to, tiek izmantoti multiplikatori ar mazu pārnesuma attiecību kombinācijā ar daudzpolu PMSG.

Jebkurš mehānisks mezgls sistēmā rada enerģijas zudumus, kas izpaužas kā detaļas silšana, mehāniskajai enerģijai pārvēršoties siltumenerģijā. VES simulācijas modelī tiek apskatīts mehāniskā pārvada izpildījums, kurā ietilpst lēngaitas vārpsta, multiplikators, ātrgaitas vārpsta. Vārpsta kā mehāniskās enerģijas pārvades elements sistēmā nerada mehāniskus zudumus, taču darbojas kā inerciāls elements (Mittal R., 2009). Vārpstas deformācija jeb vērpe rada enerģijas pārvades aizturi, bet, pamatojoties uz lielo rotora inerci, gan ātrgaitas, gan lēngaitas vārpstas pievienotā inerce ir maza daļa no kopējā VES rotora inerces (Novak P., 1995).

Multiplikators vēja stacijās tiek izmantots ar atbilstošu pārnesuma attiecību *i*, lai nodrošinātu optimālu ģeneratora rotācijas ātruma diapazonu. Multiplikatoram ieejā ir lēngaitas un izejā ātrgaitas vārpsta (2.31. att.). VES tiek izmantoti planetārā tipa multiplikatori. VES simulācijas modelī tiek vienkāršota multiplikatora simulācijas apakšsistēma, ietverot multiplikatora lietderības koeficientu un inerces momentu. Citos pētījumos pielietotās multiplikatora simulācijas metodes apraksta zobratu un vārpstu mehānismus, kas tiek aprakstīti ar sekojošām sakarībām (Carlin P.W., 2001):

$$\omega_{mul.l} = \frac{\omega_{mul.h}}{i},\tag{2.23}$$

 $\begin{array}{lll} kur & \omega_{mul.l} & & - \, l\bar{e}ngaitas \, v\bar{a}rpstas \, rot\bar{a}cijas \, \bar{a}trums, \, rad\cdot s^{-1}; \\ & \omega_{mul.h} & & - \, \bar{a}trgaitas \, v\bar{a}rpstas \, rot\bar{a}cijas \, \bar{a}trums, \, rad\cdot s^{-1}; \\ & i & & - \, p\bar{a}rnesuma \, attiec\bar{\iota}ba. \end{array}$

$$I_{mul.h} \cdot \ddot{\theta}_{mul.h} = M_{mul.h} - M_{mul.l}, \qquad (2.24)$$

kur

J_{mul.h} – ātrgaitas vārpstas inerces moments, kg·m²;
 Ö_{mul.h} – ātrgaitas vārpstas paātrinājums, rad·s⁻²;
 M_{mul.h} – ātrgaitas vārpstas griezes moments, N·m;
 M_{mul.l} – lēngaitas vārpstas griezes moments, N·m.





 $\begin{array}{l} 1-\bar{le}ngaitas\ v\bar{a}rpsta;\ 2-multiplikators;\ 3-\bar{a}trgaitas\ v\bar{a}rpsta;\ \omega_{mul.l}-\bar{le}ngaitas\ v\bar{a}rpstas\ rotācijas\ \bar{a}trums,\ rad\cdot s^{-1};\\ M_{mul.l}-\bar{le}ngaitas\ v\bar{a}rpstas\ rotācijas\ \bar{a}trums,\ rad\cdot s^{-1};\\ \eta_{mul}-multiplikatora\ lietderības\ koeficients;\ J_{mul}-multiplikatora\ kopējais\ inerces\ moments,\ kg\cdot m^2;\\ \omega_{mul.h}-\bar{a}trgaitas\ v\bar{a}rpstas\ rotācijas\ \bar{a}trums,\ rad\cdot s^{-1};\ M_{mul.h}-\bar{a}trgaitas\ v\bar{a}rpstas\ griezes\ moments,\ Nm;\\ J_{mul.h}-\bar{a}trgaitas\ v\bar{a}rpstas\ inerces\ moments,\ Nm;\\ \end{array}$

Analītiski un eksperimentāli pētījumi pierāda, ka multiplikatora mehāniskie zudumi ir mainīgi. Mehāniskos zudumus parasti izsaka ar lietderības koeficientu, kuru norāda nominālajam darba režīmam. Mainoties multiplikatora slodzei un rotācijas ātrumam, mehāniskie zudumi tajā mainās no 1 % līdz 15 %.

Mehāniskie zudumi multiplikatorā tiek aprakstīti vairākos mehānisma elementu posmos un tiek iedalīti: slīdes, rites, materiāla pretestības. Multiplikatora lietderības koeficienta aprēķins tiek veikts pēc formulas:

$$\eta_{mul} = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100 \,\%,\tag{2.25}$$

kur M1 – multiplikatora ieejas vārpstas griezes moments, N·m;

M₂ – multiplikatora izejas vārpstas griezes moments, N·m.

Multiplikatora lietderības koeficients atkarīgs no dažādiem apstākļiem: darba temperatūras, smērvielas temperatūras, rotācijas ātruma, darba griezes momenta. Pārejas procesu no multiplikatorā padotā griezes momenta līdz griezes momenta izmaiņām multiplikatora izejā var aprakstīt ar pirmās kārtas inerciālu posmu:

$$W_{mul}(s) = \frac{M_2(s)}{M_1(s)} = \frac{K_{mul}}{T_{mul} \cdot s + 1},$$
 (2.26)

kur W_{mul}(s) – multiplikatora pārvades funkcija;

M₁(s) – Laplasa transformācija no ieejas vārpstas griezes momenta, Nm;

M₂(s) – Laplasa transformācija no izejas vārpstas griezes momenta, Nm;

T_{mul} – multiplikatora inerces laika konstante, s;

K_{mul} – multiplikatora pārvades koeficients.

Multiplikators ir mehāniski sastiprināts ar kopējo mehānisko pārvadu un ietekmē kopējo rotora enerģijas reducēšanas pārejas procesu. Pēc multiplikatora mehāniskajiem datiem iespējams aprēķināt multiplikatora laika konstanti:

$$T_{mul} = \frac{J_{mul} \cdot \omega_{mul}}{M_1},\tag{2.27}$$

kur J_{mul} – multiplikatora inerces moments, kg·m²;

 ω_{mul} – multiplikatora ieejas vārpstas leņķiskais ātrums, rad s⁻¹;

 M_1 – multiplikatora ieejas vārpstas griezes moments, Nm.

Pielietojot VES multiplikatoru, tam ieejā ir mainīgi parametri: griezes moments un rotācijas ātrums. Tas nozīmē, ka multiplikatora lietderības koeficients ir laikā mainīgs un atkarīgs no VES darba parametriem.

Izstrādājot MATLAB *Simulink* vidē multiplikatora apakšsistēmas modeli, tiek izmantota parametru ievade caur apakšsistēmas parametru logu, matemātiskās konstantes un funkcijas, datu meklēšanas tabulas. Lietderības koeficienta meklēšanas tabula kā ieejas signālus saņem griezes momentu, rotācijas ātrumu un pārnesuma skaitli (Lundin A., s.a.). Apakšsistēmas izejā tiek formēts griezes moments un rotācijas ātrums uz ātrgaitas vārpstas (2.32. att.).



2.32. att. Multiplikatora apakšsistēmas iekšējā struktūra

Apakšsistēma tiek izmantota kā VAVES simulācijas modeļa atsevišķa apakšsistēma, kurā tiek ievadīti planetārā multiplikatora nominālie dati, kas kalpo kā informācija multiplikatora lietderības koeficienta aprēķināšanai un ieejas datu apstrādei. Ievadot atbilstošus multiplikatora nominālos datus, ir iespējams iegūt precīzus modeļa simulētos rezultātus. Multiplikatora lietderības koeficienta raksturlīknes var noteikt eksperimentāli un tās var ievadīt apakšsistēmas modelī kā funkcijas no rotācijas ātruma un darba griezes momenta. Multiplikatora apakšsistēmu var ērti pievienot VES simulācijas modelīm pēc vajadzības.

2.6. PMSG tipa elektroģeneratora simulācijas modeļa izstrāde un validācija

Mūsdienās komerciālās VES tiek izmantoti dažāda veida ģeneratori, kas pārveido mehānisko enerģiju elektriskajā enerģijā. Pieredze rāda, ka, attīstot VES sistēmas bez multiplikatora, priekšroka tiek dota pašierosmes sinhronajiem ģeneratoriem (Huynh Q.M., 2011). PMSG ar ierosmes magnētiem ir lielas priekšrocības, salīdzinot ar sinhronajiem ģeneratoriem: bezsuku konstrukcija, augsts lietderības koeficents, vieglāk izveidojams daudzpolu ģenerators, nav nepieciešama elektriskā ierosmes sistēma (Vilsbøll N., 1996). Pastāvot virknei priekšrocību, var minēt arī dažas PMSG nepilnības: smagāka mehāniskā konstrukcija, magnētiskā ierosmes materiāla lietderības samazināšanās, izmantojot lētākus magnētiskos materiālus, sarežģītāka izgatavošana (Thakur T., 2012).

Pētījumos tiek strādāts pie lietderības paaugstināšanas iespējām, daudzpolu konstrukcijas izstrādes veidiem, kā arī simulācijas modeļu izstrādes un pārbaudes (Fekril H., 2015). Promocijas darba izvirzīto mērķu izpildei ir nepieciešams izstrādāt PMSG ģeneratora apakšsistēmu, kura nodrošinātu ģeneratora funkcionalitāti simulācijas modelī (Helmy S., s.a.). Informācija un matemātiskie aprēķini ir specializēti konkrētiem mērķiem, tāpēc, izvēloties primārās vajadzības VES modeļa darbības nodrošināšanai, ir izvēlēts simulēt sekojošas īpašības

un funkcijas: elektromehāniskās ģeneratora īpašības, sprieguma avota funkcija, strāvas avota funkcija.

PMSG spriegumam ir lineāra funkcija ar rotācijas frekvencei $U_g = f(f_g)$. Elektromehāniskā laika konstante PMSG stacionārā režīmā bez slodzes tiek aprakstīta ar vienādojumu (Bartłomiej B., 2013):

$$T_m \frac{dU_g}{dt} + U_g = \frac{U_{nost}}{\omega_{nost}} \cdot \omega_g, \qquad (2.28)$$

kur T_m – elektromagnētiskā laika konstante, s;

 $\omega_{\rm g}$ – ģeneratora rotācijas leņķiskā frekvence, rad s⁻¹;

K – ģeneratora pārvades koeficients, $V \cdot s \cdot rad^{-1}$;

U – ģeneratora izejas spriegums, V.

PMSG elektromehānisko laika konstanti T_m stacionārā režīmā aprēķina pēc formulas (Tilak T., 2012):

$$T_m = \frac{J_g * \omega_{g.n}}{M_{g.n}},\tag{2.29}$$

kur $\omega_{g.n}$ – PMSG rotācijas nominālā leņķiskā frekvence, rad s⁻¹;

 $J_g - PMSG$ inerces moments, kg·m²;

M_{g.n} – PMSG nominālais griezes moments, Nm.

Nestacionārā režīmā, slogojot ģeneratoru, laika konstantes ir mainīgas. Izmantojot simulācijas sistēmas nestacionāriem režīmiem, iespējams veikt ciklisku konstantu pārrēķinu. PMSG elektromehāniskā laika konstante aprēķināma pēc formulas (Achari K.N., 2012):

$$T_m = \frac{J_g * \Delta \omega_g}{\Delta M_g},\tag{2.30}$$

kur $\Delta \omega_g$ – PMSG rotācijas leņķiskā ātruma starpība, rad·s⁻¹;

 $J_g - PMSG$ inerces moments, kg·m²;

 $\Delta M_g - PMSG$ griezes momenta starpība, Nm.

Pārejas procesu simulācijai sastāda operatoru vienādojumu un pārvades funkciju (Rolan A., 2009):

$$W_{g}(s) = \frac{\omega_{g}(s)}{M_{m}(s)} = \frac{K}{T_{m} \cdot s + 1}, \qquad (2.31)$$

kur $f_1(s)$ – Laplasa transformācijas ieejas sprieguma frekvence, Hz;

 $\omega_{g}(s)$ – Laplasa transformācijas ieejas sprieguma leņķiskais ātrums, rad s⁻¹;

s – Laplasa arguments.

Ģeneratora sprieguma $U_2(t)$ un frekvences $f_2(t)$ pārvades funkcijas tukšgaitas režīmā (Tin W.M., 2008):

$$W_{g_U}(s) = \frac{U_2(s)}{\omega(s)} = \frac{K_U}{T_e \cdot s + 1};$$
 (2.32)

$$W_{g_f}(s) = \frac{f_2(s)}{\omega(s)} = \frac{K_f}{T_e \cdot s + 1} = \frac{K_f}{(\frac{X_g}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_g}) \cdot s + 1},$$
(2.33)

$$\begin{array}{lll} kur & U_2(s) & - Laplasa transformācijas izejas spriegumam; \\ f_2(s) & - Laplasa transformācijas izejas frekvencei; \\ K_U & - pastiprinājuma koeficients spriegumam iegūstams eksperimentāli, V \cdot rad^{-1} \cdot s^{-1}; \\ K_f & - pastiprinājuma koeficients frekvencei iegūstams eksperimentāli, Hz \cdot rad^{-1} \cdot s^{-1}; \\ T_e & - ģeneratora elektriskā laika konstante, s; \\ X_g & - ģeneratora reaktīvā pretestība, \Omega; \\ R_g & - ģeneratora aktīvā pretestība, \Omega. \end{array}$$

PMSG teorētiskie pētījumi ar simulācijas modeli tika veikti, izmantojot gatavus MATLAB *Simulink* blokus no bibliotēkas "*SimPowerSystems*". Pētot PMSG pārejas procesus spriegumam vai strāvai un to ietekmi uz ātrākas sistēmas darbībām, ir noderīgi izmantot gatavos Simulink blokus, taču šī darba ietvaros ģeneratora mehāniskā un elektriskā laika konstantes ir mazas, salīdzinoši ar visas VES sistēmas kopējo laika konstanti. Tas nozīmē, ka strāvas un sprieguma pārejas procesi būtiski neietekmē VES kopējo darbību (Anani N.A., 2011).

PMSG simulācijas apskatam pastāv iespējas izmantot MATLAB Simulink "SimPowerSystems" bibliotēkas bloku "Permanent Magnet Sychronous Machine". Ir nedaudzi pētījumi, kuros ir veikta bibliotēkas validācija ar eksperimentāliem datiem. Iegūtie pētījumu rezultāti ir pietiekoši precīzi, lai apstiprinātu simulācijas modeļa atbilstību reālam PMSG (Ahlqvist E., 2015). Simulācijas modeļa pārbaudei tika izmantoti sekojoši bibliotēkas bloki: PMSG, ātruma uzdevums "Constant", statiska elektriskā slodze "Three-Phase Series RLC Load", voltmetri "Voltmeter", signālu multipleksors "Mux" un datu reģistrators "Scope" (2.33. att.).



2.33. att. PMSG ātruma uzturēšanas simulācijas modeļa struktūra

Simulācijas modeļa pārbaudei tika veikta simulācija ar simulācijas laiku t_{sim} = 0.04 s un n_{g.ref} = 175 rad·s⁻¹ un aktīvo slodzi 1000 W pie ģeneratora nominālā sprieguma. Tika iestatīti sekojoši ģeneratora parametri: J_g = 7.8 kg·m², fāzes tinuma aktīvā pretestība R_g = 0.099 Ω , fāzes tinuma induktīvo pretestību X_g = 835mH un polu pāru skaits p = 6 (Ģeneratora tips - 4C2X2П100Л8ПИД1УХЛ4).

Ģeneratora izejā ir elektriskā slēguma porti, kas tiek pievienoti pie slodzes. Sprieguma izejas grafiks parāda 3 fāžu sprieguma līknes. Sprieguma amplitūda ir 100V AC pie nominālā rotācijas ātruma 1500 min⁻¹. Ģenerators ieskrienas, sasniedzot nominālo tukšgaitas griezes momentu 0.001 s (2.34. att.). Šāds ieskriešanās laiks ir nepilnīgs, jo simulācijas modelis sevī neietver rotora inerces momentu, kas arī pamato ātro ieskriešanās laiku.



2.34. att. Simulācijas dati ģeneratora spriegumam un griezes momentam

Iepriekš apskatītais PMSG modelis sastādīts no "*SimPowerSystems*" bibliotēkas *Simulink* vidē, sevī ietver mehānisko un elektrisko ģeneratora funkciju modelēšanu, izmantojot nelineāros vienādojumus. Lai izmantotu līdzvērtīgas funkcionalitātes bloku, kas sastādīts no standarta bibliotēkas blokiem, nepieciešams veikt ģeneratora sistēmas divu daļu atdalīšanu: mehāniskā daļa un elektriskā daļa. Sastādot ģeneratora apakšsistēmu mehāniskajai daļai, simulācijas ieejā tiek pieslēgts rotācijas ātrums un mehāniskais griezes moments. Ģeneratora apakšsistēmas izejā tiek formēts ģeneratora rotācijas ātrums un rotora pozīcija (2.35. att.).



2.35. att. Generatora apakšsistēma

Ģeneratora mehānikas aprakstošā apakšsistēma satur atvērto pārvades funkciju, kur katrā simulācijas ciklā tiek pārrēķināta ģeneratora laika konstante. Apakšsistēma ir izveidota ar uzdevumu to ērti pievienot modelim vai tieši otrādāk, izņemt no modeļa. Atvērtas pārvades funkcijas izpildījums dod iespēju veikt laika konstantes pārrēķinu atkarībā no ievadītajiem ģeneratora parametriem (2.36. att.).



2.36. att. PMSG mehānisko pārejas procesu simulācijas apakšsistēma
Apakšsistēma tiek pārbaudīta, sastādot pārbaudes simulācijas modeli. Laika konstante mainās atkarībā no ģeneratora nominālā inerces momenta simulācijas procesā, ieejā formējot vienādus ieejas signālus rotācijas ātrumam un griezes momentam. Pirmajā simulācijā tika ievadīts ģeneratora inerces moments $J = 2.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, bet otrajā $J = 20.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Palielinot ģeneratora rotora inerces momentu, tiek panākta lēnāka ģeneratora ieskriešanās pie nemainīga ieejas griezes momenta. Inerces moments palielina ģeneratora laika konstanti. Ar $J = 2.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ģenerators ieskrienas aptuveni 0.3 s, taču pie $J = 20.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ģenerators ieskrienas 1.6 s. Rotora inerces moments otrajā gadījumā ir 10 reizes lielāks, bet ieskriešanās laiks palielinājies apmēram 6 reizes (2.37. att.).





Simulējot sistēmu pie vienāda rotora inerces momenta 2.2 kg·m² ar diviem dažādiem pievadītajiem rotora griezes momentiem 250 Nm un 1150 Nm, tiek iegūti atbilstoši simulācijas dati. Tie uzrāda to, ka izejas rotācijas ātruma izmaiņa ir cieši atkarīga no pievadītā mehāniskā griezes momenta. Pie ieejas griezes momenta 250 Nm ģenerators ieskrienas līdz nominālajiem apgriezieniem 1 s. Pie pievadītā griezes momenta 1150 Nm ģenerators ieskrienas 0.3 s (2.38. att.).



2.38. att. Simulācijas rezultāts ar ģeneratora inerces momentu J=2.2kg·m² a - T_a = 250 Nm; b - T_a = 1150 Nm.

Simulācijas modelis tika sastādīts trīsfāžu maiņsprieguma PMSG. Simulācijas pētījumi apstiprina, ka ģeneratora izejas spriegums U_g ir lineārs ģeneratora rotācijas ātrumam $U_g = f(\omega_g)$. Lai apakšsistēma būtu integrējama kopējā VES simulācijas modelī, ir izveidots atbilstošs ieeju un izeju signālu kopums. Sprieguma simulācija balstās uz lineāru funkcijas aprēķinu pēc ievadītajiem ģeneratora parametriem. Sprieguma inducēšanās statora tinumos notiek ar laika aizturi, ko nosaka ģeneratora elektriskā laika konstante. Apakšsistēmas izejā tiek simulēts trīs veidu spriegums: momentānais spriegums katrā fāzē, sprieguma amplitūda, efektīvā sprieguma vērtība (2.39. att.).





Veicot apakšsistēmas "*Sprieguma Avots*" pārbaudi tika izvēlēti sekojoši simulācijas kritēriji: ģenerators ar daudzpolu rotoru un rotācijas ātrumu no 0 līdz 173 min⁻¹; ģeneratora izejas U_{g.ef.} no 0 līdz 400 V; trīsfāžu tipa ģenerators ar 6 polu pāriem. Simulācijas modelim pārbaudes laikā tika formēts ģeneratora ātrums ieejas signālā, summējot blokus "*Ramp*" un "*Step*". Simulācijas laiks t_{sim} = 3 s. Ar *Step* bloka signālu tiek soļa formā pacelts rotācijas ātrums. Simulācijās reģistrētie grafiki atbilst teorētiskajiem ģeneratora izejas datiem, ko var pārbaudīt un koriģēt salīdzinot ar reāla ģeneratora izejas mērījumiem (2.40. att.).



2.40. att. Sprieguma avota apakšsistēmas simulācijas rezultāti

Ģeneratora strāvas stiprums ir atkarīgs no slodzes pilnās pretestības un ģeneratora sprieguma. Ģeneratoram nodrošinot elektrisko enerģiju dažāda veida patērētājiem, veidojas aktīvā un reaktīvā slodze (Chen N., 2008). Šī eksperimenta ietvaros strāvas avots tiek apskatīts tikai idealizēts ar sin formu, jo, atkarībā no slodzes veida, ir formējamas dažādas strāvas formas. To forma ir atkarīga no vairākiem faktoriem: sprieguma formas veida, slodzes veida, kas var

būt aktīva vai reaktīva, kā arī dažādas harmonikas, kas var radīt nesimetrisku strāvas formas plūsmu (Aho J., 2012).

Sprieguma forma simulācijas laikā tiek formēta sinusoidāla. Formas veids dabiskam objektam nav absolūti sinusoidāls, jo harmoniku dēļ veidojas nobīdes no sinusa līknes. Apakšsistēma "*Strāvas Avots*" sastādīta, izmantojot MATLAB standarta bibliotēkas elementus. Atkarībā no slodzes pretestības un izejas sprieguma tiek simulēta aprēķinātā ģeneratora elektriskā strāva (2.41. att.).



2.41. att. Idealizēta strāvas avota aprēķina apakšsistēmas iekšējā struktūra

Veicot simulācijas modeļa apakšistēmas "*Strāvas Avots*" pārbaudi tika uzdots konstants ieejas spriegums Ug = 24 V. Ar "*Ramp*" funkciju tika mainīta slodzes pretestība robežās no 5 Ω simulācijas laikā t_{sim} = 0.5 s līdz 10 Ω laikā t_{sim} = 10.0 s. Reģistrētie simulācijas lielumi parāda atbilstošu apakšsistēmas darbību un apakšsistēma var tikt izmantota VES kopējā simulācijas modelī (2.42. att.).



2.42. att. Strāvas avota simulācijas rezultāti

2.7. Ģeneratora simulācijas modeļa validācija izmantojot eksperimentālos datus

Teorētisko pētījumu gaitā tika sastādīts MATLAB *Simulink* PMSG modelis, ietverot teorētiskus elektromehāniskos parametrus. Simulācijas laikā tika iegūts izejas datu masīvs, kura atbilstību reālas iekārtas darba procesam ir nepieciešams pārbaudīt. Lai varētu veikt ģeneratora sprieguma simulācijas modeļa pārbaudi, tika izveidots eksperimentālais stends, uz kura, izmantojot jaunākās paaudzes industriālās iekārtas, būtu iespējams veikt PMSG sprieguma mērījumus un iegūtos rezultātus analizēt, salīdzinot ar simulācijā iegūtajiem rezultātiem (2.43. att.).



2.43. att. **PMSG sprieguma mērījumu stenda elektriskā slēguma shēma** E1.1 – NI-6008i; E1.2 – Optidrive P2 frekvences regulators; E1.3 – portatīvais dators Nx6325; E1.4 –asinhronais motors; E1.5 – PMSG 4C2X2П100Л8ПИД1УХЛ4; V1.1 – voltmetrs līnijas sprieguma mērījumam; V1.2 – voltmetrs fāzes sprieguma mērījumiem; A1.1 – ampermetrs L1 fāzes strāvas mērīšanai.

Pēc sagatavotās elektriskās shēmas tika nokomplektētas iekārtas, ar kurām varētu veikt nepieciešamo uzdevumu. Asinhronā motora ātruma regulēšanai tika izmantots Invertek ražotais Optidrive P2 ar jaudu 4 kW. Tā galvenās priekšrocības ir iebūvētais vektoriālais vadības algoritms un precīza griezes momenta kontrole un ātruma regulēšana.

E1.2 ātruma uzdevums tiek formēts ar 0..5 V DC (*Direct Current*) signālu, kas tiek ģenerēts no iekārtas NI-6008i, kas ir "Data acqusition" iekārta, kuras pieslēguma draiveri ir savietojami ar MATLAB *Simulink* bibliotēku. Tas nozīmē, ka tā izejas signālu ir iespējams formēt no MATLAB *Simulink* simulācijas modeļa. MATLAB *Simulink* simulācijas modelis tiek izmantots no iekārtas E1.3, kur ir uzstādīta MATLAB *Simulink* programmatūra un ar speciāli izveidotu simulācijas modeli tiek formēts reāls izejas signāls no 0..5 V DC un ierakstīts E1.1 ierīcē caur USB2.0 portu. Iegūtais vadības signāls 0..5 V DC tiek pievadīts E1.2 iekārtai analogā signāla ieejā, kas linearizē signālu no 0..5 V DC uz 0..50 Hz. Veicot *Simulink* modeļa simulāciju reālajā laikā, var tikt formēts reāls iekārtas ātruma uzdevums no 0..50 Hz un veikt mērījumus simulācijas laikā. Frekvences uzdevuma atjaunošanās solis ir 0.1 s.

Eksperimenta pētāmais objekts ir PMSG ģenerators $4C2X2\Pi100Л8\PiИД1УXЛ4$ ar 4 poliem un sekojošiem nominālajiem parametriem: $f_{nom} = 50$ Hz, $n_{nom} = 1460$ min⁻¹, $P_{nom} = 3.0$ kW, $U_{nom} = 150$ V.

Sprieguma mērījumi tika veikti ar Chauvin Arnoux mēriekārtu. Lai tiktu iegūti noteiktie ražotāja precizitātes rādītāji, ir noteikta nosacījumu kopa, kas ir jāizpilda lietotājam un mērījumu veicējam. Telpas temperatūrai, kurā tiek veikts mērījums, ir jābūt diapazonā no + 20 līdz + 26 C, telpas mitrumam ir jābūt 20..75 %, mērāmajai strāvai ir jābūt sinusoidālai ar

frekvenci robežās 0..65 Hz. Strāvas un sprieguma mērīšanas kanāliem ir savs mērīšanas diapazons. Strāvas ieejas kanāls ar mērīšanas diapazonu 50..1000 mV. Mērīšanas precizitāte ir ± 0.5 % no rādījuma + 0.5 mV, kas ir 0.1 mV. Otrs kanāls tiek izmantots sprieguma mērīšanai ar mērīšanas diapazonu 50..600 V. tā mērījuma kļūda ir ± 0.5 % no rādījuma + 0.5 mV. Sprieguma kanāla mērīšanas solis ir 0.1 V.

2.3. tabula

f, Hz	Uf.t.1, V	Uf.t.2, V	Uf.t.3, V	Uf.t.vid, V	Uf.sl.1, V	Uf.sl.2, V	Uf.sl.3, V	Uf.sl.vid, V
50.0	152.6	153.3	153.6	153.2	146.6	145.8	146.9	146.4
45.0	138.9	139.3	139.2	139.1	130.2	131.2	130.8	130.7
40.0	123.6	123.9	123.5	123.7	115.5	114.9	116.5	115.6
35.0	107.5	107.9	107.8	107.7	101.6	100.8	101.0	101.1
30.0	92.0	92.2	92.7	92.3	87.1	87.8	87.0	87.3
25.0	76.6	76.8	76.6	76.7	72.8	72.1	73.5	72.8
20.0	62.4	62.4	62.7	62.5	56.3	56.5	55.3	56.0
15.0	45.9	46.1	46.6	46.2	43.2	43.9	43.8	43.6
10.0	31.4	31.6	31.5	31.5	25.9	26.4	25.5	25.9
5.0	23.0	24.1	24.8	24.0	15.5	16.5	15.0	15.7

Ģeneratora fāzes spriegumu eksperimentālie dati

Tika veikts eksperiments 3 reizes tukšgaitā un 3 reizes ar 1 kW lielu simetrisku slodzi visās trijās ģeneratora fāzēs. Slodzes režīms tika fiksēts, lai varētu eksperimentāli pārbaudīt sprieguma kritumu pie nominālās slodzes. Eksperimentāli tika mērīts L1 - L2 līnijas spriegums 3 reizes un L1 – PE fāzes spriegums. Mērījumi parāda sprieguma efektīvās vērtības.

2.4. tabula

f, Hz	Ul.t.1, V	Ul.t.2, V	Ul.t.3, V	Ul.t.vid, V	Ul.sl.1, V	Ul.sl.2, V	Ul.sl.3, V	Ul.sl.vid, V
50.0	264.3	265.5	266.0	265.3	253.9	252.5	254.4	253.6
45.0	240.6	241.3	241.1	241.0	225.5	227.2	226.6	226.4
40.0	214.1	214.6	213.9	214.2	200.1	199.0	201.8	200.3
35.0	186.2	186.9	186.7	186.6	176.0	174.6	174.9	175.2
30.0	159.3	159.7	160.6	159.9	150.9	152.1	150.7	151.2
25.0	132.7	133.0	132.7	132.8	126.1	124.9	127.3	126.1
20.0	108.1	108.1	108.6	108.3	97.5	97.9	95.8	97.1
15.0	79.5	79.8	80.7	80.0	74.8	76.0	75.9	75.6
10.0	54.4	54.7	54.6	54.6	44.9	45.7	44.2	44.9
5.0	39.8	41.7	43.0	41.5	26.8	28.6	26.0	27.1

Ģeneratora līnijas sprieguma eksperimentālie dati

Reālais asinhronā motora rotācijas ātrums ir mainīgs, pamatojoties uz to, arī piedzītā PMSG izejas spriegums ir mainīgs. Izmaiņas robeža ir maza un, mērot ar mēraparātu ar vidējo vērtību 1 s, šādas izejas sprieguma pulsācijas nav novērojamas. Asinhtonā motora frekvenču pārveidotājs *Optidrive* veic ātruma uzturēšanu pēc uzdotā lieluma. Tomēr, pamatojoties, ka netiek mērīts reālais rotācijas ātrums, tad regulēšana svārstās un nav iespējams pateikt absolūtu

rotācijas ātrumu ar šādu mērījumu. Taču tas nemaina būtību, ka mērījumi un regulēšana ar šādu precizitāti nodrošina eksperimenta izpildi un dati ir tālāk salīdzināmi ar MATLAB *Simulink* simulācijas modeļa izejas datiem.

2.5. tabula

f, Hz	Uf.t.vid, V	Kļūda ±V	Uf.sl.vid, V	Kļūda ±V	Ul.t.vid, V	Kļūda ±V	Ul.sl.vid, V	Kļūda ±V
50.0	153.2	1.27	146.4	1.23	265.3	1.83	253.6	1.77
45.0	139.1	1.20	130.7	1.15	241.0	1.70	226.4	1.63
40.0	123.7	1.12	115.6	1.08	214.2	1.57	200.3	1.50
35.0	107.7	1.04	101.1	1.01	186.6	1.43	175.2	1.38
30.0	92.3	0.96	87.3	0.94	159.9	1.30	151.2	1.26
25.0	76.7	0.88	72.8	0.86	132.8	1.16	126.1	1.13
20.0	62.5	0.81	56.0	0.78	108.3	1.04	97.1	0.99
15.0	46.2	0.73	43.6	0.72	80.0	0.90	75.6	0.88
10.0	31.5	0.66	25.9	0.63	54.6	0.77	44.9	0.72
5.0	24.0	0.62	15.7	0.58	41.5	0.71	27.1	0.64

Ģeneratora fāzes un līnijas spriegumu eksperimentālo mērījumu analīze

Lai varētu veikt eksperimentālo datu salīdzināšanu ar MATLAB *Simulink* simulācijas datiem, tiek izmantota datu ievadīšana MATLAB *Simulink* vidē. Tas nozīme to, ka ar *Simulink* bibliotēkas bloku "From Workspace" var ielādēt eksperimentālos datus simulācijas vidē (2.44. att.).



2.44. att. Simulācijas modelis MATLAB *Simulink* vidē eksperimentālo un simulācijas datu salīdzināšanai

Izmantojot Simulink blokus "From Workspace" un "To Workspace" ir realizēta PMSG simulācijas modeļa verifikācija ar eksperimentālajiem datiem. Eksperimentālie dati uzdevumam, kas ir ierakstīti E1.2 iekārtā, tiek arī simulēti kā ieejas signāls PMSG simulācijas modelim. Tiek formēts vienāds rotācijas ātrums un vienā kopējā grafikā tiek ierakstīts simulācijas datu un eksperimentālo mērījumu rezultāts (2.45. att.).



2.45. att. Eksperimentā ģenerētais ģeneratora ātruma uzdevums

Eksperimentālie rezultāti apstiprina, ka PMSG inducētais fāzes un līnijas spriegums ir lineārs tā rotācijas ātrumam pie nemainīgas slodzes vai tukšgaitas režīmā. Pateicoties šai sakarībai, mūsdienu iekārtās, veicot VAVES slogošanu, tiek ietaupītas finanses un netiek mērīts reālais ģeneratora rotācijas ātrums ar ātruma mērītājiem. Rotācijas ātrums tiek rēķināts no izmērītā inducētā ģeneratora izejas sprieguma (2.46. att). Simulācijas datu sakritība pret eksperimentālajiem datiem tukšgaitas režīmā ir $R^2 = 0.982$ ar standartnovirzi 1.55 V. Slodzes režīmā ar elektrisko slodzi 1 kW simulācijas un eksperimentālo datu sakritība ir $R^2 = 0.994$ ar standartnovirzi 0.812 V.



2.46. att. Ģeneratora fāzes sprieguma simulācijas un eksperimentālo mērījumu datu salīdzinājums

 $U_{f.sim}$ – simulācijas modeļa fāzes spriegums, V; $U_{f.eksp}$ – eksperimentālo mērījumu fāzes spriegums, V; $U_{l.sim}$ – simulācijas modeļa līnijas spriegums, V; $U_{l.eksp}$ – eksperimentālo mērījumu līnijas spriegums, V

Raksturlīknes augšējā posmā pie lielākiem rotācijas ātrumiem rezultāti sakrīt ar augstu precizitāte, taču posmos, kur rotācijas ātrums ir mazāks, abu rezultātu sakritība samazinās. Nelielā nobīde no linearitātes ir pamatojama ar asinhronā piedziņas motora ātruma

nodrošināšanu pie maziem rotācijas ātrumiem. Tas nozīmē, to, ka pie zemākiem rotācijas ātrumiem E1.2 iekārta nespēj tik precīzi nodrošināt absolūto rotācijas ātrumu.

Mainoties ģeneratora slodzei, ir novērojams sprieguma kritums. Jo lielāka slodze, jo lielāks sprieguma kritums. Izejas spriegums pie maksimālās slodzes ir 145.7 V, bet tukšgaitas režīmā tas paaugstinās līdz 155.6 V. Tas nozīmē, ka pie nominālās slodzes sprieguma kritums var būt pat līdz 7 % no nominālā sprieguma (2.47. att.).



2.47. att. Ģeneratora sprieguma mērījumi strādājot ar mainīgu ģeneratora slodzi U_{f.eksp} – ģeneratora fāzes spriegums, V; S_{f.eksp} – ģeneratora fāzes kopējā jauda, VA.

Pētījumu rezultātā sastādītais un validētais PMSG simulācijas modelis ir izmantojams kopējā VAVES simulācijas modelī. Atkarībā no pētījumu specifikas, modelis ir ērti koriģējams jebkurām specifiskām vajadzībām, tādā veidā padarot modeli ērtāk lietojamu un izmantojamu nestandarta pētījumos.

2. nodaļas kopsavilkums un secinājumi

Nodaļā aprakstīta izstrādes metodika un validācijas process VAVES apakšsistēmu simulācijas modeļiem: aerodinamiskajam spēkam, rotoram, mehāniskā pārvada sistēmai, ģeneratoram un vēja ātrumam. Visas izveidotās apakšsistēmas ir validētas ar eksperimentālajiem datiem. Tās ir iespējams izmantot kopējā VAVES simulācijas modelī.

- 1. Veicot validāciju ar eksperimentālu VAVES, simulācijas modeli nepieciešams pārbaudīt ar eksperimenta laikā nomērīto vēja ātrumu, lai būtu precīzāk pielīdzināmi simulācijas modeļa un eksperimentālā objekta kolerācijas-regresijas analīzes rezultāti.
- 2. Ar aerodinamisko spēku vektoru aprēķinu metodi ir iespējams veikt VAVES rotora aerodinamiskā griezes momenta, relatīvā appūtes leņķa, spārna iestatīšanas leņķa aprēķinus. Šī aprēķinu metode ir izmantojama gan simulācijas modeļos, gan mūsdienu vadības PLK, tādā veidā padarot simulācijas modeļa algoritmus pēc to validācijas pielīdzināmus reālo vadības iekārtu algoritmiem.
- 3. Pētījumi apliecina, ka ātrgaitas koeficients būtiski iespaido aerodinamisko griezes momentu, kas darbojas uz VAVES. Simulācijas rezultāti parāda, ka VAVES ar rotora rādiusu 5 m un trīs 10 m gariem un 1 m platiem NACA0018 profila spārniem ar λ = 3 sasniedz maksimālo griezes momentu 4200 Nm, ar λ = 2.5 griezes moments samazinās līdz 3150 Nm, bet ja λ = 2.0, tas samazinās līdz 2500 Nm. Aerodinamiskā griezes momenta izmaiņu apraksta nelineāra ātrgaitas koeficienta funkcija.

- 4. VAVES rotora simulācijas modelis ir validēts ar VAVES "FlyFox-20kW" eksperimentālajiem datiem. Ekperimentālais VAVES "FlyFox-20kW" ir ar nominālo jaudu 20 kW pie v = 12 m·s⁻¹. Simulācijas rezultātus un eksperimentālos mērījumus salīdzinot ar regresijas korelācijas analīzi determinācijas koeficients ir 0.842. Mainot simulācijas modelī ievadāmo rotora inerces momentu vai elektriskās slodzes regulatora parametrus, datu korelācija samazinās R² < 0.718.</p>
- 5. Darbā izstrādātā VAVES ģeneratora elektriskās slodzes regulēšanas simulācijas modelis tika validēts ar eksperimentālajiem "FlyFox-20kW" datiem. Datu apstrāde ar regresijas – korelācijas metodi uzrāda augstu determinācijas koeficinetu $R^2 = 0.842$. Slodzes regulēšanas algoritma parametri ir atkarīgi no regulējamās VAVES nominālajiem datiem. Eksperimentāli tika pierādīts, ka pie vieniem VAVES ievadītajiem parametriem, ja netiek ievadīti optimāli slodzes regulēšanas parametri, tad simulācijas modeļa un eksperimentālo datu korelācija samazinās no $R^2 = 0.842$ līdz R2 = 0.529.
- 6. VAVES ar elektrisko jaudu 20 kW pie v = 12 m s⁻¹ saražotās enerģijas daudzums korelē ar rotora inerces momentu. Samazinot rotora inerces momentu no 5000 kg·m² līdz 2000 kg m2, VES, strādājot diennakti ar vidējo vēja ātrumu 5 m·s⁻¹, var saražot par 4.2 kWh vairāk, kas ir 12.6 % no dienā saražotās elektroenerģijas.

3. VERTIKĀLAS ASS VES SPĀRNU LEŅĶA AKTĪVĀS REGULĒŠANAS SISTĒMAS IZSTRĀDE

Jaunākie pētījumi, aerodinamiskie aprēķini un modelēšanas rezultāti liecina, ka, veicot VAVES spārna iestatīšanas leņķa korekciju, iespējams paaugstināt VAVES lietderības koeficientu (Elkhoury M., 2015). Rotoriem ar fiksētu spārna leņķi vēja enerģijas izmantošanas koeficients ir par aptuveni 10 % mazāks nekā rotoriem ar regulējamu spārna leņķi.

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas (*Pitch control systems*) VAVES tiek maz izmantotas, pamatojoties uz to sarežģīto konstrukciju un neizpētīto tiešo ekonomisko ieguvumu. Pilotprojektā tiek piedāvāta ASV uzņēmuma "Inergy" ražota 75 kW VES "*EcoVert* 75", kurā tiek izmantota spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma. VAVES appūtes laukums ir 190 m² ar 3 spārniem un nominālā jauda 70 kW. VAVES rotora optimālais ātrgaitas koeficients $\lambda = 3$ (Inergy, s.a.).

Daudzi pētījumi, izgudrojumi un patenti ir pierādījuši, ka industriālajā un komerciālajā pielietojumā priekšroka tiek dota rotora spārnu iestatīšanas leņķa aktīvai automātiskai regulēšanai ar elektriskiem servomehānismiem, kas veic katra rotora spārna leņķa autonomu regulēšanu pēc centrālās vadības sistēmas uzdevuma. Šāds pielietojums ir ekonomiski pamatots VAVES ar jaudu, kas ir lielāka par 5 kW. Mazākas jaudas VAVES šāds pielietojums ir ekonomiski neizdevīgs, jo palielinās papildus kapitālieguldījumu atmaksāšanās laiks, kas samazina produkta rentabilitāti. VAVES ar jaudu zem 5 kW tiek pielietoti vienkāršāki un lētāki risinājumi ar mehānisku centralizētu spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanu.

Nodaļā tiek pētīta aktīvās regulēšanas sistēma ar elektropiedziņu, kur ar regulējamu servomehānismu spārna leņķis tiek automātiski regulēts attiecībā pret spārna atbalsta punktu atkarībā no rotora pagrieziena leņķa pret vēja virzienu. Pētījumu galvenais mēŗkis ir eksperimentāli pārliecināties par servo mehānismu izmantošanas iespēju spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas uzdevuma veikšanai. Pētījuma laikā izstrādātais simulācijas modelis palīdzētu nākotnē veikt pētījumus un analizēt VAVES darbību spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas režīmā, neizmantojot reālu servo mehānismu. Ar eksperimentālajiem rezultātiem ir jāpierāda servomehānisma darba spēja pie noteiktiem uzdotajiem VAVES rotora rotācijas ātrumiem.

3.1. Spārnu leņķa aktīvās regulēšanas sistēmas konstruktīvā risinājuma analīze un izstrāde

Spārnu leņķa regulēšanas sistēmas mehānisko daļu veido, izmantojot elektrisko servo piedziņu ar reduktoru vai bez mehāniskā pārvada (Bonfiglioli, s.a.). Kā elektriskā piedziņa pārsvarā gadījumu tiek izmantoti servo motori ar pozicionēšanas algoritmu. Izmantojot servo mehānismu ar reduktoru, tiek iegūta virkne priekšrocību: mehānisko vibrāciju absorbcija reduktorā; iespēja izmantot motoru ar mazāku griezes momentu; radiālās un aksiālās slodzes absorbcija reduktorā. (Fiona D., 2011). Servo mehānismam bez reduktora ir citas priekšrocības: vienkāršāka konstrukcija; servo motora pagrieziena leņķis sakrīt ar spārna faktisko pagrieziena leņķi; mazāk konstrukciju uz rotora.

Industriālās automātikas nozare piedāvā virkni vadības sistēmu un servo mehānismu regulatoru, ar kuru palīdzību tiek veikta spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas uzdevuma izpilde. Paralēli elektriskajai piedziņai HAVES konstrukcijās tiek izmantota arī hidropiedziņa. Jaunākās tehnologijas atļauj tās izmantošanu 55 % no visām lielas jaudas HAVES. Pieredze rāda, ka hidropiedziņa padara sistēmu vienkāršāku un lētāku, salīdzinot ar elektrisko piedziņu (Dvorak P., 2009).

Servo mehānisms ar reduktoru spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas gadījumā sastāv no 3 galvenajām komponentēm: servo regulatora, servo elektromotora, reduktora. Šādā gadījumā izmanto standarta servo motorus ar flanča stiprinājumu reduktorā. Industriālajā automātikā tiek

izmantoti pastāvīgo magnētu sinhronie servo motori (turpmāk – PMSSM) ar elektromagnētisko pagrieziena leņķa atgriezenisko saiti (3.1. att.).



3.1. att. **Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas konstrukcija ar reduktoru** 1 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas mehāniskais posms; 2 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas elektronikas posms; 3 – vēja plūsma un tās perturbācija uz spārna virsmu; 4 – spārna konstrukcija; 5 – reduktors; 6 – servo motors; 7 – servo regulators; 8 – elektroenerģijas avots.

Konstruktīvajā izpildījumā bez reduktora izmanto cita veida servo motorus. Servo motora rotors ir ar dobu vidu, kas dod iespēju izmantot dobumu spārna rotācijas vārpstas izvirzīšanai caur servo motora rotoru. Šāda veida servo motora konstrukcija ir ērta un piemērota šādiem tehnoloģiskajiem risinājumiem (Bugimir M., 2013). Ja nav iespējams izmantot papildus izturības gultņus servo motorā, tad nepieciešams atbalstīt spārna konstrukciju ar papildus mehāniskajiem elementiem, lai spārns nebalstītos uz servo motora rāmja un gultņiem. Sistēmai bez mehāniskā pārvada ir divas galvenās sastāvdaļas: servo motors un servo regulators (3.2. att.).



3.2. att. **Spārnu leņķa regulēšanas sistēmas konstruktīvais risinājums bez reduktora** 1 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas mehāniskais posms; 2 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas elektronikas posms; 3 – vēja plūsma un tās perturbācija uz spārna virsmu; 4 – spārna konstrukcija; 5 – servo motors; 6 – servo regulators; 7 – elektroenerģijas avots.

Mehāniskā konstrukcija ar tiešo piedziņu bez reduktora dod iespēju veikt spārna leņķa regulēšanu ar lielāku precizitāti, jo sistēmā nav reduktora statiskās pārvades kļūdas. Reduktora izmantošanas gadījumā nepieciešams izmantot tādus, kuriem ir samazināta statiskā mehāniskā kļūda un ierobežota izejas vārpstas spēle. Servo motora atgriezeniskās saites mērījuma precizitāte ir atkarīga no impulsu skaita uz vienu pilnu motora apgriezienu. Pārsvarā gadījumu tie ir 1024, 2048 vai 4096 impulsi. Tas nozīmē, ka mērījumu kļūda var variēt no ± 0.35 ° līdz ± 0.087 ° (Eitel E., 2014).

Vienam spārnam iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmā ir servo piedziņa, piedziņas regulators, mehāniskais pārvads un spārna pagrieziena leņķa mēriekārta. Spārnu regulēšanas sistēmas centrālais mezgls sastāv no centrālās vadības sistēmas, vēja ātruma un virziena mēriekārtām, elektroenerģijas barošanas avota, rotora pagrieziena leņķa mēriekārtas. Servo motoru regulē servo regulators, kas sastāv no elektriskā spēka un loģiskās vadības interfeisa. Centrālā vadības sistēma mēra vēja ātrumu un virzienu, rotora pagrieziena leņķi, spārna esošo pagrieziena leņķi. Apstrādājot nolasīto informāciju, vadības sistēma aprēķina analītiski spārna pagrieziena leņķa uzdevumu, kas tālāk tiek slēgtā sistēmā apstrādāts un izpildīts (3.3. att.).



3.3. att. **Spārnu iestatīšanas leņķa piedziņas vadības sistēmas struktūrshēma** 1 – vēja perturbācija uz spārna mehānisko konstrukciju; 2 – spārna mehāniskā konstrukcija; 3 – spārna iestatīšanas leņķa elektromehāniskā mēriekārta; 4 – reduktors; 5 – servo motors; 6 – servo motora pagrieziena leņķa elektromehāniskā mēriekārta; 7 – servo regulators; 8 – centrālās vadības PLK; 9 – elektroenerģijas avots.

VAVES konstrukcija sastāv no 2 vai vairāk spārniem, kas nozīmē, ka spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma strukturāli sastāv no centrālās vadības sistēmas un vairākiem regulējamo spārnu mezgliem, katram spārnam nodrošinot neatkarīgu uzdotā leņķa izpildi ar atsevišķu servo regulatoru.

3.2. Spārnu iestatīšanas leņķa aktīvās regulēšanas sistēmas simulācijas modeļa izstrāde un verifikācija

Spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas vadības sistēmas pamatā ir pagrieziena leņķa uzdevuma izpilde, sekojot un pārbaudot uzdevuma izpildi ar elektromagnētisko sensoru palīdzību. Vadības sistēmas arhitektūra tiek sastādīta dažādos izpildījumos, atkarībā no izmantoto iekārtu ražotāja. Ikvienam industriālo vadības sistēmu ražotājam ir vienota struktūra, kur centrālās vadības algoritma izpildei tiek izmantots programmējamais loģiskais kontrolleris (turpmāk – PLK), servo motora vadībai tiek izmantots servo regulators, signālu apmaiņai starp iekārtām tiek izmantots augsta ātruma datu protokols vai analogais signāls (Muljadi E., 2001). Parametri, kas nepieciešami spēku vektoru metodei ir: vēja ātrums v, m \cdot s⁻¹; vēja pagrieziena leņķis ϕ , °; rotora pagrieziena leņķis θ , °; rotora rotācijas ātrums n, min⁻¹ (3.4. att.).



3.4. att. Spārnu iestatīšanas leņķa funkcijas struktūra

VAVES nullpunkta iestatīšana ir svarīga, lai VAVES aprēķinātajiem leņķiem un vēja pagrieziena leņķim būtu vienāda atskaites bāze. Praksē pieņemts, ka atskaites bāze ir Ziemeļu

debespuses virziens, ko iestata gan VAVES rotoram, spārniem un arī vēja virziena mērītājam (3.5. att.).



3.5. att. VAVES leņķu izvietojums pie sistēmas nulles punkta
 1 - VAVES spārns; 2 - VAVES rotors; 3 - Vēja virziena mērīšanas iekārta; 4 - Debespušu rādītājs;
 θ - VAVES rotora pagrieziena ļeņķis, °; φ - spārna iestatīšanas leņķis, °; φ - vēja pagrieziena leņķis, °.

Servo motora pagrieziena leņķi mēra ar elektromagnētisko sensoru: impulsu TTL enkoderis bez atmiņas, impulsu SSI enkoderis ar atmiņu, SIN/COS enkoderis bez atmiņas, SIN/COS enkoderis ar atmiņu, resolveris bez atmiņas funkcijas. Plaši tiek izmantotas mēriekārtas ar atmiņu, lai saglabātu pozīcijas informāciju elektroenerģijas nodrošinājuma pārtraukumos. Gadījumos, kad reduktors tiek izmantots spārna regulēšanas mehānismā, iestatīšanas leņķa mērījuma dublēšanai ir nepieciešams veikt leņķa pozīcijas nolasīšanu arī spārna konstrukcijai ne tikai servo motoram, tādā veidā iegūstot signālu dublēšanas diagnostiku, jo abos gadījumos pozīcijas leņķim ir jāsakrīt starp pozīcijas sensoriem noteiktās kļūdas robežās (Benedict M., 2013).

Izmantojot centralizēti attālinātas perifērijas iekārtas, ir svarīgi nodrošināt atbilstošu signālu apraides ātrumu < 500 µs. Datu apmaiņas ātrumam jābūt tādam, lai katrā programas apstrādes ciklā tiktu nolasīti jaunie dati un ierakstīti uzdevumi. Gadījumā, ja sistēma nespēj veikt uzdevuma izpildi pēc aprēķinātā optimālā spārna leņķa, tiek zaudēta vēja enerģija un pazeminās VAVES lietderības koeficients. Izmantojot spārna leņķa regulēšanas sistēmu, nepieciešams iegūt pēc iespējas mazāku spārna iestatīšanas leņķa kļūdu starp uzdoto un izpildīto (Biegel B., 2011).

Servo sistēmas izvēli nosaka aerodinamisko spēku analītiskie aprēķini. Aprēķinu rezultāti dod iespēju izvēlēties nepieciešamo servo motora jaudu. Galvenie jaudas aprēķinu kritēriji ir VAVES jauda, spārna konstruktīvie parametri, spārna aerodinamiskā spēka un rotācijas centra nobīde, spārna inerces moments, rotora rotācijas ātrums, reduktora pārnesuma attiecība (Zhang L., 2012).

Aktīvās spārnu regulēšanas sistēmas nepieciešamā ātrdarbība ir atkarīga no rotora rādiusa un ātrgaitas koeficienta. Aprēķinot rotora leņķisko ātrumu, var aprēķināt rotora viena leņķa grāda pagrieziena laiku, kurā nepieciešams izpildīt jaunu pozīcijas uzdevumu. Palielinoties rotora rādiusam, samazinās leņķiskais ātrums, kas palielina laiku starp nākošo un esošo pozīcijas uzdevuma izpildi. Samazinot ātrgaitas koeficientu un nemainot rotora rādiusu, palielinās laiks jauna spārna leņķa pozīcijas uzdevuma izpildei. Analītiskie aprēķini veikti VAVES ar 3 spārniem un optimālo ātrgaitas koeficientu $\lambda = 3$. Rotora diametrs D = 10 m. Pie vēja ātruma 2 m·s⁻¹ rotora pagrieziena leņķa izmaiņa par 1 ° notiek 0,01 s laikā. Pie nominālā vēja ātruma 10 m·s⁻¹ viena grāda izmaiņas laiks ir 0,0025 s. Tas nozīmē, ka katrs spārna pagrieziena leņķa uzdevums ir jāizpilda 2,5 ms laikā līdz tiek saņemts jauns pagrieziena leņķa uzdevums (3.6. att.). Vēja virziena mērīšana tiek veikta ar laika intervālu 1 s. Šāds laika solis tiek izvēlēts, lai nodrošinātu vadības sistēmas stabilitātes kritēriju izpildi.



3.6. att. VAVES analītiski aprēķinātie dinamiskie raksturojumi atkarībā no vēja ātruma

 $\omega(t)$ – rotora leņķiskais ātrums, rad s⁻¹; t₁ - rotora viena apgrieziena laiks, s; t₂ – rotora viena grāda pagrieziena laiks, s.

Vēja virziena mērīšanai tiek pielietotas divas metodes: ar ultraskaņas ierīcēm; ar elektromehāniskām ierīcēm. Ultraskaņas iekārtas mērījumi tiek apstrādāti ar iebūvētu procesoru, kas formē izejas signālu centrālajai vadības sistēmai. Signāla pārraides kavējums ir 1 līdz 5 s. Elektromehāniskie sensori ir ātrdarbīgāki. Signāla pārraides kavējums parasti nepārsniedz nolasīšanas cikla laiku, kas dod iespēju ar lielāku precizitāti veikt korekcijas leņķa uzdevuma aprēķinu (Biegel B., 2011).

Spārna iestatīšanas leņķa korekcijas iekārta atrodas uz rotora. Lai signālu par leņķa uzdevumu nodotu vadības sistēmai, var izmantot signāla bezvadu pārraidi (RF, WiFi, infrasarkanais signāls, Bluetooth). Signālu bezvadu pārraide ir praksei ērts risinājums, taču bezvadu sistēmā var veikt ļaunprātīgu iejaukšanos. Bezvadu sistēmas var strādāt dažādās apraides frekvencēs no kā atkarīga to ātrdarbība (Swartz A.R., 2012).

Mūsdienās bieži izmantots risinājums ir signālu pārvade caur slīdgredzeniem. Salīdzinājumā ar bezvada sistēmu, iekārta ar slīdgredzeniem nodrošina augstāku signālu pārvades drošumu un kvalitāti. Tā satur mazāk elektronikas, taču prasa augstu materiālu kvalitāti un izgatavošanas precizitāti (Soua S., 2012).

Spārna iestatīšanas leņķa aktīvās regulēšanas sistēmā izmanto servo motoru un servo regulatoru. Servo regulators veic servo motora strāvas un sprieguma mērījumus un apstrādā mērījumus no elektromehāniskā pozīcijas sensora. Servo motora regulēšana notiek autonomi neatkarīgi no centrālās vadības sistēmas darbības. Izmantojot strāvas un sprieguma mērījumus, tiek regulēta motora elektriskā slodze atkarībā no rotācijas virziena un ātruma, tādā veidā panākot nepieciešamo rezultātu (3.7. att.) (Kollmorgen, s.a.).





1 –elektroenerģijas avota pieslēgums; 2 – servo regulators; 3 – servo regulatora spēka interfeiss;
4 – servo motora strāvas mērīšanas iekārtas; 5 – servo motors; 6 – elektromehāniskais pozīcijas sensors;
7 – servo motora sprieguma mērīšanas iekārtas; 8 – servo regulatora loģiskās programmas apstrādes interfeiss;
9 – servo regulatora loģiskā interfeisa motora modulis; 10 – servo regulatora loģiskā interfeisa lietotāja programmas apstrādes modulis; 11 – pozīcijas uzdevuma signāls no centrālās vadības sistēmas.

Par centrālās vadības PLK var izmantot dažādu ražotāju izstrādājumus, taču svarīgi, ka PLK spēj nolasīt nepieciešamos ieejas signālus un veikt to apstrādi atbilstošā ātrumā. Veicot spārna optimālā iestatīšanas leņķa aprēķinus, centrālās vadības sistēmas PLK cikla laikam ir jābūt pietiekami mazam, lai spētu nodrošināt komunikāciju ar attālinātajām perifērijas iekārtām, kā arī lai veiktu tekošos aprēķinus un algoritmu izpildi. Kā alternatīvs risinājums matemātiskajam aprēķinam ir pārlūku tabulas, kurās ievadīti nepieciešamie dati. Veicot punkta interpolāciju, var aprēķināt nepieciešamo spārna iestatīšanas leņķi atkarībā no ieejas datiem. Tabulu izmantošanas gadījumā ir nepieciešami kontrolleri, kam ir lielākas datu atmiņas.

VAVES ar trīs aktīvi regulējamiem spārniem katrs spārns funkcionē kā autonoms elements. Spārnu regulēšanas sistēmā tiek izmantots centrālais kontrolleris, kas veic visu nepieciešamo datu nolasīšanu un apstrādi, aprēķinot katra spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas uzdevumus. Izmantojot aprēķinu metodi, nepieciešams centrālajā vadības kontrollerī definēt spārnu skaitu un automātiski aprēķināt katram spārnam nepieciešamo iestatīšanas leņķa uzdevumu. Servo regulatoru stāvokļa dati tiek sūtīti uz centrālo kontrolleri un atpakaļ tiek saņemts uzdevums. Signāli tiek nolasīti un ierakstīti kontrollera digitālo ieeju un izeju moduļos. Informācija par vēja rādījumiem un rotora pagrieziena leņķi tiek nodoti uz kontrollera ieeju (Biegel B., 2011).

Rotora pagrieziena leņķim jānorāda sākuma punktu. Par sākuma punktu parasti tiek pieņemts ziemeļu Z virziens, kas tiek apzīmēts kā nullpunkts. Arī informācija no vēja mērīšanas iekārtām tiek kalibrēta pēc ziemeļu virziena. Tātad gan rotora pagrieziena leņķa atskaites punkts, gan vēja virziena atskaites punkts ir kopējs (3.8. att.).



3.8. att. **Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas struktūrshēma** 1 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas mezgli; 2 – spārna pagrieziena leņķa elektromehāniskais sensors; 3 – spārns; 4 – servo sistēmas mehāniskais pārvads; 5 – servo motors; 6 – servo motora pagrieziena leņķa elektromehāniskais sensors; 7 – servo motora regulators; 8 – elektroenerģijas avots; 9 – centrālā vadības kontrollera ieeju - izeju modulis; 10 - centrālā vadības kontrollera loģiskās programmas modulis; 11 – vēja mēriekārta; 12 – rotora pagrieziena leņķa mēriekārta.

Iestatīšanas leņķa uzdevums servo regulatoram no centrālā vadības kontrollera var tikt pārraidīts caur datu protokolu vai ar sprieguma līmeņa analogo signālu. Lai divas iekārtas spētu komunicēt, izmantojot datu protokolu, nepieciešams abām iekārtām būt spējīgām darboties ar vienādu protokolu un interfeisu. Ja tiek izmantots protokols ar Vedējs – Sekotājs arhitektūru, tad ir nepieciešams, lai katra iekārta atbalstītu nepieciešamo stāvokli vedējs vai sekotājs. Ir daudzi mūsdienu protokoli, kas strādā bez noteikta plūsmas virziena. Izmantojot *Internet Protocol* (turpmāk – IP) tiek nodrošināta ļoti ātra datu apmaiņa, kas ir zem 100 µs: *ProfiNet*, *EtherCat*.

3.3. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas servo piedziņas simulācijas modeļa izstrāde

Servo motora un servo regulatora simulācijas modelis ir svarīgs rotora spārnu iestatīšanas leņķa sistēmas izstrādē. Servo motora elektriskos un mehāniskos raksturojumus apraksta sekojoši vienādojumi:

$$e_i = i_a \cdot R_a + K_e \cdot \omega_{sm}; \tag{3.1.}$$

$$e_i = i_a \cdot R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_e \cdot \omega_{sm} ; \qquad (3.2.)$$

$$M_{sm} = i_a \cdot K_t = J_{sm} \cdot a_{sm}, \tag{3.3.}$$

kur e_i – tinuma spriegums, V;

 $i_a - tinuma strāva, A;$

 J_{sm} – rotora inerces moments, kg·m²;

88

- K_e servo motora sprieguma konstante, V·A;
- K_t servo motora griezes momenta konstante, Nm·A⁻¹;
- La servo motora tinuma induktivitāte, H;
- R_a servo motora tinuma aktīvā pretestība, Ω ;
- M_{sl} slodzes griezes moments, Nm;
- M_{sm} servo motora griezes moments, Nm;
- ω_{sm} motora leņķiskais ātrums, rad·s⁻¹;
- a_{sm} servo motora paātrinājums, rad s-².

Izmantojot Laplasa transformāciju iegūts operatoru vienādojums :

$$e_i(\mathbf{s}) = R_a \cdot i_a(\mathbf{s}) + L_a \cdot i_a(\mathbf{s}) + K_e \cdot \omega_{sm}(s); \qquad (3.4.)$$

$$e_i(\mathbf{s}) = \left(\frac{L_a}{R_a} + 1\right) \cdot R_a \cdot i_a(\mathbf{s}) + K_e \cdot \omega_{sm}(s). \tag{3.5.}$$

Sastādot servo motora simulācijas modeli, nepieciešams aprēķināt mehānisko un elektrisko laika konstanti. Servo sistēmas ir ātrdarbīgas un, veicot sistēmas modelēšanu, ir svarīgi izmantot precīzus elektromehāniskos parametrus. Servo motora mehānisko laika konstanti aprēķina pēc formulas:

$$T_{sm.m} = \frac{R_a \cdot J_{sm}}{K_e \cdot K_t}.$$
(3.6.)

Servo motora elektrisko laika konstanti aprēķina pēc formulas:

$$T_{sm.e} = \frac{L_a}{R_a}.$$
(3.7.)

Maiņstrāvas trīsfāžu pastāvīgo magnētu sinhronajam servo motoram mehāniskā un elektriskā laika konstante tiek aprēķināta pēc formulām:

$$T_{sm.m} = \frac{R_{(L-L)} \cdot J_{sm}}{K_{e.(L-L)} \cdot K_t};$$
(3.8.)

$$T_{sm.e} = \frac{L_{(L-L)}}{R_{(L-L)}},$$
 (3.9.)

kur $L_{(L-L)}$ – servo motora līnijas induktivitāte, H; $R_{(L-L)}$ – servo motora līnijas aktīvā pretestība, Ω .

Servo motora ar pastāvīgajiem magnētiem tinumi tiek slēgti zvaigznes slēgumā. Mehāniskā un elektriskā laika konstante šādā gadījumā tiek rēķināta kā trīs fāžu elektromotoram un dati tiek lietoti no līnijas slēguma (3.9. att.).

Servo motora mehāniskā un elektriskā laika konstante var tikt aprēķināta pēc ievadītajiem datiem simulācijas modelī, ja simulācijas modelis tiek sastādīts ar ievadāmiem servo motora parametriem. Izmantojot precīzu servo motora iestatīšanu, ir iespējams paredzēt servo motora simulācijas modeļa atbilstību reālam motoram. Servo motoram ar elektrisko jaudu 0.374 kW un nominālo griezes momentu 1.1 Nm $T_{sm.e} = 1.2 \text{ ms un } T_{sm.m} = 2.1 \text{ ms. Izmantojot simulācijas modeli kā instrumentu, ir iespējams pētnieciskā ceļā izstrādāt pavisam jaunas un līdz šim neīstenotas regulēšanas metodes.$



3.9. att. Trīsfāžu sinhronā servo motora ekvivalentā shēma 1 – servo regulators; 2 – servo motors ar trīs fāžu zvaigznes slēgumu; Ke – servo motora sprieguma konstante; R – servo motora tinuma aktīvā pretestība; L – servo motora tinuma induktivitāte; K_{e(L-L)} – servo motora konstante līnijas spriegumam; R_(L-L) – servo motora līnijas aktīvā pretestība.

3.4. Servo regulatora vadības algoritmu analīze un izstrāde simulācijas modelī

Servo regulators ir unificēta iekārta, kas tiek ražota dažādām nozarēm un dažādu uzdevumu izpildei. Lai būtu iespējams pielāgot servo regulatoru dažādiem uzdevumiem: konstantas slodzes nodrošināšanai, konstanta ātruma uzturēšanai, pozicionēšanai, tad ir nepieciešams izstrādāt servo regulatora vienotu sistēmas uzbūvi, kas dotu iespēju strādāt pie noteiktā uzdevuma ar vienu un to pašu regulatora programmu bez speciāliem pielāgojumiem. Mūsdienu servo regulatoros neatkarīgi no ražotāja ir izstrādāta vienota programmas struktūra, kas sastāv no 3 virknē slēgtām ķēdēm: strāvas jeb slodzes vadības ķēde, ātruma vadības ķēde, pozīcijas vadības ķēde (3.10. att.).



3.10. att. Servo motora regulatora vadības ķēdes pamatstruktūra

 $\begin{array}{l} 1-\text{centrālā vadības kontrollera pozīcijas uzdevums; } 2-\text{signāla apstrādes modulis; } 3-\text{pozīcijas regulēšanas ķēde; } 4-\text{ātruma regulēšanas ķēde; } 5-\text{strāvas regulēšanas ķēde; } 6-\text{IGBT sprieguma regulēšanai; } 7-\text{servo motors; } 8-\text{servo motora pozīcijas elektromehāniskais sensors; } \phi_{uzd}-\text{pagrieziena leņķa uzdevums; } \\ \phi_{as}-\text{pagrieziena leņķa mērījums no sensora; } \\ \omega_{uzd}-\text{rotācijas ātruma uzdevums; } \\ \omega_{as}-\text{rotācijas ātrums no pozīcijas mērīšanas sensora; } \\ I_{uzd}-\text{strāvas uzdevums; } \\ I_{as}-\text{servo motora strāvas mērījumi; } \\ U_{uzd}-\text{sprieguma uzdevums IGBT blokiem; } \\ U_{sm}-\text{izejas spriegums uz servo motoru; } \\ f_{sm}-\text{izejas sprieguma frekvence servo motorā; } \\ \phi_{sm}-\text{servo motora rotora pagrieziena leņķis.} \end{array}$

Regulatoros atsevišķi ražotāji izmanto arī apsteidzošas vadības ķēdes kādā no nepieciešamajiem regulēšanas mezgliem. Taču šajā ziņā nav vienotas sistēmas kurā vietā un

pēc kāda vadības algoritma tiek rēķināts apsteidzošais vadības signāls. Tas ir atkarīgs no katra ražotāja izstrādājuma, kas arī veido atšķirību programmas algoritma ziņā starp iekārtas ražotājiem.

Strāvas regulēšanas ķēdes svarīgākais uzdevums ir izpildīt strāvas uzdevumu izejā, formējot sprieguma impulsa platumu IGBT blokiem. Regulēšanas mezgla atgriezeniskā saite ir servo motora elektriskās strāvas mērījumi katrā motora fāzē (3.11. att.). Regulatora izejas signāls tiek ierobežots, jo katram servo motoram ir atļautās darba strāvas robežas, kuras ir nepieciešams ievērot, lai neradītu servo motora bojājumu (Alnasir Z.A., 2015).

Strāvas uzdevumu formē ātruma regulatora izejā. Strāvas mērījumi tiek veikti katrā fāzē, nodrošinot precīzāku motora vadību. Atsevišķu ražotāju servo regulatoros strāvas regulēšanas ķēdi sauc par griezes momenta regulēšanas ķēdi, tādā veidā norādot tuvāk to, ka tiek regulēts darba griezes moments (ABB, s.a.).



3.11. att. Strāvas regulēšanas blokshēma

 $1 - signālu komparators; 2 - strāvas regulators P vai PI; 3 - signāla ierobežošanas bloks; I_{uzd} - strāvas uzdevums; I - servo motora strāvas mērījumi; <math>\Delta I - strāvas kļūdas signāls; U_{uzd} - sprieguma uzdevums IGBT blokiem, U_{uzd.ier} - ierobežots sprieguma uzdevums IGBT blokiem.$

Strāvas regulatoram izejā tiek formēta servo motora darba sprieguma komanda, izmantojot servo motora sprieguma – strāvas koeficientu. Sprieguma konstanti servo motoram aprēķina pēc formulas (Kollmorgen, 2011):

$$K_{V.A} = \frac{U_{nom}}{I_{nom}},\tag{3.10.}$$

Strāvas regulēšanas ķēde tiešā veidā regulē servo motora spriegumu. Griezes moments servo motoram tiek aprēķināts pēc vienādojuma (ABB, 2011):

$$M_{sm} = \sqrt{3} \frac{U \cdot I \cdot \cos\varphi}{\omega},\tag{3.11.}$$

Servo motora ātruma regulēšanas ķēdes uzdevums ir nodrošināt uzdoto servo motora rotācijas ātrumu. Servo regulators veic servo motora regulēšanas parametru pārbaudi un pieskaņošanu, automātiski iegūstot optimālos regulatora parametrus attiecīgā servo mehānisma regulēšanai. Servo motora rotora pagrieziena leņķis tiek mērīts ar atgriezeniskās saites sensoru. Atkarībā no leņķa izmaiņas ātruma, tiek aprēķināts rotācijas leņķiskais ātrums (3.12. att.).



3.12. att. Ātruma regulēšanas ķēdes uzbūve

 $\begin{array}{l} 1-\text{signālu summators; } 2-\bar{a}\text{truma regulators; } 3-\text{signāla ierobežošanas bloks; } \omega_{uzd}-\bar{a}\text{truma uzdevums, rad s}^{-1}\text{; } \\ \omega-\text{servo motora ātruma mērījums, rad s}^{-1}\text{; } \Delta\omega-\bar{a}\text{truma kļūdas signāls, rad s}^{-1}\text{; } I_{uzd}-\text{strāvas uzdevums, A; } \\ I_{uzd.ier.}\text{-ierobežots strāvas uzdevums, A.} \end{array}$

Ātruma uzdevums tiek apstrādāts, izmantojot vairāku signālu filtrus, tādā veidā nodrošinot stabilāku sistēmas darbību. Filtru iestatījumi var mainīt sistēmas stabilitāti un izejas rezultātu kvalitāti (Ying T., 2017). Pagrieziena leņķa regulēšanas ķēde var tikt izveidota gan ar, gan bez invariantās vadības ķēdes. Tas ir atkarīgs no iekārtas ražotāja. Pozīcijas regulēšanas ķēdē tiek izmantots P vai PI regulators. Kollmorgen ražotajos AKD un Siemens SINAMIC S120 sērijas servo regulatoros tiek izmantots papildināts vadības algoritms, kurā ir iestrādāta invariantā vadības ķēde, kas nodrošina labākus regulēšanas rezultātus salīdzinot ar klasisko P vai PI regulēšanu (3.13. att.).



3.13. att. Kollmorgen AKD servo regulatora pozīcijas regulēšanas blokshēma 1 – ātruma regulators; 2 – signāla ierobežošanas bloks; 3 – invariantās ķēdes aprēķins; 4 – ārējā perturbācija; φ_{uzd} – pagrieziena leņķa uzdevums, °; φ – servo motora pagrieziena leņķa mērījums, °, $\Delta \varphi$ – pagrieziena leņķa kļūdas signāls, °; $\omega_{uzd.}$ – PID regulatora ātruma uzdevums, rad·s⁻¹; $\omega_{uzd.ier.}$ – ierobežots regulatora ātruma uzdevums, rad·s⁻¹; $\omega_{uzd.inv.}$ – invariantās ķēdes regulatora izejas signāls par ātruma uzdevumu, rad·s⁻¹; $\omega_{uzd.kop.}$ – kopējais ātruma uzdevums, rad·s⁻¹.

Kollmorgen AKD sērijas pozīcijas regulēšanas ķēdē tiek izmantotas divu perturbāciju invariantās kompensācijas ķēdes: ātruma profila invariantā ķēde, paātrinājuma profila invariantā ķēde. Tas nozīmē, ka invariantā signāla lielums ir atkarīgs no ievadītajiem servo motora ātruma un paātrinājuma profiliem. Invariantās ķēdes signāli izejā formē ātruma uzdevumu, kas strādā kā kompensācijas signāls PI regulatora izejā formētajam signālam (Kollmorgen, 2011).

Invariantās vadības ķēdes perturbācija VAVES spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmai ir aerodinamisko un mehānisko spēku iedarbe uz spārna konstrukciju. Šos iedarbes spēkus izmantot kā perturbācijas signālu servo regulatorā būtu iespējams, bet tas nozīmē, ka invariantā signāla aprēķina algoritmu nepieciešams ietvert tieši ātruma vai strāvas regulēšanas ķēdē, jo šīs perturbācijas kompensācijas pamatā ir nepieciešams nodrošināt tūlītēju iedarbi uz servo motora slodzes signālu. Servo regulatora ātrdarbīgākā ķēde ir strāvas regulēšanas ķēde.

Lai iegūtu ātrāko un precīzāko servo motora reakciju uz slodzes izmaiņu, invariantās regulēšanas ķēdi nepieciešams ietvert strāvas regulēšanas ķēdē.

3.5. Servo motora simulācijas modeļa izstrāde un verifikācija

Izmantojot iepriekš apskatītos servo motora matemātiskos vienādojumus, iespējams sastādīt MATLAB *Simulink* simulācijas modeli servo motoram un servo regulatora vadības algoritmam. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modelī nepieciešams vienkāršot servo motora modeli. Nav nepieciešams tuvināti modelēt motora spriegumu un strāvu. Motoram simulācijas modelī jābūt aprakstītam kā objektam, kam jāietver mehāniskie un elektriskie parametri, kas nosaka elektriskās un mehāniskās laika konstantes lielumu. Simulācijas modelim *Simulink* vidē jāsastāv no parametru ievades loga, ieejas un izejas portiem, iekšējās simulācijas loģiskās programmas (3.14. att.).



3.14. att. Servo motora simulācijas modeļa apakšsistēmas iekšējā uzbūve

Sastādītā servo motora apakšsistēma sastāv no divām virknē slēgtām zemāka līmeņa apakšsistēmām. Izmantojot atvērtās laika konstanšu aprēķinu formulas apakšsistēmās, tiek modelēts servo motora mehāniskais un elektriskais pārejas process. Motoram ieejā tiek formēts ātruma signāls, kas tiek padots izejā ar laika aizturi atkarībā no servo motora laika konstantēm.

$$W_{sm.e}(s) = \frac{M_{sm}(s)}{U_{sm}(s)} = \frac{K_{sm.e}}{T_{sm.e} \cdot s + 1},$$
 (3.12)

kur $M_{sm}(s)$ – Laplasa transformācija griezes momentam, Nm;

U_{sm}(s) – Laplasa transformācija servo motora spriegumam, V;

 $T_{sm.e}$ – servo motora elektriskā laika konstante, s;

 $K_{sm.e}$ – servo motora pārvades koeficients, $Nm \cdot V^{-1}$.

Elektriskās laika konstantes aprēķins tiek veikts pēc ievadītajiem elektriskajiem parametriem: motora fāzes aktīvās pretestības un induktivitātes. Izveidojot servo motora elektrisko parametru pārejas funkciju atvērtā veidā, kur pārvades koeficients ir vienāds ar 1 un laika konstante tiek aprēķināta pēc ievadītajiem parametriem, izejā tiek formēts izejas signāls pēc elektriskās laika konstantes aiztures (3.15. att.).



Servo motora aktīvā pretestība, Ohm

3.15. att. Servo motora elektriskā interfeisa simulācijas modeļa uzbūve

Servo motoram kā elektromehāniskai iekārtai ir mehāniskā laika konstante atbilstoši rotora inerces momenta lielumam, kas tiek aprēķināta, izmantojot inerces momentu, nominālo griezes momentu un rotācijas ātrumu. Servo motora pārvades fukcija ir sekojoša:

$$W_{sm.m}(s) = \frac{\omega_{sm}(s)}{M_{sm}(s)} = \frac{K_{sm.m}}{T_{sm.m}\cdot s+1},$$
 (3.13)

Mehāniskā laika konstante tiek aprēķināta *Simulink* vidē iekšējā bloka struktūrā atkarībā no ievadītajiem mehāniskajiem servo motora parametriem. Funkcija tiek izveidota atvērta, kas nodrošina laika konstantes pārrēķinu atkarībā no ievadītajiem servo motora parametriem (3.16. att.).





3.16. att. Servo motora mehāniskās interfeisa simulācijas modeļa uzbūve

Izveidojot *Simulink* simulācijas pārbaudes programmu, ieejā servo motoram formējot vadības komandu, tiek mērīts izejas signāls, lai pārbaudītu simulācijas atbilstību pamatnosacījumiem. Tika iestatīti sekojoši servo motora MS4612 parametri: tinumu aktīvā pretestība $R_{(L-L)} = 16 \Omega$; tinumu induktivitāte $L_{(L-L)} = 16 \text{ mH}$; nominālais leņķiskais ātrums $\omega_{\text{sm.nom}} = 31.4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; nominālais griezes moments $M_{\text{sm.nom}} = 1.1 \text{ Nm}$.

Parametru maiņa rada mainīgus izejas rezultātus, kur, palielinot nominālos datus, kas palielina laika konstantes, izejas signāls ir ar lielāku kavējumu. Darot pretēju parametru maiņu, tiek iegūts pretējs efekts, kur izejas signāls ir ar mazāku kavējumu (3.17. att.).



3.17. att. Servo motora MATLAB *Simulink* modeļa pārbaudes rezultāti ω_{uzd} – ātruma signāla uzdevums; T_{nom} – nominālā servomehānisma laika konstanti.

Servo motora simulācijas modelis izpilda izvirzītos mērķus, kuri nodrošina nepieciešamo apakšsistēmas darbību pēc teorijā noteiktajiem kritērijiem. Izstrādātais servo motora modelis var tikt izmantots tālākiem pētījumiem un salīdzināšanai ar servo motora eksperimentos veiktajiem mērījumiem.

3.6. Servo regulatora simulācijas modeļa izstrāde

Pētījumi pierāda, ka servo motora vadības algoritmu simulācija ir sarežģīti izdarāma, pamatojoties uz dažādo ražotāju iekārtu algoritmu atšķirībām, kuras netiek atklātas lietotāju dokumentācijās. Tas nozīmē, ka servo regulatoram šādā simulācijas līmenī tiktu virknē izveidoti divi regulatori, kuri nodrošinātu ātruma un pozīcijas uzdevuma izpildi (Komass T., 2016).

Ātruma regulatora ķēdes uzbūve ir ar tiešo atgriezenisko saiti. Servo motora ātruma uzdevums tiek formēts PID regulatora izejā un atbilstoši ievadītajiem PID parametriem tiek iegūts izejas signāls. Svarīgi ir ņemt vērā, ka PID parametri MATLAB *Simulink* vidē var tikt automātiski parametrizēti atbilstoši regulējamajam objektam (3.18. att.) (Wang H., 2010).



3.18. att. **Ātruma regulēšanas kontūrs ietverot objektu sistēmas modelī** a – ātruma regulēšanas ķēdes blokshēma; b – ātruma regulēšanas ķēdes simulācijas modelis; 1 – ātruma regulators; 2 – regulatora izejas signāla ierobežošanas bloks; 3 – spārna perturbācija; 4 – servo mehānisms.



3.19. att. Ātruma regulatora simulācijas reģistrētie dati pie dažādām objekta inercēm, bet vienādiem PID regulatora parametriem

ω_{uzd} – ātruma signāla uzdevums; I – mehānisma inerces moments; (P = 0.1, I=0.01, D=0.005).

Objektam, ievadot nepieciešamos inerces momenta parametrus, tiek veikta ātruma regulēšanas kontūra PID pieskaņošana. Simulācijas rezultāti parāda, ka, samainot objekta inerces momentu pie nemainīgiem PID parametriem, sistēma var kļūt nestabila un regulējamā vērtība netiek izpildīta ar nepieciešamo kvalitāti un ātrumu. Tas nozīme to, ka svarīgi ir panākt sistēmas mehānisma maz mainīgu dinamisko slodzi, taču tas nav izdarāms ar ārējo aerodinamisko spēku laikā mainīgo perturbāciju (3.19. att.).

Papildinot servo regulatora ātruma regulēšanas simulācijas modeli ar pozīcijas regulēšanas ķēdi, simulācijas modelī nepieciešams izmantot divus regulatorus, kur otrs regulators atbild par pozīcijas regulēšanu. Pozīcijas regulatora algoritms ir maināms no P uz PI atkarībā no tehnoloģiskā izpildījuma. Pozīcijas sensora signāls tiek saņemts no ātruma integratora, kura izejas signāls ir pagrieziena leņķis. Pārbaudot simulācijas modeli, ieejā tika padots soļa veida pozīcijas uzdevuma signāls ar *Simulink* bloku "*Step*". Mērītie signāli tika reģistrēti blokā "*Scope*" (3.20. att.).



3.20. att. Pozīcijas regulatora simulācijas modelis Simulink vidē ar P = 20

Balstoties uz jau iepriekš apskatītu informāciju par dažādu ražotāju izstrādātajiem algoritmiem, tad pozīcijas regulēšanas bloks ir P tipa ar proporcionālo pastiprināšanas koeficientu, tādā veidā nodrošinot līdzvērtīgu darbību reālās iekārtās. Simulācijas rezultāti parāda, ka simulācijas modulis regulē uzdoto pozīcijas uzdevumu un var tikt parametrizēts nepieciešamajam regulēšanas objektam. Simulācijas rezultāti rāda, ka ātruma un pozīcijas regulēšanas ķēdes ir nepieciešams ieregulēt, ievadot precīzus regulēšanas objekta parametrus, lai simulācijas modelī būtu atbilstoši inerces momenti (Komass T., 2016) (3.21. att.).



3.21. att. Pozīcijas uzdevuma izpilde ar dažādām objekta inercēm φ_{uzd} – pozīcijas signāla uzdevums, °; I – mehānisma inerces moments, kg·m².

Servo regulatoriem regulēšanas ķēdes tiek parametrizētas konkrētā secībā (Siemens, 2012). Arī simulācijas modelim šī secība ir jāsaglabā, tādā veidā nodrošinot efektīvāko parametrizēšanas rezultātu. Pirmā tiek parametrizēta strāvas regulēšanas ķēde, pēc tam ātruma regulēšanas ķēde un beidzamā tiek parametrizēta pozīcijas izpildes ķēde. To nepieciešams ievērot strukturāli, jo neatbilstoša parametru iestatīšana kādā no zemākajām ķēdēm var ietekmēt augstāk esošo vadības ķēžu rezultātus. Mainot kādas zemākās ķēdes parametrus, jāveic parametru pārbaude arī augstāk esošajās kēdēs.

3.7. VAVES spārna ģeometrisko parametru analīze

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmā mehāniskā struktūra sastāv no servomehānisma un spārna konstrukcijas. Servomehānismu iespējams izmantot ar vai bez reduktora, taču lielāko ietekmi uz servo motoru rada spārna konstrukcija un aerodinamisko spēku iedarbe. Uz servo motoru iedarbojas sekojoši slodzes spēki: centrbēdzes spēks, aerodinamiskais vēja radītais spēks (Rakesh R., 2014).

Centrbēdzes spēks rodas, ja spārna konstrukcijā rotācijas centrs spārnam nesakrīt ar spārna masas centru. Tādā gadījumā var rasties centrbēdzes spēks no divām rotācijas kustībām: rotora un spārna. Izmantojot projektēšanas datorprogrammas, var projektēt spārna konstrukciju tā, lai spārna masas un rotācijas centri sakristu. Tādā veidā nodrošinot centrbēdzes spēku vienādu ar 0 (3.22. att.).



3.22 att. VAVES NACA0018 profila spārna konstrukcijas šķērsgriezums

1 – spārna rotācijas ass centrs; 2 – rotācijas centra attālums no spārna priekšgala; 3 – rotācijas centra attālums no spārna masas centra; 4 – spārna masas centrs; 5 – spārna horda; 6 – spārna aploce.

Ja spārna masas centra attālums no rotācijas ass centra ir vienāds ar 0, tad centrbēdzes spēks, kas iedarbojas uz spārnu, ir vienāds ar 0 un nerada pretestības spēku spārnu regulēšanas sistēmai. Centrbēdzes spēku aprēķina pēc formulas:

$$F_{cb} = \frac{m_{sp} v_{mc}^2}{r_{sp}},$$
 (3.14.)

kur F_{cb} – spārna centrbēdzes spēks, N;

m_{sp} – spārna masa, kg;

 v_{mc} – masas centra lineārais ātrums, m·s⁻¹;

 r_{sp} — rotācijas centra attālums no masas centra, m.

Inerces momenta aprēķins kompleksās sistēmās ir komplicēts. Veicot spārna konstrukcijas modeļa izveidi, tiek iegūta inerces momenta skaitliskā vērtība, ko sniedz datorprogramma, izmantojot matemātiskos aprēķinus. Vienkāršots inerces momenta aprēķins var būt neprecīzs un tas var ietekmēt modelēšanas sistēmas izejas rezultātus, taču tas dod iespēju iegūt tuvinātus datus par spārna inerces momentu (Bencherif M., 2014):

$$I_{sp} = m_{sp} r_{mc}^{2}, (3.15.)$$

kur I_{sp} – spārna kopējais inerces moments, kg·m²;

 m_{sp} – spārna masa, kg;

 $r_{mc} \qquad - sp\bar{a}rna \ rot\bar{a}cijas \ ass \ r\bar{a}diuss, \ m.$

Spārnu regulēšanas sistēmā bez centrbēdzes spēka un inerces darbojas arī aerodinamiskais spēks. Aerodinamiskā spēka lielums ir analītiski aprēķināms, bet tā centra atrašanās punkts nav nosakāms analītiski, kas nozīmē, to, ka ir sarežģīti veikt jebkādus aprēķinus pēc konkrētām metodēm. Literatūrā apgalvo, ka simetriskam spārna profilam aerodinamiskā spēka centrs nav mainīgs, tas ir konstants, bet tā attālums no masas vai rotācijas centra ir atkarīgs no profila veida. Pašreizējie pētījumi liecina, ka aerodinamiskais centrs ir robežas no ¼ spārna hordas līdz ½ spārna hordas atkarībā no spārna profila veida (Mehmood N., 2012). Tas apgrūtina precīzus regulēšanas piedziņas jaudas aprēķinus, taču, pamatojoties uz šo informāciju, ja spārns netiek regulēts ārpus nominālajiem pagrieziena leņķiem, tad aerodinamiskais spēks neiedarbojas uz spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu (Chaitep S., 2011).

3.8. Spārna optimālā iestatīšanas leņķa pētījumi

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas mērķis ir iegūt augstāku VES lietderības koeficientu. Tas nozīmē, ka noteiktā rotora pagriezienā ir katram spārnam savs optimālais iestatīšanas leņķis. Izpildot šo nosacījumu, iespējams iegūt labākus VES energoefektivitātes rādītājus, salīdzinot ar fiksētu spārnu iestatīšanas leņķi. Apskatītajos pētījumos nav norādīts, kādi ir optimālie spārna iestatīšanas leņķi kā funkcija no rotora pagrieziena leņķa pret vēja plūsmu.

Padziļinot pētījumu par spārna iestatīšanas leņķa analītisko aprēķinu, ņemot vērā reālus VAVES darba parametrus, tiek iegūta optimālā iestatīšanas leņķa līkne, kura kalpo kā izejas informācija spārnu regulēšanas sistēmas uzdevumam.

Programmas vide, kur aprēķināt spārnu iestatīšanas leņķa kompensāciju, pret spārna fiksētu stāvokli ir MATLAB *Simulink*, izmantojot jau izstrādāto rotora aerodinamisko spēku aprēķinu apakšsistēmu ar vektoru aprēķinu metodi. Pie noteiktiem VAVES ģeometriskajiem parametriem iespējams veikt spārna relatīvā appūtes leņķa korekciju ar iestatīšanas leņķa izmaiņu:

$$\beta = \alpha + \varphi, \tag{3.16.}$$

kur β – spārna relatīvais appūtes leņķis, °;

- α spārna relatīvais iestatīšanas leņķis, °;
- φ spārna iestatīšanas leņķa korekcijas leņķis, °.

VAVES fiksēta spārna gadījumā spārna relatīvais iestatīšanas leņķis α ir kā funkcija no rotora pagrieziena leņķa θ . Spārnam esot nulles punktā, kad rotora pagrieziena leņķis $\theta = 0^{\circ}$, relatīvais iestatīšanas leņķis $\alpha = 0^{\circ}$. Spārna aerodinamisko spēku izmaiņu ir iespējams iegūt, veicot spārna iestatīšanas leņķa korekciju par noteiktu leņķi φ . Rotoram, uzsākot rotāciju, notiek relatīvā iestatīšanas leņķa izmaiņa un iestatīšanas leņķa korekcijas leņķa izmaiņa ir jāveic, lai iegūtu efektīvāko spārna appūtes leņķi (3.23. att.).



3.23. att. VAVES spārna leņķu izvietojums

1 – VAVES spārna atbalsts; 2 – VAVES spārns; 3 – debespušu rādītājs; A – VAVES spārns nulles punktā $\theta = 0^{\circ}$; B – VAVES spārns pie rotora pagrieziena leņķa $\theta \neq 0^{\circ}$; β – spārna relatīvais appūtes leņķis, °; α – spārna relatīvais iestatīšanas leņķis, °; ϕ – spārna iestatīšanas leņķa korekcijas, °.

Izveidotā *Simulink* apakšsistēma griezes momenta aprēķināšanai, izmantojot spārna korekcijas leņķi, dod iespēju analītiski aprēķināt optimālo spārna appūtes leņķi. Lai iegūstamie rezultāti būtu tālāk apstrādājami un analizējami, tie tiek sakārtoti noteiktā struktūrā. Izstrādātas divas jaunas programmas, kas nodrošina datu apstrādi un aprēķinu. Datu apstrādes programma sastādīta MATLAB *Editor* vidē, kurā, izmantojot noteikto programmas valodu, sastādīts algoritms, kas izpilda nepieciešamās darbības, ieejā saņemot VAVES parametrus un izejā grafiski parādot optimālos spārna regulēšanas leņķus. Datu aprēķinu programma sastādīta MATLAB *Simulink* vidē, izmantojot aerodinamisko spēku vektoru aprēķinu metodi, un papildināta ar ievadāmā spārna iestatīšanas leņķa korekcijas simulāciju (11. pielikums).

Programmas cikls veic aprēķinu programmas izsaukšanu, ievadot nepieciešamos ieejas parametrus. Katrā simulācijas izsaukšanas laikā simulē spārna iestatīšanas leņķa korekciju no - 90 ° līdz + 90 ° ar soli 0.1 °. Simulācijas aprēķins no *Editor* programmas tiek izsaukts, simulējot rotora pagriešanu 360 reizes pa 1 °. Pēc viena cikla aprēķina datu masīvs tiek apstrādāts un atrasts lielākais sasniegtais griezes moments kāds ir bijis simulācijas laikā. Pie maksimālā griezes momenta tiek ierakstīti spārna regulēšanas leņķi. Noslēdzot aprēķinu ciklu izejā, tiek iegūta tabula datu masīva formā ar 360 ierakstiem, kur kolonnās norādīts rotora pagrieziena leņķis, spārna darba leņķis, kā arī atrastais maksimālais griezes moments (3.24. att.).



3.24. att. Lietderīgākā spārnu iestatīšanas leņķa aprēķinu programmas struktūra
1 - lietderīgā spārnu iestatīšanas leņķa dati; 2 - optimālā iestatīšanas leņķa meklēšanas algoritms;
3 - rotora pagrieziena leņķa iestatījuma algoritms; 4 - datu aprēķinu un simulācijas rezultātu apstrādes modulis;
5 - optimālā spārnu iestatīšanas leņķa aprēķina programma; 6 - spārna griezes momenta aprēķina simulācijas modelis;
7 - spārnu iestatīšanas leņķa modelēšana; 8 - spārna griezes modeļa aprēķins pēc ievadītajiem datiem;
9 - spārna griezes momenta aprēķinu ieejas parametru kopa; 10 - optimālo datu grafiskā apstrāde.

Nav pieejama informācija, kā veikt optimālā leņķa aprēķinu un kā noteikt pie kāda spārna iestatīšanas leņķa var sasniegt labākos griezes momenta rādītājus. Izveidotā aprēķinu programma ir izmantojama un dod iespēju veikt lietderīgākā iestatīšanas leņķa meklēšanu pēc vairākiem kritērijiem. Veicot aprēķinu modeļa pārbaudi, tika izvēlēti sekojoši VAVES iestatījumi:

- 1. ātrgaitas koeficients $\lambda = 2.0, 2.5, 3.0;$
- 2. spārna horda c = 1 m;
- 3. \bar{a} ra gaisa temperat \bar{u} ra = 20 °C;
- 4. vēja ātrums v = $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- 5. spārna garums l = 10 m;
- 6. rotora pagrieziena leņķis $\theta = 0^{\circ}..360^{\circ}$;
- 7. vēja virziena leņķis $\phi = 0^{\circ}$.
- 8. iestatīšanas leņķa korekcijas vērtību diapazons $\varphi = -90^{\circ}...+90^{\circ}$.

Izstrādātā simulācijas modeļa rezultāti apliecina, ka VAVES, strādājot ar optimālo ātrgaitas koeficientu $\lambda = 3$, spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas sistēma izejas griezes momentu uzlabo minimālās robežās, līdz ar to radot mazu papildus enerģijas ieguvumu. Spārna leņķu simulācijas dati parāda, ka spārnu relatīvais appūtes leņķis pie optimālā spārnu iestatīšanas korekcijas leņķa φ , rotoram griežoties no 0 ° līdz 180 °, ir 16 °, taču rotora pagrieziena robežās no 180 ° līdz 360 ° relatīvais appūtes leņķis ir -16 °. Optimālajam spārnu iestatīšanas korekcijas leņķim φ ir cieša korelācija ar rotora pagrieziena leņķi un VAVES darba ātrgaitas koeficientu (3.5. att.).



3.25 att. Griezes momenta raksturlīknes rezultāti pie $\lambda = 3$ M_a – griezes momenta līkne bez spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas; M_{a.opt.} – griezes momenta līkne ar optimizētu spārnu iestatīšanas leņķi; φ – optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcija; α – spārna relatīvais iestatīšanas leņķis bez leņķa korekcijas.

Izmantojot simulācijā aprēķinātos griezes momenta datus, VAVES, strādājot tādā režīmā, 10 min tiek saražota 7.59 kWh elektroenerģijas ar uzlaboto griezes momenta raksturlīkni un 6.64 kWh ar neuzlabotu griezes momenta raksturlīkni. Kopējā spārnu leņķa appūtes leņķa efektivitātes palielināšana ir uzlabojusi izejas saražoto elektroenerģiju par 14.4 %.

Simulācijas modeļa pārbaude pie ātrgaitas koeficienta $\lambda = 2.5$ parāda, ka spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas sistēmas ieguvums pie šāda ātrgaitas koeficienta ir palielinājies salīdzinot ar $\lambda = 3$. Spārna relatīvais appūtes leņķis neatkarīgi no ātrgaitas koeficienta izmaiņas ir palicis nemainīgs. Taču optimālajai iestatīšanas leņķa korekcijai raksturlīkne ir izmainījusies ar ekstrēma punktu no 3.5° līdz 8° . Tas izskaidrojams ar to, ka pie zemāka ātrgaitas koeficienta palielinās relatīvais spārna iestatīšanas leņķis α . Leņķa α darba diapazons ir pieaudzis no 19° un -19° līdz 23.5° un -23.5° (3.26. att.).



3.26. att. Griezes momenta raksturlīknes rezultāti pie $\lambda = 2.5$

 M_a – griezes momenta līkne bez spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas; $M_{a.opt.}$ – griezes momenta līkne ar optimizētu spārnu iestatīšanas leņķi; φ – optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcija; α – spārna relatīvais iestatīšanas leņķis bez leņķa korekcijas; 5 – optimizētais spārna appūtes leņķis.

Pārbaudot saražotās enerģijas daudzuma salīdzinājumu, tiek saražots 6.54 kWh ar uzlaboto griezes momenta raksturlīkni un 5.09 kWh ar neuzlabotu griezes momenta raksturlīkni. Rezultātā spārnu appūtes leņķa effektivitātes paaugstināšana ir iedevusi papildus enerģijas ieguvumu par 28.4 %.

VAVES rotora griezes moments pie ātrgaitas koeficienta $\lambda = 2$ ir ar lielu griezes momenta raksturlīknes nesimetriju. Simulācijas rezultāti parāda, ka spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas sistēma var veikt lielus griezes momenta uzlabojumus, rotoram darbojoties ar pazeminātu ātrgaitas koeficientu. Spārna leņķu simulācijas dati rāda, ka arī pie ātrgaitas koeficienta $\lambda = 2$ optimālākais spārna relatīvais appūtes leņķis ir 16 ° pie $\theta = 0$ °..180 ° un -16 ° pie $\theta = 180$ °..360 ° (3.27. att.).



3.27. att. **Optimālā griezes momenta raksturlīknes rezultāti pie** $\lambda = 2.0$ M_a – griezes momenta līkne bez spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas; M_{a.opt.} – griezes momenta līkne ar optimizētu spārnu iestatīšanas leņķi; φ – optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcija; α – spārna relatīvais iestatīšanas leņķis bez leņķa korekcijas; β – optimizētais spārna appūtes leņķis.

Pie $\lambda = 2.0$ tiek saražota 5.47 kWh elektroenerģijas ar uzlaboto griezes momenta raksturlīkni un 2.75 kWh ar neuzlabotu griezes momenta raksturlīkni. Spārnu appūtes leņķa efektivitātes paaugstināšana ir devusi enerģijas papildus ieguvumu par 98.9 %.



3.28. att. Spārna relatīvā iestatīšanas leņķa α raksturlīknes atkarībā no VAVES ātrgaitas koeficienta

Apskatot tuvāk simulācijas modeļa izejas datus par spārna relatīvo iestatīšanas leņķi α , kas parāda spārna relatīvo iestatīšanas leņķa funkciju, spārnam esot nofiksētam. Pie VAVES optimālā ātrgaitas koeficienta $\lambda_{opt} = 3 \alpha$ ir robežās no - 20 ° līdz + 20 °. Samazinoties ātrgaitas koeficientam uz 2.5, leņķis α ir robežās no - 25 ° līdz + 25 °. Pie rotora ātrgaitas koeficienta $\lambda = 2$ leņķis α ir robežās no - 30 ° līdz + 30 °. Leņķa α līkne no 0 ° līdz 180 ° ir apgriezti simetriska līknes posmam no 180 ° līdz 360 ° (3.28. att.).

Mērījumi parāda, ka spārnu relatīvais iestatīšanas leņķis α cieši korelē ar rotora ātrgaitas koeficientu. Uzlabotajai spārnu iestatīšanas leņķa korekcijai ir cieša korelācija ar spārna relatīvo iestatīšanas leņķi α . Simulācijas rezultāti rāda, ka, samazinoties rotora ātrgaitas koeficientam, palielinās optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcija φ . Optimālā spārna iestatīšanas leņķa korekcijas līknes posms no 0 līdz 180 ° ir apgriezti simetrisks līknes posmam no 180 ° līdz 360 °. Tas ir izskaidrojams ar to, ka relatīvais iestatīšanas leņķis maina vērtību plakni no pirmā Dekarta kvadrantu uz ceturto Dekarta kvadrantu (3.29. att.).



3.29. att. Uzlaboto spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas φ raksturlīknes atkarībā no rotora ātrgaitas koeficienta

Simulācijas sistēmas izejas rezultāti optimālajam spārna appūtes leņķim rāda, ka neatkarīgi no rotora pagrieziena leņķa, optimālais spārna appūtes leņķis ir 16 ° un -16 ° (3.30. att.). Šāds optimālā appūtes leņķa raksturs ir izskaidrojams ar to, ka pie leņķa 16 ° tiek iegūta labākā CL un CD attiecība, kur CL rada pietiekami lielu un CD rada pietiekami mazu aerodinamisko spēku. Aviācijas nozarē tiek strādāts ar lielāko CL un CD attiecību, kas nodrošina lidojoša objekta labāko lidošanas attālumu pie vienāda pretestības spēka. Vēja enerģētikas nozarē nav konkrēti izpētīts, vai optimālākā darbība būtu pie lielākā griezes momenta vai arī pie lielākās CL un CD attiecības. Pētnieciski tikai eksperimentālā ceļā ir iespējams noskaidrot labākos darba nosacījumus.



3.30. att. Uzlabotā spārnu appūtes leņķa β raksturlīknes atkarībā no rotora ātrgaitas koeficienta

Simulācijas sistēmas izejas rezultāti pierāda to, ka pētījuma mērķis ir sasniegts un ir iegūts uzlabotais spārnu iestatīšanas korekcijas leņķis kā funkcija no rotora pagrieziena leņķa $\varphi = f(\theta)$. Iegūtie rezultāti atspoguļo VAVES parametru iekšējo korelāciju. Izmantojot simulācijas rezultātus, tiek veikta vadības sistēmas un servomehānisma ātrdarbības analīze pie reālas VAVES darba apstākļiem.

3.9. VAVES Spārnu regulēšanas sistēmas simulācijas modeļa izstrāde

VAVES spārnu regulēšanas sistēma ir modulāra, kur katrs moduļa mezgls atbild par savu spārnu. Sistēmas struktūra satur trīs atsevišķus spārnu regulēšanas mezglus, kur katrā mezglā ietilpst savs regulēšanas bloks, servo motors ar spārnu. Uz visu sistēmu ir viens kopējs iestatīšanas leņķa uzdevuma aprēķinu bloks. Ar centrālās vadības sistēmas bloka palīdzību tiek sekots līdzi visiem centrālajiem procesiem, un atkarībā no rotora pagrieziena leņķa, vēja virziena un rotora darba stāvokļa, tiek aprēķināts un noformēts izejas signāls (3.31. att.).



3.31. att. VAVES spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modelis

Apskatot simulācijas bloka "Lookup Table" pielietojumu, ir nepieciešams pirms simulācijas sastādīt datu masīvu. Tas nozīmē, ka ir jāveic optimālā iestatīšanas leņķa korekcijas aprēķins pie dažādiem ātrgaitas koeficientiem. Tālāk šie dati ar vienādiem masīva izmēriem jāievieto vienā kopējā masīvā, kas tiek ievadīts MATLAB *Simulink* blokā "Lookup table" (3.32. att.).



3.32. att. Optimālā iestatīšanas lenka korekcijas sistēmas uzdevuma datu tabula φ – spārnu iestatīšanas leņķa korekcija; °; θ – rotora pagrieziena leņķis; °; λ – ātrgaitas koeficients.

Aprēķinātie un ievadītie dati tiek atlasīti pēc ātrgaitas koeficienta un rotora pagrieziena leņķa, izmantojot lineārās interpolācijas metodi:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{\theta_1 + \theta_0}{\varphi_1 + \varphi_0} (\theta + \theta_0), \qquad (3.17)$$

 spārna iestatīšanas leņķa korekcija, °; kur φ θ

- rotora pagrieziena lenkis, °.

Datu masīva izmantošana ar iepriekš aprēķinātiem datiem ir ērts lietošanas veids, taču ne visām industriālajām vadības sistēmām iespējams meklēt datus datu masīvā, izmantojot interpolācijas metodi. Tādā gadījumā ērtāks risinājums ir tiešs korekcijas sistēmas uzdevuma aprēkins.

Iepriekš apskatītais pētījums rāda, ka optimālais relatīvais appūtes leņķis spārnam NACA0018 ir 16°. Izmantojot aerodinamisko spēku vektoru aprēķinu apakšsistēmu, ir iespējams apgrieztā secībā aprēkināt iestatīšanas lenka korekciju. Šāds aprēkinu modelis atļauj izveidot uz simulācijas bāzētu vadības sistēmas programmu, kuru var izpildīt industriālie PLK.

Izstrādātā simulācijas sistēma sastāv no divām apakšsistēmām, kur viena veic relatīvā iestatīšanas leņķa aprēķinu, bet otra nosaka spārna optimālo appūtes leņķi pie noteikta rotora pagrieziena leņķa. Šī simulācijas sistēma ir unikāla ar to, ka, izmantojot iepriekš veiktos pētījumus, kas pierāda, ka simetriskam spārna profilam ir viens noteikts efektīvais appūtes leņķis, dod iespēju vienkāršu matemātisku aprēķinu veidā noteikt optimālo spārna iestatīšanas lenka korekciju φ (3.33. att.).



3.33. att. Iestatīšanas leņķa aprēķina simulācijas blokshēma

Spārnam ar profilu NACA0018 spārna optimālais appūtes leņķis ir 16 ° pie rotora pagrieziena leņķa 0 °..180 ° un - 16 ° pie rotora pagrieziena leņķa 181 ° .. 360 °. Simulācijas sistēma veic rotora leņķa pārbaudi un atkarībā no leņķa lieluma iestata spārna optimālā appūtes leņķa vērtību (3.34. att.).



3.34. att. Optimālā appūtes leņķa aprēķina simulācijas blokshēma

Izstrādātās simulācijas sistēmas pārbaudi veic ar diviem dažādiem ieejas signāliem. Pirmā simulācija ar rotora leņķisko ātrumu $\omega = 4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, otrā ar $\omega = 6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$. Abos simulācijas pārbaudes gadījumos redzams, ka sistēma nodrošina izejā noteiktu optimālo appūtes leņķi β , mainot uzdoto spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas ϕ signālu, atkarībā no spārna relatīvā iestatīšanas leņķa α lieluma. Samazinoties rotora ātrgaitas koeficientam, palielinās α robežvērtības, tādā veidā palielinot ϕ robežvērtības un nodrošinot konstantu uzdoto β (3.35. att.).



3.35. att. **Optimālā appūtes leņķa aprēķina sistēmas simulācijas rezultāti** a – simulācijas rezultāti ar rotora rotācijas ātrumu 4 rad·s⁻¹ un $\lambda = 2.5$; b – simulācijas rezultāti ar rotora rotācijas ātrumu 6 rad·s⁻¹ un $\lambda = 3.0$; φ – optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcija, °; α – spārna relatīvais iestatīšanas leņķis bez leņķa korekcijas, °; β – optimizētais spārna appūtes leņķis, °.

Papildinot servomehānisma simulācijas modeli ar uzdevuma signāla aprēķinu un izpildmehānisma simulāciju, tika izveidots jauns simulācijas modelis. Simulācijas modeļa pārbaude tika veikta pie dažādiem vēja ātrumiem. Simulācijas modelī tika iestatīti sekojoši servo mehānisma parametri: servo motora nominālais rotācijas ātrums – 3000 min⁻¹; servo motora nominālā sprieguma frekvence – 200 Hz; motora tinumu aktīvā pretestība – 16 Ω ; tinumu induktivitāte – 0.0033 H; servo motora inerces moments – 6.1 10⁻⁵ kg·m²; motora nominālais griezes moments – 3.3 Nm; spārna un mehāniskā pārvada inerces moments - 1.1 10⁻⁴ kg·m²; servo mehānisma reduktora pārnesuma skaitlis – 1 (3.36. att.).



3.36. att. Servo mehānisma pārbaudes simulācijas modelis ar aprēķinātu spārna iestatīšanas leņķa raksturlīknes signālu

Iestatīti sekojoši simulācijas sistēmas ieejas signāli: vēja ātrums – 5, 8, 12 m \cdot s⁻¹; rotora ātrgaitas koeficients - 3; rotora rādiuss – 5 m. Simulācijas sistēmā tika reģistrēts uzdotais iestatīšanas leņķis un nomērītais iestatīšanas leņķis ar mērķi pārbaudīt, vai ir novērojama leņķa uzdevuma izpildes aizture un, ja tāda ir, tad cik liela.

Simulācijas rezultāti ataino, ka starp uzdoto un izpildīto spārna pagrieziena leņķi ir novērojama izpildes kļūda. Gadījumos, kad uzdotā pagrieziena leņķa izmaiņa ir maza, tad kļūda ir mērāma mazāk par 5 % no uzdotās vērtības. Gadījumos, kad uzdotā leņķa izmaiņa ir liela, tad kļūda starp uzdoto un izpildīto ir lielāka par 80 % no uzdotā. Palielinoties rotora rotācijas ātrumam, kļūda palielinās no 15 % līdz pat 150 % (3.37. att.).



3.37. att. Spārna iestatīšanas leņķa korekcijas servo mehānisma uzdevuma izpildes simulācijas rezultāti

a – simulācijas rezultāti ar rotora rotācijas ātrumu 4 rad·s⁻¹; b – simulācijas rezultāti ar rotora rotācijas ātrumu 6 rad·s⁻¹; ϕ_{uzd} – optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas uzdevums, °; ϕ_{as} – optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas uzdevums, °.

Šāda uzdevuma izpildes kļūda samazina rotora lietderības koeficientu. Izmantojot simulācijas modeli, var atrast risinājumu, kā panākt uzdotā un izpildītā pagrieziena leņķa labu sakritību. Šo problēmu var risināt, apsteidzoši pieskaitot rotora pagrieziena leņķim noteiktu korekcijas skaitli kā funkciju no rotora rotācijas ātruma:

$$\theta' = \theta + z(\omega), \tag{3.16.}$$

kur θ' – rotora pagrieziena leņķis ar pieskaitīto korekcijas skaitli, °;

z – korekcijas skaitlis kā funkcija no rotora rotācijas ātruma.

Simulācijas sistēmas pārbaude, izmantojot korekcijas skaitli z, rāda, ka uzdevums tiek izpildīts. Izmantojot aprēķinu, tiek uzlabota optimālā iestatīšanas leņķa izpilde. Tiek paveikta precīza uzdevuma izpilde visā rotora pagrieziena leņķa diapazonā, kā arī kļūda ir mazāka par 5 %. Izmantojot šo pētījumos atklāto risinājumu, spārna iestatīšanas leņķis tiek nodrošināts nepieciešamajā kvalitātē (3.38. att.).


3.38. att. Spārna iestatīšanas leņķa korekcijas servo mehānisma uzdevuma izpildes simulācijas rezultāti

a – simulācijas rezultāti ar rotora rotācijas ātrumu 4 rad·s⁻¹; b – simulācijas rezultāti ar rotora rotācijas ātrumu 6 rad·s⁻¹; ϕ_{uzd} – optimālā spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas uzdevums,°; ϕ_{as} – spārnu iestatīšanas leņķa atgriezeniskā saite, °.

Simulācijas pētījumi rāda, ka korekcijas skaitlis ir lineāra funkcija no rotora rotācijas ātruma. Palielinoties rotora rotācijas ātrumam, korekcijas skaitļa vērtība palielinās. Pie vēja ātruma 6 m·s⁻¹ rotora rotācijas ātrums ir 7.2 rad·s⁻¹. Šādā gadījumā simulācijas pētījumos iegūtais korekcijas skaitlis ir 1.7°. Pie vēja ātruma 12 m·s⁻¹ rotora rotācijas ātrums ir 14.4 rad·s⁻¹ un atrastais korekcijas skaitlis ir 2.9°. Pēc simulācijas rezultātiem iegūtas korekcijas skaitļa matemātiskās izteiksmes kā funkcijas no rotora rotācijas ātruma un vēja ātruma:

$$z(\omega_{rot}) = -1.2 \cdot \omega_{rot} + 2.9;$$
 (3.18)

$$z(v) = -0.2 \cdot v + 2.9, \qquad (3.19)$$

kur ω_{rot} – rotora rotācijas ātrums, rad·s⁻¹; v – vēja ātrums, m·s⁻¹.

Ar aprēķināto funkciju palīdzību tiek atrisināts svarīgs uzdevums, kas nodrošinātu atbilstošu spārna iestatīšanas leņķa korekcijas uzdevuma izpildi reālā automātiskās regulēšanas sistēmā.

PētāmāsVAVES rotors sastāv no trim spārniem. Izveidotais simulācijas modelis viena spārna iestatīšanas leņķa korekcijai ir izmantojams vairāku spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas

sistēmas simulācijai. Vadības sistēmas centrālajā modelī nepieciešams ievadīt spārnu nobīdes parametrus, lai pēc rotora pagrieziena leņķa tiktu precīzi uzrādīts katra spārna stāvoklis, pēc kā tiek aprēķināts iestatīšanas leņķa korekcijas uzdevums (12. pielikums). Sastādītās VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas rezultāti parāda katra spārna darbību, izmantojot atsevišķu autonomu uzdevuma izpildi piedziņas vadībai un uzdotā leņķa regulēšanas leņķis katram spārnam nobīdīts par 120°, tieši tik daudz, cik ir mehāniskā nobīde starp spārniem rotorā vienam no otra (3.39. att.).



3.39. att. Spārna iestatīšanas leņķa korekcijas servo mehānisma uzdevuma izpildes simulācijas rezultāti

 $\phi_{as.1} - spārna iestatīšanas leņķis pirmajam rotora spārnam; <math>\phi_{as.2} - spārna iestatīšanas leņķis otrajam rotora spārnam; <math>\phi_{as.3} - spārna iestatīšanas leņķis trešajam rotora spārnam.$

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modelis dod iespēju veikt dažādus tālākus eksperimentus, ar kuru palīdzību ir iespējams veikt sistēmas darbības kvalitātes analīzi pie dažādiem nepārbaudītiem nosacījumiem (13. pielikums). Ar simulācijas modeli var pārbaudīt gan visas VES, gan atsevišķa tās spārna regulēšanas sistēmas reakciju uz dažādu perturbāciju iedarbi.

3.10. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas servo sistēmas simulācijas modeļa validācija

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas spēja veikt ātru leņķa regulēšanu tiek balstīta uz precīzu un atbilstošu servo mehānisma ieregulēšanu. Lai izprastu servo mehānisma ieregulēšanas procesa ietekmi un izpildāmā uzdevuma rezultātu, ir nepieciešams padziļināti apskatīt servo mehānisma ieregulēšanas procesu un tā nianses. Tika izveidots jauns eksperiments ar mērķi izprast servo mehānisma ieregulēšanas kritēriju un ieregulēšanas precizitātes ietekmi uz izpildāmā uzdevuma realizāciju.

Eksperimenta realizācijai tika izvēlētas nepieciešamās iekārtas. Primārais iekārtu uzdevums ir veikt servo motora regulēšanu, formēt nepieciešamo servo regulatora uzdevumu, nolasīt servo motora pagrieziena leņķi, veikt datu reģistrāciju un to statistisko, un grafisko apstrādi (3.1.tabula.).

3.1. tabula

N.p.k.	Iekārta	Modelis	Ražotājs
1	Reduktors	CHM 040 71B5 7.5	Chiaravalli
2	Servo motors	MS4612N4008E43F10	ABB Oy
3	Servo regulators	ACSM1	ABB Oy
4	Enkodera Modulis	FEN-21	ABB Oy
N.p.k.	Iekārta	Modelis	Ražotājs
5	Signāla ģenerators	NI-6008	National Instruments
6	Simulācijas dators	HP Nx6253	HP
7	Operētājsistēma	Windows 7, SP2	Microsoft
8	Programmatūra	Matlab R2014a, Simulink	Mathworks
9	Datu reģistrēšana	Drive Studio 1.6	ABB Oy
10	Signāla ģeneratora ieregulēšanas programmatūra	NI SignalExpress 2013	Nationl Instruments

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas eksperimentālā stenda iekārtas

Datu komutācijai starp datoru un servo regulatoru un signālu ģeneratoru tiek izmantots RS232 apraides interfeiss ar datu apmaiņas ātrumu 9600 Mbit·s⁻¹, tādā veidā dodot iespēju strādāt ar MATLAB *Simulink* izstrādāto simulācijas programmu uzdevuma signāla formēšanai. Eksperimentālie mērījumi tiek nolasīti no iekšējiem servo regulatora datiem ar nolasīšanas takti 1 ms.

Servo regulatora analīzei nepieciešams reģistrēt servo regulatora uzdevumu, servo motora pagrieziena leņķi γ_{sm} , rotācijas ātrumu n_{sm}, servo motora griezes momentu M_{sm}, servo motora strāvu I_{sm}. Servo regulatoram no *Simulink* formētais signāls caur signālu ģeneratoru tiek pārveidots uz sprieguma signālu ar sprieguma līmeni no 0 līdz 5 V. Sprieguma signāls tiek pieslēgts servo regulatora analogā signāla ieejas portā (3.40. att.).



3.40. att. Servo sistēmas eksperimentālā stenda struktūrshēma

1 – darba objekts vai spārna prototips; 2 – reduktors; 3 – pastāvīgo magnētu sinhronais servo motors;
4 – servo regulators ACSM1; 5 – signālu komutators un pārveidotājs; 6 – dators ar programmatūru MATLAB;
7 – motora pagrieziena leņķa resolvera tipa mēriekārta.

Servo regulatora iekšējais algoritms ir iestatīts "Synchron" režīmā, kas nozīmē servo regulatora uzdevuma izpildi sekošanas režīmā. Servo regulatora parametrizēšana ir veicama, iestatot pēc nepieciešamības servo regulatora ātruma vai pagrieziena leņķa regulatoru parametrus. Izmantojot iepriekš apskatīto informāciju, servo regulatoru ieregulēšanas procesā sākotnēji ir nepieciešams veikt ātruma regulēšanas ķēdes ieregulēšanu, tas nozīmē, ka ir nepieciešams veikt ātruma PID regulatora parametru iestatīšanu. Pēc ātruma PID regulatora iestatīšanas ir nepieciešams iestatīt pozīcijas regulēšanas ķēdes galvenos parametrus.

Servo regulatora uzdevuma aprēķins tiek veikts MATLAB *Simulink* vidē izmantojot reālā laika sinhronizācijas funkciju (*Real-Time Sync*). Servo mehānisma pārbaudei ir nepieciešams formēt atkārtotu signālu, tādā veidā analizējot servo regulatora spēju izpildīt atkārtoti uzdoto uzdevumu. Mērķis ir panākt servo regulatora iespējami mazāko uzdevuma izpildes kļūdu un noskaidrot, kāda tā būtu servo motoram (3.41. att.).



3.41. att. MATLAB Simulink vidē izveidotā servo sistēmas ieregulēšanas programma

a – MATLAB *Simulink* simulācijas programma servo regulatora uzdevuma signāla simulācijai; b – servo regulatora simulētais signāls.

Izstrādātā signāla simulācijas programma var tikt izmantota ātruma un pozīcijas regulatora analīzei. Ātruma regulatora iestatīšana tiek analizēta gan uz simulētā signāla fronti (Rise), gan uz kritumu (Fall). Lai iegūtu pilnvērtīgāku informāciju, tika izvēlēts veikt 10 atkārtojumus pie sekojošiem uzdevuma signāla līmeņa veidiem: 0-50 min⁻¹, 50-100 min⁻¹, 100-150 min⁻¹, 150-200 min⁻¹, 0-100 min⁻¹, 100-200 min⁻¹, 0-200 min⁻¹. Datu apstrāde tika veikta, izmantojot izveidotu apstrādes programmu MATLAB *Simulink* vidē, ar kuras palīdzību tiek datu kopā atrasta signāla fronte un kritums. Tālāk tiek pārkopēti nepieciešamie dati, izveidojot atlasīto datu matricu, kuru grafiskais attēlojums dod iespēju novērtēt servo sistēmas atkārtojamību ātruma uzdevumam (13. pielikums).

Servo sistēmas ieregulēšana atkarīga no izpildmehānisma. Mainoties mehāniskajai slodzei, mainās servo regulatora iestatījumi. Eksperimentālie mērījumi pie ātruma uzdevuma no 0 līdz 100 min⁻¹ ar 10 atkārtojumiem parāda, ka servo motors tukšgaitas režīmā spēj izpildīt ātruma uzdevumu aptuveni 3 ms laikā. Tā kā servo regulatora mērījumu dati tiek reģistrēti ar soli 1 ms, tad novērojama liela datu izkliede, kam par iemeslu ir datu reģistrēšanas biežums un servo sistēmas regulēšanas kļūdas (3.42. att.).



3.42. att. Servo motora ātruma mērījumi tukšgaitā

Eksperimenta laikā tika pārbaudīta servo sistēmas darbība pie 4 dažādām slodzēm, kur katrai no tām ir sava masas inerce, kas iedarbojas kā slodzes faktors servo mehānismam. Pievienotās eksperimentālās slodzes masas ar sekojošiem inerces momentiem: $J_{sl.1} - 0.002$ kg·m², $J_{sl.2} - 0.0025$ kg·m², $J_{sl.3} - 0.004$ kg·m², $J_{sl.4} - 0.009$ kg·m².

Servo motora ieskrejas laiki pie slodzes inerces momenta $J_{sl.1} - 0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ un $J_{sl.3} - 0.004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ir attiecīgi 20 ms un 40 ms. Servo motora rotācijas ātruma nostabilizēšanās laiki ir 40 un 80 ms. Izmainot regulatora parametrus, var panākt servo motora ātrāku nostabilizēšanos, bet tiek zaudēts servo motora ieskriešanās laiks, jo sistēma paliek lēndarbīgāka. Servo motora regulatora parametri tiek iestatīti tā, lai sasniegtu pēc iespējas lielāku ātrdarbību un ātrāku motora uzdevuma izpildi ar ne vairāk kā diviem pārregulējumiem (3.43. att.) (15. pielikums).



3.43. att. Ātruma ieregulēšanas eksperimentālie rezultāti

Mainoties slodzes masai, kas servo motoram jāpagriež, nepieciešams paredzēt, kā mainīsies sistēmas ieskriešanās, nostabilizēšanās laiks. Mainoties eksperimentālajai masai, ir nepieciešams pārregulēt jaunus servo regulatora ātruma regulēšanas ķēdes parametrus. Ieregulējot katram slodzes izmēram savus regulēšanas parametrus, tika iegūta sērija ar mērījumiem, kas parāda ieskriešanās laika atkarību no slodzes palielināšanas. Pamatojoties uz to, ka laika konstantes aprēķins servo mehānismam ir funkcija no objekta inerces momenta un servo motora parametriem, tad, palielinot objekta inerces momentu divas reizes, palielinās ieskriešanās un nostabilizēšanās laiks divas reizes (3.44. att.).



3.44. att. Servo motora ātruma vidējie rādītāji pie dažādām sistēmas slodzēm a – servo motora rezultāti ar rotācijas ātruma uzdevuma diapazonu 0 – 50; b – servo motora rezultāti ar rotācijas ātruma uzdevuma diapazonu 100 – 150.

Servo motora ieskriešanās laiks neatkarīgi no sākuma rotācijas ātruma ir vienāds pie attiecīgās slodzes inerces momenta. Tas nozīmē, ka noteicošais ir uzdotā ātruma starpības lielums, nevis uzdevuma sākuma vai beigu ātrums (3.42. att.). Eksperimentālo mērījumu gaitā tika iegūti sekojoši ātruma regulēšanas ķēdes regulatora parametri darbā ar slodzi: P - 100, I - 0.05 s, D - 0.01 s. Tukšgaitas režīmā servo regulatoram ir sekojoši parametri - P - 10, I - 0.1 s, D - 0.0 s.

Servo regulatoram ACSM1 ir izveidots iekšējais algoritms, kas veic mehānisma laika konstantes aprēķinu. Pārbaudot tā izmantošanas iespējas, tika veikts eksperiments, izmantojot iepriekšējā eksperimentā izmantotās slodzes laika konstantes mērījumiem ar ACSM1 servo regulatoru. Veiktie 5 atkārtojumi rāda, ka pie vienas slodzes masas ir maza mērījumu izkliede, taču, palielinoties slodzes masai, mērījumu izkliede palielinās līdz 5 % (3.2.tabula).

3.2. tabula

	Mēr. 1	Mēr. 2	Mēr. 3	Mēr. 4	Mēr. 5	Vid.vērt.	Standart.n.
Tukšgaita	0.188	0.198	0.186	0.193	0.187	0.190	0.005
$J = 0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	2.950	2.916	2.950	2.954	2.975	2.949	0.021
$J = 0.0025 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	3.472	3.452	3.407	3.458	3.474	3.453	0.027
$J = 0.004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	9.358	9.310	9.667	9.469	9.622	9.485	0.157
$J = 0.009 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	19.851	19.949	19.798	19.956	20.107	19.932	0.118

Servo regulatora ACSM1 automātiski nomērītās servo mehānisma laika konstantes, s

Izmantojot MATLAB *Simulink* programmu, ir iespējams pārbaudīt ACSM1 servo regulatora laika konstantes aprēķinu. Izmantojot jau iepriekš apskatīto mehānisma laika konstantes aprēķinu, ir iespējams apgrieztā veidā salīdzināt simulācijas rezultātus ar eksperimentālajiem rezultātiem. Servo regulators, veicot servo mehānisma laika konstantes aprēķinu, veic motora diagnostikas procesu. Nomērot motoram pievadīto griezes momentu, ir iespējams to kā ieejas signālu izmantot simulācijas modelī un pārbaudīt, vai ar tādu pašu griezes momentu simulācijas modelim būs vienāds izejas signāls ar eksperimentos nomērīto (3.45. att.). Aprēķinātais servo motora griezes momenta pārvades koeficients 345.5.



3.45. att. Simulācijas modelis laika konstantes aprēķina validācijai

Eksperimentālajos mērījumos, veicot laika konstantes pārbaudi, ir jāveic ātruma uzdevuma, izpildītā ātruma un griezes momenta reģistrēšanu. Izmantojot šos datus, ir iespējams veikt simulācijas modeļa salīdzinājumu ar eksperimentālajiem rezultātiem. Griezes moments tiek reģistrēts pie 4 dažādām slodzes lieluma vērtībām. Reģistrētie dati rāda, ka servo sistēmas regulatora izejas griezes moments ir mainīgs, atkarībā no slodzes inerces momenta J_{sl}. Servo motora rotācijas ātrumam, tuvojoties uzdotajam lielumam, vadības griezes moments samazinās (3.46. att.).



3.46. att. Servo motora griezes moments laika konstantes pārbaudē

Simulācijas rezultāti parāda servo regulatora algoritma noteikšanas precizitāti, jo, ievadot aprēķinātās laika konstantes simulācijas modelī, simulācijas reģistrētie rezultāti sakrīt ar eksperimentālajiem mērījumiem. Palielinoties slodzes inerces momentam J_{sl} palielinās servo mehānisma ieskriešanās laiks (3.47. att.).



3.47. att. Servo motora laika konstantes pārbaudes simulācijas rezultāti a - servo mehānisms ar $J_{sl.1} = 0.002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; b - servo mehānisms ar $J_{sl.2} = 0.0025 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; c - servo mehānisms ar $J_{sl.3} = 0.004 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; d - servo mehānisms ar $J_{sl.4} = 0.009 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $n_{uzd} - \bar{a}$ truma uzdevums; $n_{m\bar{e}r} - servo$ mehānisma nomērītais rotācijas ātrums; $n_{sim} - simulētais$ rotācijas ātrums.

Simulācijas rezultāti grafiski parāda to, ka starp simulācijas modeli un eksperimentālajām servo iekārtām ir cieša atbilstība, kas nozīmē, ka veiktās aprēķinātās laika konstantes ir atbilstošas. Servo regulators ACSM1, izmantojot iekšējo aprēķinu algoritmu, veic pareizu mehāniskās laika konstantes aprēķinu.

Pozicionēšanas sistēmas ieregulēšana tika veikta, izmantojot jau iepriekš ātruma regulēšanai izstrādāto MATLAB *Simulink* modeli. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanā ir nepieciešama servo motora ātra uzdevuma izpilde. Gadījumā, ja servo motora pozīcijas regulēšanas ķēde ir ieregulēta neatbilstoša, var tik zaudēta sistēmas ātrdarbība.

Pozīcijas atsekošanas algoritma parametrizēšana tiek veikta atbilstoši iekšējās programmas darba struktūrai, lai nodrošinātu pareizu parametru savstarpējās ietekmes rezultātu atainošanu. Ieregulēšanas procesā tika sasniegti nepieciešamie ātruma un kvalitātes kritēriji, kā rezultātā tika iegūta pozīcijas atsekošana 0.24 s laikā. Signāla frontes kritums notiek 0.02 s laikā. Signāla frontes vai krituma gadījumā servo sistēmas izpildes laiks neatšķiras vidējos rādītājos 0.24 s \pm 0.02 s (3.48. att.).



3.48. att. Pozicionēšanas ieregulēšanas eksperimentālie rezultāti

Pozīcijas regulators ACSM1 nenodrošina automātisku parametru pieskaņošanu, radot papildus grūtības servo sistēmas darbības kvalitātes uzlabošanai. Citi ražotāji kā Siemens, Kollmorgen, B&R izmanto ātruma un pozīcijas regulēšanas kontūra parametru pieskaņošanu (Sean A., 2013; Ellis G., s.a.; B&R, s.a.).

Turpinot eksperimentu ar servo sistēmas ātrdarbības pārbaudi, pēc parametru ieskaņošanas ir iespēja veikt servo mehānisma testus pie atbilstoša pozīcijas uzdevuma. Servo mehānisma pozīcijas uzdevumu formē pēc teorētiski aprēķinātā optimālā iestatīšanas leņķa korekcijas lieluma. Izmantojot līkni (3.49. att.), ir iespējams pārbaudīt servo mehānisma spēju izpildīt nepieciešamo uzdevumu pie dažādiem VES rotora rotācijas ātrumiem un novērtēt kļūdu starp realizēto leņķi un teorētiski optimālo leņķi.

Servo sistēmas ātrdarbības pārbaudes eksperiments tiek veikts, izmantojot divus VES rotora rotācijas ātrumus. Viens no svarīgākajiem VES rotācijas ātrumiem ir vidējais rotācijas ātrums pie vēja, kāds ir vidēji noteiktajā reģionā. Otrs VES rotora rotācijas ātrums ir pie nomināla vēja ātruma, kur VES rotors rotē ar maksimālo atļauto mehānisko rotācijas ātrumu. Servo mehānisma pietiekama ātrdarbības spēja pie maksimālā VES rotora rotācijas ātruma apliecina tā spēju izpildīt uzdevumu arī pie mazākiem rotora rotācijas ātrumiem. Apskatot VES ar rotora diametru 10 m un optimālo $\lambda = 3$, rotoram tiek izvēlēti divi rotācijas ātrumi: 30 min⁻¹, 60 min⁻¹.



3.49. att. Optimālā iestatīšanas leņķa korekcija $\varphi(\theta)$

Lai izpētītu un salīdzinātu dažādus spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas risinājumus, eksperimentos tika izmantoti servo mehānismi ar un bez reduktora. Eksperimenta vajadzībām tika izvēlēts Chiaravalli ražotais gliemežreduktors CHM 040 71B5 7.5 ar pārnesuma attiecību i = 7.5. Eksperiments tika veikts 2015.gada jūlijā pie āra gaisa temperatūras 22 °C. Eksperimenta realizēšanai tika izstrādāts jauns MATLAB *Simulink* simulācijas modelis, ar kura palīdzību ir iespējams simulēt VES rotora rotāciju un atkarībā no rotora pagrieziena leņķa formēt izejā signālu uz eksperimentālā stenda ar servo regulatoru (3.50. att.).



3.50. att. Uzlabotā iestatīšanas leņķa korekcijas φ(θ) MATLAB Simulink simulācijas modelis

Dati tiek reģistrēti ar programmu DriveStudio ar soli 1 ms. No servo regulatora tiek reģistrēti: servo motora griezes moments M_{sm} , servo regulatora pozīcijas uzdevums φ_{uzd} , servo motora pagrieziena leņķis φ_{sm} . Reģistrētie dati tiek grafiski apstrādāti MS Excel vidē. Servo regulatora darbs tiek pārbaudīts pie tukšgaitas un pie maksimālās slodzes lieluma (objekta inerces masa $J_{sl} = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Grafiskie rezultāti rāda, ka servo motors nodrošina nepieciešamo ātrdarbību pie rotora rotācijas ātruma 30 min⁻¹, strādājot tukšgaitā. Strādājot ar maksimālo slodzi, uzskatāmi redzams, ka pie lielas pozīcijas uzdevuma izmaiņas sistēma nespēj nodrošināt pozīcijas izpildi (3.51. att.).



3.51. att. Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti

a. – servo sistēmas eksperimentālie rezultāti tukšgaitas režīmā; b – servo sistēmas eksperimentālie rezultāti, strādājot ar slodzi; sistēma bez reduktora 30 min⁻¹.

Analizējot eksperimentālos datus pie rotora maksimālā rotācijas ātruma 60 min⁻¹, grafiski redzams, ka servo motors spēj izpildīt uzdoto ātruma izmaiņu tukšgaitā, taču pie slodzes spārna izpildītais uzdevums neatbilst uzdotajam. Pie maksimālā rotora rotācijas ātruma veidojas servo sistēmas pozīcijas izpildes kļūda visā pagrieziena laikā, kaut gan servo sistēmas kontrolētais griezes moments nav lielāks par 50 % no nominālā griezes momenta. Tas izskaidro, ka jauda sistēmai ir pietiekami liela, lai spētu izpildīt uzdevumu, taču ieregulētie parametri nenodrošina servo sistēmas maksimālās jaudas sasniegšanu. Šādā gadījumā nepieciešams veikt atkārtotu servo sistēmas parametru ieregulēšanu, panākot labāku pozīcijas sekošanas izpildes rezultātu (3.52. att.).





Sistēmas eksperiments, izmantojot spārna regulēšanas servomehānismu ar reduktoru rāda to, ka servo motoram, pateicoties reduktora pārnesuma attiecībai i = 7.5, ir jāveic 7.5 reizes lielāks pagrieziena leņķis, kas arī rada pagrieziena leņķa izpildes kļūdu pie lielas uzdevuma izmaiņas. Griezes moments uzskatāmi parāda, ka servo motors tiek darbināts ar lielāku griezes momentu. Tas nozīmē, ka iespējams ir nepieciešams palielināt motora jaudu, lai tas spētu attīstīt ātrāku pozīcijas leņķa izpildi. Pievienojot servo mehānismam papildus slodzi, pozīcijas uzdevuma izpilde ir ar lielu kļūdu, tajā pat laikā servo motora griezes moments ilgstoši ir virs nominālā lieluma (3.53. att.). Kad pozīcijas uzdevuma izmaiņa ir ļoti ātra, servo motora griezes moments pārsniedz nominālo vērtību divas reizes. Šie eksperimentālie rezultāti rāda to, ka servo motora izvēlētā jauda nepieciešamā uzdevuma izpildei ir neatbilstoši maza, kas liedz sasniegt labākus pozīcijas sekošanas rezultātus.



3.53. att. Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti ar reduktora un n = 30 min⁻¹

Eksperimentālie pētījumi pie rotora rotācijas ātruma 60 min⁻¹ parāda vēl sliktākus rezultātus. Servo sistēma bez slodzes tiek darbināta ar griezes momentu, kas divreiz lielāks par nominālo 1.2 Nm. Servo mehānismam, pievienojot slodzi pie rotora rotācijas ātruma 60 min⁻¹, pozīcijas sekošanas rezultāti ir neatbilstoši un servo mehānisms nespēj veikt uzdevuma izpildi (3.54. att.).



3.54. att. Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti ar reduktoru un n = 60 min⁻¹

Eksperimentālie rezultāti rāda, ka servo sistēma ir spējīga veikt šādu tehnisko uzdevumu un tās izmantošana VES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanā ir tehniski labs risinājums. Lai servo mehānisms izpildītu nepieciešamo uzdevumu, ir vajadzīga precīza mehānisma simulācija un motora jaudas izvēle.

3.11. Spārna leņķa regulēšanas sistēmas aerodinamiskā pretestības spēka eksperimentālie pētījumi

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas ārējās perturbācijas ir spārna masas inerces moments un griezes moments, kas veidojas vēja iedarbei uz spārna rotācijas asi. Pētījuma mērķis ir noskaidrot, cik liels griezes moments veidojas uz spārna rotācijas asi. Eksperimenta mērķa izpildei tika izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- 1. izveidot NACA0018 spārna prototipu ar spārna hordas lielumu c = 0.20 m un spārna garumu l = 0.4 m;
- 2. spārna fiksatora izgatavošana;
- 3. izveidot speciālu pārbaudes simulācijas programmu, ar kuras palīdzību būtu iespējams veikt griezes momenta lieluma analīzi kā funkciju no relatīvā appūtes leņķa;
- 4. veikt mērījumus pie vēja ātruma 3 līdz 7 m \cdot s⁻¹ ar soli 0.5 m \cdot s⁻¹;
- 5. analizēt reģistrētos mērījuma datus un analizēt pretestības griezes momenta atkarību no relatīvā spārnu appūtes leņķa.

Spārna prototips tika izstrādāts no viegliem materiāliem, kur kopējā spārna prototipa masa tika iegūta 0.415 kg. Spārna izmēri tika izveidoti atbilstoši uzdevumos izvirzītajiem, kur spārna horda c = 0.2 m un garums l = 0.4 m. Spārna centrālā ass izveidota no 10 mm tērauda stieņa (3.55. att.) (15. pielikums).



3.55. att. NACA0018 eksperimentālā spārna konstrukcija

Pamatojoties uz to, ka spārna konstrukcija tika projektēta programmā *SolidedgeV18*, tad tika panākts, ka spārna masas centrs sakrīt ar rotācijas asi. Spārna rotācijas ass attālums no spārna priekšgala pēc pētījumos norādītās informācijas tika izvēlēts 25% no hordas garuma.

Eksperimentālie mērījumi tika veikti pie mākslīgi izveidotas ventilatoru gaisa plūsmas. Atkarībā no attāluma pret ventilatoru tika iegūti dažādi plūsmas ātruma lielumi. Izmantojot vēja mērītāju, tika noteikts vēja ātrums, pie kura tika veikti mērījumi. Eksperimentam tika izmantots jau iepriekš sastādītais servo mehānisma testa stends, šajā reizē izmantojot spārnu kā slodzi. Lai nodrošinātu nepieciešamā uzdevuma pietiekami lielu precizitāti, pie viena spārna pagrieziena leņķa soļa tika veikti mērījumi 5 min garumā. Spārna pagrieziena leņķis tika izveidots no - 90 ° līdz + 90 °, ar soli 9 °. Spārna pagrieziena leņķis eksperimenta laikā bija vienāds ar relatīvo appūtes leņķi, jo spārna kustības ātrums ir 0.

Reģistrētie dati tika apstrādāti MS Excel programmā. Aprēķinātā standartnovirze parāda to, ka nomērīto un reģistrēto datu izkliede ir liela, kas varētu būt izskaidrojama ar to, ka mērījumi tika veikti ar servo motora regulatoru. Servo regulatoram aktīvi tiek regulēts pagrieziena leņķis. Uzdevums ir nemainīgs viena pagrieziena soļa laikā, taču gaisa plūsma nav pilnīgi lineāra, kas nozīmē, ka mainīga perturbācija var radīt pulsējošu efektu, tādā veidā liekot servo regulatoram palielināt motora griezes momentu. Palielinoties vēja ātrumam, palielinās vidējais griezes momenta lielums uz servo motoru, tajā pat laikā palielinoties arī mērītā lieluma izkliedei (3.56. att.).



3.56. att. NACA0018 spārna aerodinamiskais pretestības spēks atkarībā no spārna relatīvā appūtes leņķa

a – spārna relatīvais appūtes leņķis $\beta = 0^\circ$; b – spārna relatīvais appūtes leņķis $\beta = 60^\circ$.

Eksperimentālie rezultāti uzskatāmi apstiprina faktu, ka aerodinamiskais pretestības spēks ir tuvu nullei, ja appūtes leņķis ir robežās no - 20 ° līdz + 20 °. Tas nozīmē, ka spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma, regulējot relatīvo appūtes leņķi robežās, kas nepārsniedz -20 ° līdz +20 ° netiek pakļauta papildus aerodinamiskā spēka iedarbei (3.57. att.). Servo sistēmas jaudas izvēles gadījumā šī informācija ir svarīga, atļaujot precīzāk izprast servo sistēmas nelineāro slodzes raksturu.



3.57. att. NACA0018 spārna aerodinamiskais pretestības spēks atkarībā no spārna relatīvā appūtes leņķa

Mērījumi rāda, ka spārna pretestības spēka iedarbe atkarībā no relatīvā appūtes leņķa un vēja ātruma ir simetriska. Tam tehniski arī būtu tā jābūt, pamatojoties uz to, ka spārna profils ir simetrisks. Pie viena appūtes leņķa, palielinoties vēja ātrumam, palielinās arī servo motoram radītais pretestības spēks no spārna (3.58. att.).



3.58. att. Spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas servo motora attīstītais griezes moments atkarībā no vēja ātruma un relatīvā appūtes leņķa

Mērījumi tika veikti ar spārna garumu l = 0.4 m, tas nozīmē, ka matemātiski ir iespējams aprēķināt, kāda būtu vēja iedarbe uz servo motoru, ja spārna garums būtu 1 m vai 10 m. Apskatītie zinātniskie raksti apgalvo, ka spārna aprēķinātais spēks uz 1 m var tikt pareizināts ar kopējo spārna garumu. Tas nozīmē, ka veiktais eksperiments dod iespēju pietiekami precīzi noteikt izveidotā spārna aerodinamisko pretestības spēku uz iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas piedziņu.



3.59. att. Aerodinamiskā pretestības spēka eksperimentālie mērījumi pie v = 3.5 m·s⁻¹

Eksperimentālie rezultāti rāda, ka, palielinoties appūtes leņķim, lineāri pieaug spārna aerodinamiskais pretestības spēks. Pētot trīs eksperimentālu mērījumu sērijas ar vēja ātrumiem 3.5, 5.5 un 7.5 m·s⁻¹, ir noteikta spārnu aerodinamiskā pretestības spēka aprakstošā lineārā

funkcija. Eksperimentālie dati ar vēja ātrumu 3.5 m·s⁻¹ atspoguļo aerodinamiskā pretestības spēka simetriskumu pret relatīvo appūtes leņķi. Par cik vēja ātrums tika radīts mākslīgi, izmantojot aksiālā ventilatora izejas gaisa plūsmu, eksperimentālajos rezultātos ar zemu vēja ātrumu novērojama neliela datu izkliede ar determinācijas koeficentu no 0.9721 līdz 0.8359 (3.59. att.).

Palielinot vēja ātrumu, ir novērojama aerodinamiskā pretestības spēka palielinājums atkarībā no reaktīvā appūtes leņķa. Eksperimentālajos mērījuma datos ar vēja ātrumu 5.5 m·s⁻¹, ir novērojama neliela spēka asimetrija pozitīvajam virzienam pret negatīvo un mazāka mērījumu vidējo vērtību izkliede. Aerodinamisko pretestības spēku pozitīvajā virzienā var aprakstīt ar vienādojumu $M_{a.pr.} = -0.0071 \cdot \theta + 0.0495$ ar determinācijas koeficientu $R^2 = 0.9439$. Aerodinamisko pretestības spēku negatīvajā virzienā var aprakstīt ar vienādojumu $M_{a.pr.} = -0.0071 \cdot \theta + 0.0495$ ar determinācijas koeficientu $R^2 = 0.9439$. Aerodinamisko pretestības spēku negatīvajā virzienā var aprakstīt ar vienādojumu $M_{a.pr.} = -0.00118 \cdot \theta - 0.2427$ ar determinācijas koeficientu $R^2 = 0.974$ (3.60. att.).



3.60. att. Aerodinamiskā pretestības spēka eksperimentālie mērījumi ar v = 5.5 m·s⁻¹

Eksperimentālajos mērījuma datos ar vēja ātrumu 7.5 m·s⁻¹ aerodinamisko pretestības spēku pozitīvajā virzienā determinācijas koeficents ir $R^2 = 0.9898$ un negatīvā virzienā $R^2 = 0.9931$. Ar vēja ātruma 7.5 m·s⁻¹ un appūtes leņķi 90 ° tiek sasniegti 90.1 % no servo motora nominālā darba griezes momenta, kas eksperimentālajam motoram ir 1.1 Nm (3.61. att.).



3.61. att. Aerodinamiskā pretestības spēka eksperimentālie mērījumi v = 7.5m·s⁻¹

Nodrošinot, ar iestatījumiem, spārnu appūtes leņķi robežās no $-20 \circ līdz +20 \circ$, VES nav nepieciešams paredzēt papildus servo motora jaudu. Taču drošības apsvērumu dēļ ir nepieciešama rezerves jauda, lai avārijas situācijās būtu iespējams nodrošināt VAVES rotora bremzēšanu, izmantojot spārna izgriešanu no vēja, ar to radot negatīvu aerodinamisko griezes momentu.

3. nodaļas secinājumi

- VAVES spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motoram ir svarīga tā ātrdarbība, jo spārna iestatīšanas leņķa uzdevuma signāla izmaiņas ātrums ir vēja ātrumam apgriezti eksponenciāla funkcija. Spārnu iestatīšanas leņķa servo motora simulācijā ir nepieciešams ietvert gan elektrisko T_{sm.e}, gan mehānisko T_{sm.m} laika konstanti, lai nodrošinātu korektus sistēmas simulācijas modeļa rezultātus.
- VAVES ar spārna profilu NACA0018 effektīvākais spārna appūtes leņķis β = 16 °. Mainoties spārna ģeometriskajiem parametriem vai rotora rotācijas ātrumam, effektīvākā appūtes leņķa lielums nemainās.
- 3. Palielinoties VAVES ātrgaitas koeficientam, samazinās spārnu iestatīšanas leņķa korekcija. Pie VAVES ātrgaitas koeficienta 2 spārnu iestatīšanas leņķa korekcija ir robežās no 13 ° līdz 13 °. Ātrgaitas koeficientam palielinoties līdz 3, spārnu iestatīšanas leņķa korekcijas lielums samazinās no 3 ° līdz 3 °.
- 4. Izmantojot spārnu leņķa regulēšanas mehānismu ar reduktoru, samazinās tā ātrdarbība un pasliktinās regulēšanas uzdevuma izpilde. Servo mehānismam, strādājot bez reduktora, uzdotā uzdevuma un tā izpildes līkņu determinācijas koeficients ir no R² = 0.85 līdz 0.99. Servo mehānismam, strādājot ar reduktoru, uzdevuma izpildes determinācijas koeficients ir no 0.026 līdz 0.228, strādājot ar slodzi, bet R² = 0.6286 līdz 0.943, strādājot bez slodzes.
- 5. Spārnu iestatīšanas leņķa servo mehānisma uzdevuma izpildes uzlabošanai iegūta analītiska funkcija no rotora rotācijas ātruma kā apsteidzoša rotora pagrieziena leņķa aprēķins, kas dod iespēju uzlabot spārna leņķa regulēšanas uzdevuma izpildi.
- 6. Simulācijas rezultāti parāda, ka VAVES, strādājot pie vēja ātruma 6 m·s⁻¹, bez apsteidzošas signāla saites, spārna iestatīšanas leņķa izpildes determinācijas koeficients ir R² = 0.9687 ar standartnovirzi 1.199 °. Pie vienādiem nosacījumiem, izmantojot apsteidzošo rotora pozīcijas aprēķinu, R² = 0.9993 ar standarta novirzi ir 0.168 °.
- 7. Pie mainīga vēja ātruma, palielinot spārna relatīvo appūtes leņķi, spārna aerodinamiskais pretestības spēks palielinās lineāri. Izmantojot eksperimentālos rezultātus, ir atrastas lineāras funkcijas atkarībā no vēja ātruma ar determinācijas koeficientu 0.8356 pie vēja ātruma 3.5 m·s⁻¹ līdz 0.993 pie vēja ātrumiem līdz 7.5 m s⁻¹.

4. PĒTĪJUMU REZULTĀTU ZINĀTNISKI-PRAKTISKĀ NOZĪME UN TO IEVIEŠANAS EKONOMISKAIS NOVĒRTĒJUMS

VAVES jau daudzus gadus ir kā neatņemama sastāvdaļa vēja enerģijas apguvei. VAVES lietderības koeficienta palielināšanas uzdevums ir ļoti svarīgs. Zemais lietderības koeficients ir iemesls tam, kāpēc bieži vien VAVES netiek izmantotas, jo to atmaksas periods ir pārāk garš un nav ekonomiski pamatojams. Lietderības koeficienta uzlabošana, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanu, ir efektīvs veids, bet tas ietver papildus izmaksas. Tajā pašā laikā nepieciešams aprēķināt VAVES aprīkošanas izmaksas, aprīkojuma lietošanas laiku, kā arī ekonomisko pienesumu VAVES īpašniekam. Šobrīd vēl neviens ražotājs nav izveidojis VAVES ar spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, tāpēc noteikt precīzas tā izmaksas, ieņēmumus un peļņu ir apgrūtinoši. Ņemot vērā simulācijas datus, tajos iegūtos rādītājus, ir iespējams prognozēt, vai VAVES aprīkošana ar spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanu būtu ekonomiski izdevīga, vai tā atmaksātos šīs sistēmas lietošanas laikā.

4.1. Elektroenerģijas cenas izmaiņas un tirgus situācija

VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas atmaksāšanās laiks ir cieši saistīts ar elektroenerģijas cenu. Saskaņā ar Eiropas Parlamenta un Padomes 2003. gada 26. jūnija direktīvu 2003/54/EK par elektroenerģijas tirgus kopīgiem noteikumiem, 2005. gada 5. maijā Latvijā tika pieņemts Elektroenerģijas tirgus likums. Šis likums regulē elektroenerģijas tirgu un nosaka, kādā kārtībā šis tirgus tiek atvērts. Latvija elektroenerģijas tirgus atvēršanas procesu uzsāka 2007. gada 1. jūlijā, kad spēkā stājās "Elektroenerģijas tirgus likuma" izmaiņas, kas deva tiesības jebkuram elektroenerģijas lietotājam mainīt elektroenerģijas tirgotāju (Latvijas Republikas tiesību akti, 2016b).

Sākot ar 2007. gada 1. jūliju, kad pamazām tika pāriets uz atvērto elektroenerģijas tirgu, šīs nozares sniedzējus uzrauga Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija. Regulatora pienākumos elektroenerģijas nozarē ietilpst elektroenerģijas tarifu regulēšana, kā arī izskatīt lietotāju iesniegumus un sūdzības par energoapgādes jautājumiem un pakalpojumu sniegšanu (Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija, s.a.). Kopš 2017. gada marta mēneša Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas mājaslapā ir atrodama informācija, ka elektroenerģiju Latvijā ir tiesības pārdot 80 tirgotājiem. Lai gan tirgotāju reģistrā ir reģistrēti 80 uzņēmumi, tomēr mājsaimniecībām savus pakalpojumus piedāvā tikai deviņi tirgotāji (Sadales tīkls, s.a.a).

Šobrīd publiski ir pieejami septiņu tirgotāju piedāvātie trīsdesmit pieci tarifi Latvijas tirgū. Matemātiski vidējā elektroenerģijas cena ar Pievienotās vērtības nodokli par 1MWh ir 141.52457 EUR. Elektrības cenas gala maksa mēnesī sevī var ietvert vēl dažādas fiksētas komponentes, kas nav atkarīgas no patērētās elektroenerģijas daudzuma.

4.2. Elektroenerģijas patēriņš un VAVES iegādes potenciāla analīze Latvijā

Latvijas Centrālā statistikas pārvalde neregulāri pēta mājsaimniecību sadalījumu pēc gada vidējā elektrības patēriņa, tās iedalot desmit grupās. Mājsaimniecību sadalījums līdz šim ir pētīts 1996., 2001., 2006., 2010. un 2015. gadā (4.1. tabula) (Abbas, s.a.). Pēc statistikas datiem redzams, ka mājsaimniecību patēriņš pieaudzis, pārsniedzot vairāk nekā 2000 kWh gada laikā, šis elektrības patēriņa kāpums ir 2006. gadā, kad tas ir strauji audzis, salīdzinot ar 2001. gadu. Ir redzams, ka lielā patēriņa mājsaimniecību skaits Latvijā ir saglabājies līdzvērtīgs no 2010. līdz 2015. gadam. Šīs mājsaimniecības ir tās, kuru interese par elektroenerģijas izmaksu samazināšanu būtu aktuāla. No statistikas datiem izriet, ka aptuveni 35 % līdz 40 % Latvijas mājsaimniecību patērē vairāk nekā 2000 kWh gadā (4.1. tabula).

4.1. tabula

			%		
Gads	1996.	2001.	2006.	2010.	2015.
Mazāk par 400 kWh	11.2	9.7	2.9	2.6	3.6
400 - 599 kWh	15	10.8	4.1	4.2	6.1
600 - 799 kWh	16.1	16.2	10.1	8.2	8.9
800 - 999 kWh	15.5	14	9.6	8.6	8.8
1000 - 1199 kWh	12.7	8.5	7.5	5.8	7.4
1200 - 1399 kWh	11.6	13.4	16.9	12.4	9.6
1400 - 1599 kWh	6.1	6.9	7.4	7.4	7.6
1600 - 1799 kWh	2.7	3	3.8	3.7	5.2
1800 - 1999 kWh	3.1	4.6	7.5	7.9	6.1
2000 kWh un vairāk	6.2	12.9	30.2	39.2	36.7

Mājsaimniecību sadalījums pēc gada vidējā elektroenerģijas patēriņa Latvijā, %

Lai noskaidrotu, kāds ir mājsaimniecību skaits, kas patērē > 2000 kWh elektroenerģijas gadā, un, cik daudz vidēji viena mājsaimniecība iztērē, jānosaka mājsaimniecību skaits. Statistikas datos atrodams, ka 2015. gada sākumā kopējais mājsaimniecību skaits bija 803.8 tūkstoši (Centrālās statistikas pārvalde, s.a.a.). Zinot kopējo mājsaimniecībās patērēto elektroenerģiju, matemātiski iespējams aprēķināt sadalīto mājsaimniecību elektroenerģiju. Tiek pieņemts, ka katra sadalījuma grupa patērē maksimāli iespējamo elektroenerģijas daudzumu, savukārt vislielākie elektroenerģijas patērētāji patērē visu atlikušo elektroenerģiju (4.2. tabula).

4.2. tabula

Patēriņš gadā	%	Skaits, gab.	Mājsaimn. gada patēriņš, MWh
Mazāk par 400 kWh	3.6	28936.8	11545.78
400 - 599 kWh	6.1	49031.8	29370.04
600 - 799 kWh	8.9	71538.2	57159.02
800 - 999 kWh	8.8	70734.4	70663.66
1000 - 1199 kWh	7.4	59481.2	71317.95
1200 - 1399 kWh	9.6	77164.8	107953.55
1400 - 1599 kWh	7.6	61088.8	97680.99
1600 - 1799 kWh	5.2	41797.6	75193.88
1800 - 1999 kWh	6.1	49031.8	98014.56
2000 kWh un vairāk	36.7	294994.6	1182850.52
Pavisam	100.0	803800.0	1801750.54

Latvijas mājsaimniecību sadalījums un skaits 2015. gadā pēc elektroenerģijas patēriņa, to patērētā elektroenerģija 2015. gadā, MWh

2015. gadā 294994.6 mājsaimniecības patērēja 1182850.52 MWh, tātad vidēji viena mājsaimniecība šajā grupā patērēja 4.00 MWh, kas ir ievērojams patēriņš.

4.3. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora jaudas aprēķina metodika

Spārnu regulēšanas sistēmas svarīgs nosacījums ir servo motora jauda, lai sasniegtu nepieciešamo regulēšanas precizitāti. Servo motora jauda spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanai ir aprēķināma, un izvēle notiek pēc šādiem kritērijiem: spārna inerces momenta, VAVES spārna garuma, VAVES spārna materiāla, VAVES rotora diametra, VAVES darba ātrgaitas koeficienta, spārna centrbēdzes spēka, spārna aktīvie aerodinamiskie spēki, kas darbojas ar pretestības griezes momentu.

VAVES projektēšanu veic, izmantojot mūsdienīgas projektēšanas datorprogrammas, piemēram, Solidworks. Solidedge, Inventor, u.c. Izmantojot šīs projektēšanas datorprogrammas, ir iespējams uzprojektēt VAVES spārna iekšējo struktūru tā, lai masas centrs sakrīt ar rotācijas centru, kas atrodas uz spārna hordas attālumā, kas mērāma aptuveni 25 % no spārna garuma. Izmantojot šīs datorprogrammas, ir iespējams iegūt nepieciešamos galvenos datus: spārna kopējo masu, masas centra novietojumu, inerces momenta lielumu. Šie mehāniskie dati ir primāri, lai varētu izvēlēties servo motoru un tā darbības režīmu, strādājot ar vai bez reduktora. Lielas jaudas VAVES spārna izmēri ir pietiekoši lieli, kuros ir iespējams izvietot servo motorus ar dobu rotoru. Griezes moments servo motoriem ar dobu rotoru var tikt izvēlēts robežās no 15 Nm līdz 400 Nm, kas ir lielāks griezes moments, salīdzinot ar klasiska izpildījuma servo motoru kombinācijā bez reduktora.

Eksperimentāli pārbaudot NACA0012 un NACA0018 spārnu profilu iespējamos inerces momentus pēc izvēlētās konstrukcijas, tiek apskatīts 1 m garš spārna posms ar dažādiem hordas garumiem (4.1. att.). Pagarinot spārnu no 1 m līdz 2 m, spārna inerces moments ir divkāršojies, tātad inerces moments ir lineāri atkarīgs no spārna garuma. Pagarinot divkārtīgi spārna garumu, pieaug kopējā tā masa, kas divas reizes palielina spārna inerces momentu.





4.1.att. NACA0012 un NACA0018 profila spārna ar hordu 1m projektēšana Solidedge datorprogrammā

a – NACA0012 profila spārna projekts; b – NACA0018 profila spārna projekts; 1,2,3 – programmas *Solidedge* koordinātu sistēmas asu virzieni.

Izmantojot datorprogrammu *Solidedge*, tiek analizēta informācija par spārna inerces atkarību no spārna hordas lieluma un spārna kopējā garuma. Spārnam ar profilu NACA0012 un NACA0018 spārna hordas garums ir 10 % no tā kopējā garuma, lai iegūtu lietderīgu aerodinamisko gaisa plūsmu rotorā. NACA0012 profilam spārna biezums ir par aptuveni 10 % mazāks nekā NACA0018 profilam, kas padara sarežģītāku konstrukcijas salāgojumu, lai sakristu masas un rotācijas centri.

Pamatojoties uz spārna profilu ģeometrisko līdzību, inerces momentu atšķirība ir aptuveni 0.002 kg·m² uz spārna 1 m (4.3. tabula). Spārna kopējais inerces moments ir vienāds 1 m gara spārna posma inerces momentu reizinot ar nepieciešamo spārna garumu. Tas nozīmē, ja spārnam, kas ir 1 m garš, inerces moments ir 0.233 kg·m², tad, pagarinot spārnu par 1 metru, kopējais inerces moments palielinās divas reizes.

4.3. tabula

Nosaukums	NACA0012				
Hordas garums c, m	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
Spārna posma masa (1 m), kg	0.75	2.99	6.84	12.16	19.00
Inerces moments (1 m) J_{sp} , kg·m ²	0.002	0.017	0.074	0.233	0.579
VAVES spārna garums, m	2	4	6	8	10
VAVES spārna masa, kg	1.50	12.33	41.05	97.29	190.04
Inerces moments spārnam J _{sp} , kg·m ²	0.004	0.068	0.444	1.864	5.790
Nosaukums		1	VACA001	8	
Hordas garums c, m	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
Spārna posma masa (1 m), kg	0.76	3.03	6.82	12.13	18.95
Inerces moments (1 m), kg·m ²	0.001	0.015	0.076	0.239	0.585
VAVES spārna garums, m	2	4	6	8	10
VAVES spārna masa, kg	1.52	12.13	40.93	97.02	189.52
Inerces moments spārnam, kg·m ²	0.002	0.060	0.456	1.912	5.850

NACA0012 un NACA0018	servo sistēmas	noklusējuma	dati
----------------------	----------------	-------------	------

Izmantojot eksperimentālos datus, spārna profila NACA0018 un NACA0012 inerces moments ir aprakstāms ar sekojošu funkciju: $J_{sp} = 0.0018 \cdot c^{3.5155} \cdot l$. Izmantojot šo funkciju, ir iespējams tālāk aprēķināt nepieciešamo spārna inerces momentu J_{sp} atkarībā no spārna hordas garuma (4.2. att.).

Funkcijai ir liela nozīme, jo to ir iespējams pielietot tālākos pētījumos, neizmantojot projektēšanas programmatūru, kura arī nav pieejama ikkatram. Spārna masa ir atkarīga no konstrukcijas, tas nozīmē, ka ir svarīgi atrast spārna inerces momenta korelāciju ar spārna masu pie eksperimentā izmantotajiem spārna profiliem NACA0012 un NACA0018.

Pēc eksperimentālajiem datiem redzams, ka spārna inerces momentu pret spārna masu apraksta funkcija $J_{sp} = 0.0017 \cdot m_{sp}^{1.98}$, pieņemot, ka masas centrs un rotācijas ass centrs spārnam sakrīt vienā punktā (4.3. att.).

Inerces momenta analīze ir nepieciešama, lai precīzi vai tuvināti būtu iespējams izvēlēties regulējamā spārna servo motora jaudu un mehānisko konstrukciju. Apskatot VAVES ar rotora rādiusu no 1 m līdz 5 m, tika analizēts nepieciešamais servo motora griezes moments.





 m_{sp} – spārna masa, kg; J_{sp} – spārna inerces moments, kg \cdot m².





 m_{sp} – spārna masa, kg; J_{sp} – spārna inerces moments, kg \cdot m².

Izmantojot iepriekš izstrādāto servo motora un spārnu regulēšanas sistēmas simulācijas modeli MATALB *Simulink* vidē, tika ievadīti spārna dati un veikta simulācija. Pielāgojot servo motora jaudu simulācijas modelī, tika iegūta informācija par nepieciešamo servo motora jaudu, kas būtu nepieciešama, lai spārna iestatīšanas leņķa uzdevums tiktu izpildīts ar kļūdu ne lielāku par 5 %. Simulācijas sistēmā tika izvēlēti 4 dažādi vēja ātrumi: nominālais ātrums 12 m·s⁻¹, Latvijas teritorijā vidējie izplatītākie ātrumi ir 4 m·s⁻¹, 5 m·s⁻¹, 6 m·s⁻¹.

Lai nodrošinātu *Simulink* simulācijas modelī iegūto rezultātu validāciju, nepieciešams izmantot papildus programmatūras šī uzdevuma veikšanai. Ar ABB kompānijas

datorprogrammas *Drive Size* palīdzību klientiem ir iespējams izvēlēties servo motoru, izejot no mehānisma datiem un programmā ievadītajiem dinamiskajiem aprēķiniem. *Simulink* simulācijas modeļa un Drive Size rezultātu salīdzinājums parāda tendenci, ka *Simulink* simulācijas modelī izvēlētais servo motora griezes moments ir vidēji par 10 % lielāks (4.4. tabula).

4.4. tabula

		VAVES rotora rādiuss, m				
	Rādītājs	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	Hordas garums, m	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
	Spārna garums, m	2	4	6	8	10
	Spārna masa, kg	1.52	12.13	40.93	97.02	189.52
	VAVES nominālā jauda, W	1 500	6 000	12 000	21 000	32 000
	Spārna inerces moments, kg·m ²	0.002	0.060	0.456	1.912	5.850
	Simulink griezes moments, Nm	1.8	12.0	40.0	90.0	160.0
_s.u	Drive Size griezes moments, Nm	1.428	10.710	36.176	85.234	148.69
2 n	<i>Drive Size</i> jauda, kW	0.067	0.252	0.568	1.004	1.320
	Laiks viena rotora apgr., s	0.201	0.403	0.604	0.805	1.006
	Simulink griezes moments, Nm	0.600	3.000	12.000	24.000	45.000
1.S ⁻¹	Drive Size griezes moments, Nm	0.357	2.677	9.04	21.308	40.54
6 m	<i>Drive Size</i> jauda, kW	0.008	0.032	0.071	0.126	0.188
	Laiks viena rotora apgr., s	0.403	0.805	1.208	1.610	2.013
	Simulink griezes moments, Nm	0.400	2.500	8.000	16.000	32.000
l-S ⁻¹	Drive Size griezes moments, Nm	0.245	1.836	6.645	14.645	29.000
5 m	<i>Drive Size</i> jauda, kW	0.005	0.018	0.045	0.072	0.114
	Laiks viena rotora apgr., s	0.483	0.966	1.449	1.932	2.415
	Simulink griezes moments, Nm	0.300	1.500	4.500	11.000	20.000
l·S ⁻¹	Drive Size griezes moments, Nm	0.139	1.16	4.02	9.353	17.905
4	<i>Drive Size</i> jauda, kW	0.002	0.009	0.021	0.037	0.055
	Laiks viena rotora apgr., s	0.604	1.208	1.812	2.415	3.019

NACA0018 spārna profi	lu inerces momen	tu salīdzinājums
-----------------------	------------------	------------------

Analītiski salīdzinot spārna inerces momentus un nepieciešamo jaudu, ir iespēja noteikt to savstarpējās sakarības funkciju. Izmantojot regresijas metodi, spārna servo motora nepieciešamā jauda atkarībā no spārna inerces momenta ir noteikta pēc šāda vienādojuma $P_{ss} = 0.7343 \cdot J_{sp}^{0.3813}$. Vienādojuma determinācijas koeficients $R^2 = 0.9975$.

Eksperimentālie dati parāda, ka salīdzinājumā ar *Simulink* simulācijas modeļa datiem ir nepieciešams vidēji 10 % jaudīgāks servo motors. Tas pamatojams ar to, ka šādas sistēmas konstrukcijās ir nepieciešamas papildus servo motora jaudas rezerves, kas būtu nepieciešamas tādās avārijas situācijās, kad jānodrošina VAVES apstādināšana, izmantojot spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu. Jāņem vērā, ka var rasties papildus aerodinamiskie spēki, kuri mehāniskajā sistēmā iepriekšējos eksperimentālajos pētījumos netika atklāti.

Izmantojot datorprogrammu *Drive Size*, ir izdevies noskaidrot faktisko servo motora jaudu regulēšanas momentā. Motora jauda, kas tiek norādīta *Drive Size* programmā, ir maksimālā nepieciešamā jauda vienam spārnam. Reālā darba procesā visu rotora rotācijas laiku servo motora patērētā enerģija nav konstanta.

Ekonomiskajos aprēķinos tika izmantots dārgākais scenārijs, kurā paredzēts, ka servo motors konstanti strādā ar maksimālo aprēķināto jaudu. Servo motora patērētā enerģija palielinās, pieaugot vēja ātrumam.

4.5. tabula

		VAVES rotora rādiuss, m				
	Rādītājs	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
	Hordas garums, m	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
	Spārna garums, m	2	4	6	8	10
	Spārna masa, kg	1.52	12.13	40.93	97.02	189.52
	Spārnu skaits rotorā	3	3	3	3	3
	Spārna inerces moments, kg·m ²	0.002	0.060	0.456	1.912	5.850
1	Servo sistēmas jauda, kW	0.067	0.252	0.568	1.004	1.320
¹ 12 m·s ⁻¹	Patērētā enerģija diennaktī, kWh	4.824	18.144	40.896	72.288	95.040
12	Patērētā enerģija gadā, MWh	1.737	6.532	14.723	26.024	34.214
-1	Servo sistēmas jauda, kW	0.008	0.032	0.071	0.126	0.188
s.u	Patērētā enerģija diennaktī, kWh	0.576	2.304	5.112	9.072	13.536
61	Patērētā enerģija gadā, MWh	0.207	0.829	1.840	3.266	4.873
-1	Servo sistēmas jauda, kW	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
s.u	Patērētā enerģija diennaktī, kWh	0.360	0.360	0.360	0.360	0.360
S 1	Patērētā enerģija gadā, MWh	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130
-1	Servo sistēmas jauda, kW	0.002	0.009	0.021	0.037	0.055
s.u	Patērētā enerģija diennaktī, kWh	0.144	0.648	1.512	2.664	3.960
4	Patērētā enerģija gadā, MWh	0.052	0.233	0.544	0.959	1.426

Spārnu iestatīšanas leņķa servo mehānisma patērētā elektroenerģija

Spārnu iestatīšanas servo mehānisma patērētā elektroenerģija atkarībā no kopējā darba stundu skaita atšķirsies un arī potenciālā starpība starp VAVES saražoto un spārnu regulēšanas sistēmas patērēto ir mainīga atkarībā no vēja ātruma. Piemēram, pēc eksperimentos noteiktajiem rezultātiem VAVES ar rotoru 2.0 m pie 12 m·s⁻¹ spārnu regulēšanas sistēmas jauda ir 0.252 kW, bet pie 5 m·s⁻¹ samazinājusies līdz 0.005 kW.

4.4. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izmantošanas ekonomiskais pamatojums

Iepriekš veiktie eksperimentālie pētījumi uzrāda, ka spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izmantošana var uzlabot saražotās enerģijas rādītājus pie noteiktiem ātrgaitas koeficientiem. Izmantojot pētījuma rezultātus par nepieciešamo elektrisko jaudu servo motoram, lai veiktu spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanu, ir iespējams matemātiski aprēķināt šādas sistēmas izmantošanas atmaksāšanās periodu un ekonomisko pamatojumu (Davood S., 2013).

VAVES saražoto elektroenerģiju gada laikā aprēķinām pēc vidējā dienu skaita gadā 365 dienas. Pamatojoties uz Latvijas teritorijā pieejamo vēja resursu, vidēji līdz 15 m augstumam, tiek izvēlēti sekojoši vidējie vēja ātrumi: 4 m s⁻¹, 5 m s⁻¹, 6 m s⁻¹. VAVES aktīvais darba laiks tiek pieņemts 360 dienas gadā, paredzot nepieciešamās dīkstāves.

VAVES, kas neizmanto spārnu leņķa regulēšanas sistēmu, saražotā elektroenerģija tiek aprēķināta sekojoši:

$$E_{VES.G.} = E_{VES.D.} \cdot 360/1000;$$
(4.1)

$$E_{\text{VES.D.}} = P_{\text{VES}} \cdot 24; \tag{4.2}$$

$$P_{VES} = 0.5 \cdot v^3 \cdot 1.25 \cdot S, \tag{4.3}$$

Izmantojot iepriekš apskatīto informāciju par servo sistēmas patēriņu, lai veiktu regulēšanu, ir iespējams aprēķināt paredzamo elektroenerģijas patēriņu gada griezumā:

$$E_{SS,P,G} = E_{SS,P,D} \cdot 360/1000; \tag{4.4}$$

$$\mathbf{E}_{\mathrm{SS.P.D}} = \mathbf{P}_{\mathrm{SS}} \cdot \mathbf{24}; \tag{4.5}$$

$$P_{SS} = f(P_{VES}), \tag{4.6}$$

- kur E_{SS.P.G} spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora gada laikā patērētā elektroenerģija, MWh;
 E_{SS.P.D} spārnu iestatīšanas lenka regulēšanas sistēmas servo motora dienas laikā
 - ESS.P.D sparnu iestatisanas leņķā regulesanas sistemas servo motora dienas laika patērētā elektroenerģija, kWh;
 - Pss spārnu leņķa regulēšanas sistēmas servo motora darba jauda, kW.

Enerģijas ieguvums, izmantojot spārnu leņķa regulēšanas sistēmu, ir aprēķināms gan bruto gan neto vienībās, izmantojot aprēķināto enerģijas iegūšanas uzlabošanas koeficientu ξ:

$$E_{\text{VES.SS.Bruto}} = E_{\text{VES.G.}} \cdot \xi; \qquad (4.7)$$

$$E_{\text{VES.SS.Neto}} = E_{\text{VES.G.}} \cdot \xi - E_{\text{SS.P.G}}, \qquad (4.8)$$

kur	EVAVES.SS.Bruto	– spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora gada
		laikā iegūtā bruto elektroenerģija, MWh;
	EVAVES.SS.Neto	– spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas servo motora dienas
		laikā iegūtā neto elektroenerģija, kWh;
	ξ	– eksperimentāli noteiktais enerģijas ieguvums, izmantojot spārnu
		iestatīšanas lenka regulēšanas sistēmu.

Aprēķiniem tiek izvēlētas tirgū pieejamas sešas VAVES, kurās būtu iespējams izmantot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu. Šīm VAVES ir 3 spārni un to profils ir tuvināts NACA0012 vai NACA0018 profilam (4.6.tabula).

4.6. tabula

Ražotājs	VAVES	Minimālais vēja ātrums, m s ⁻¹	Nominālā darba jauda, kW	Spārnu skaits	Rotora appūtes laukums, m ²	Lietd. koef.
Inerjy	EcoVert 75	3.5	56	3	190	0.41
ROPATEC	T30 pro	4.0	30	3	100	0.32
ROPATEC	T20 pro	4.0	20	3	100	0.24
Fairwind	F100-10	2.5	10	3	100	0.32
Fairwind	F180-36	3.0	20	3	180	0.18
Fairwind	F180-50	3.0	50	3	180	0.34

Informācija par tirgū piedāvātajām VAVES, kuras iespējams aprīkot ar spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu

Izvēlētās VAVES nākotnē iespējams izmantot ar spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu. Pēc tehnisko datu apskates ir redzams, ka VAVES lietderības koeficienti ir dažādi, lai gan appūtes laukumi ir līdzīgi. Šo VAVES izmantošanas pamatā ir mērķis tuvināt eksperimentālos rezultātus un ekonomiskos aprēķinus tirgū esošajiem produktiem.



4.4. att. Plānotā VAVES saražotā elektroenerģija gada laikā

Aerodinamiskie pētījumi parādīja, ka, samazinoties VAVES rotora darba ātrgaitas koeficientam, pieaug spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas ieguvums. Pēc pētījumu rezultātiem pie $\lambda = 3.0$ teorētiskais enerģijas ieguvums $\xi = 14.4 \%$, $\lambda = 2.5$ teorētiskais enerģijas ieguvums $\xi = 28.4 \%$, $\lambda = 2.0$ teorētiskais enerģijas ieguvums $\xi = 98.9 \%$. Spārna efektīvais ātrgaitas koeficients ir atkarīgs no VAVES rotora dizaina un parametriem. Salīdzinot saražotās enerģijas izmaiņas pie iepriekš minētajiem ātrgaitas koeficientiem un vēja ātruma 4 m·s⁻¹ redzams, ka procentuālais ieguvums visām VAVES ir vienāds un absolūtais enerģijas ieguvums ir atkarīgs no VAVES jaudas (4.5. att.).



4.5. att. Elektroenerģijas ieguvums, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, pie vēja ātruma 4 m·s⁻¹ MWh

Palielinoties vidējam vēja ātrumam uz 5 m·s⁻¹, VAVES saražotais kopējais elektroenerģijas daudzums un papildus iegūtās enerģijas daudzums arī ir pieaudzis. Nodrošinot VAVES darbam lielāku vidējo vēja ātrumu, tiek pozitīvi ietekmēts saražotais enerģijas daudzums, papildus iegūtais enerģijas daudzums no spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas, kā arī samazināts spārnu iestatīšanas leņķa atmaksāšanās periods (4.6. att.).



4.6. att. Elektroenerģijas ieguvums, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, pie vēja ātruma 5 m·s⁻¹

Latvijas teritorijās, kur vidējais vēja ātrums ir 6 m·s⁻¹ VAVES saražotais elektroenerģijas daudzums ir pieaudzis atkarībā no VAVES nominālās jaudas. Pastāvīgi strādājot pie lielākiem vēja ātrumiem, padara VAVES daudz lietderīgāku un pievilcīgāku cilvēkiem, lai to iegādātos. VAVES darba režīmā, strādājot ar zemāko ātrgaitas koeficienta rādītāju, jūtami uzlabo iekārtas atmaksāšanās periodu (4.7. att.).



4.7. att. Elektroenerģijas ieguvums, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, pie vēja ātruma 6 m s⁻¹

Lai mazas jaudas VAVES ar darba jaudu no 5 kW līdz 25 kW, tiktu uzstādītas vairāk dzīvojamajās zonās, tās nepieciešams padarīt lēnākas. Tas ir izdarāms, tikai samazinot rotora rotācijas ātrumu un sākot strādāt ar zemāku ātrgaitas koeficientu. Neizmantojot spārnu leņķa regulēšanu, tas ir ekonomiski nepamatoti, jo, samazinot ātrgaitas koeficientu, tiek pasliktināti saražotās enerģijas rādītāji. Izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, ir iespējams padarīt rotora rotācijas ātrumu mazāku, saglabājot nepieciešamo VAVES lietderību. Šāds risinājums padarītu VAVES daudz drošākas un ieinteresētu daudz jaunus cilvēkus iegādāties savās mājās (4.8. att.).



4.8. att. Elektroenerģijas ieguvums izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu

Kā papildus izdevumi VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmā ir iekārtu izmaksas, mehāniskie darbi un materiāli, kā arī papildus izdevumi ekspluatācijā, apkalpojot servo motoru reduktorus vai servo mehānismu. Pamatojoties uz to, ka tirgū šāda spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma ir unikāla, tas apgrūtina analizēt iespējamos izdevumus, kas rastos, izveidojot šo sistēmu kādai esošai vai jaunai VAVES. Izdevumi ir būtiski atkarīgi no VAVES mehāniskās konstrukcijas specifiskām tehniskām īpašībām, kā arī no VAVES nominālās darba jaudas.

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas salīdzinošās izmaksas tiek noteiktas VAVES ar elektrisko jaudu līdz 20 kW un virs 20 kW. Ekonomiskā atšķirība, salīdzinot VAVES ar spārnu leņķa regulēšanu vai bez tās, ir dažās komponentēs, kas veido papildu izmaksas par spārnu regulēšanu. Spārnu regulēšanai ir papildus nepieciešamas šādas komponentes: 3 servo regulatori, 3 servo motori, servo motoru kolektori, kabeļi, mehāniskā konstrukcija, spārna konstrukcijas izmaiņa, energonodrošinājums rotorā.

VAVES ar jaudu līdz 20 kW papildus izmaksas servosistēmas uzstādīšanai būtu 5260.00 EUR, savukārt VAVES ar jaudu virs 20 kW - gandrīz divas reizes lielākas, tas ir 9820.00 EUR. Vislielākā cenas atšķirība ir par energonodrošinājumu rotorā, kas VAVES ar jaudu līdz 20 kW izmaksātu 400.00 EUR, bet VAVES ar jaudu virs 20 kW šīs izmaksas būtu 2.5 reizes lielākas - 1000.00 EUR. Vairāku komponenšu izmaksu atšķirība ir divas reizes lielāka, piemēram, trīs servo regulatori VAVES ar jaudu līdz 20 kW izmaksātu 1800.00 EUR, savukārt VAVES ar jaudu līdz 20 kW izmaksātu 1800.00 EUR, savukārt VAVES ar jaudu vairāk par 20 kW izmaksātu 3600.00 EUR. Tieši tāpat izmaksu atšķirība divas reizes, salīdzinot VAVES līdz 20 kW un vairāk par 20 kW, ir tādām komponentēm kā servo motora spraudņi, kabeļi un mehāniskā konstrukcija. Visas pārējās komponentes VAVES ar jaudu vairāk par 20 kW ir dārgākas, bet šī cenu atšķirība nav tik būtiska (4.9. att.).



4.9. att. VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izmaksas

Apskatot tikai spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas papildus izmaksas, var šķist, ka izdevīgāk jeb lētāk būtu izveidot šo sistēmu kādai no VAVES ar jaudu līdz 20 kW. Kā iepriekš apskatīts, VAVES ar lielāku jaudu ienestu vairāk elektroenerģijas, tāpēc viennozīmīgi nevar pateikt, kuras jaudas VAVES būtu ekonomiski izdevīgāk izveidot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu.

Izveidojot sistēmu VAVES ar jaudu līdz 20 kW, tā varētu kalpot aptuveni piecpadsmit gadus un šo gadu laikā būtu nepieciešams veikt apkopes sistēmas piektajā un desmitajā gadā,

kas katra izmaksātu aptuveni 460.00 EUR. Tātad, VAVES līdz 20 kW īpašniekam jārēķinās, ka no lietošanas pirmā līdz desmitajam gadam būtu jārēķinās ar ikgadējām izmaksām 92.00 EUR vērtībā un pēdējos piecus lietošanas gadus papildus izmaksu nebūtu. Kopējās apkopes izmaksas VAVES līdz 20 kW jaudai ar izveidotu spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu būtu 920.00 EUR piecpadsmit gadu laikā.

Savukārt, izveidojot sistēmu VAVES ar jaudu lielāku par 20 kW, tā varētu kalpot aptuveni divdesmit gadus, kuru laikā būtu nepieciešamas trīs apkopes. Pirmās divas apkopes, pēc uzstādīšanas piektajā un desmitajā gadā izmaksātu 620.00 EUR, savukārt pēdējā, kas būtu piecpadsmit gadus pēc uzstādīšanas, izmaksātu 840.00 EUR. Šādā gadījumā jārēķinās ar ikgadējām papildus izmaksām pirmajos desmit gados 124.00 EUR, savukārt no vienpadsmitā līdz piecpadsmitajam gadam papildus izmaksas katru gadu būtu 168.00 EUR un pēdējos piecus lietošanas gadus nebūtu papildu izmaksu. Kopējās apkopes izmaksas VAVES vairāk par 20 kW jaudu ar izveidotu spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu būtu 2080.00 EUR divdesmit gadu laikā.

Trīs VAVES vidējie rādītāji par iespējamo iegūstamo enerģiju, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, parāda, ka sistēmas izveidošanas izmaksas ir pārāk lielas, lai VAVES, kas strādā ar augstu ātrgaitas koeficientu, kas vienāds ar 3, tās atpelnītu savā ekspluatācijas laikā (4.10. att.).

Lai iegūtu iespēju ātrāk atgūt investētos līdzekļus, tad ir nepieciešami lielāki vidējā vēja rādītāji, vai arī nepieciešams izmantot VAVES ar zemākiem ātrgaitas koeficientiem. Samazinoties ātrgaitas koeficientam, ekonomiskais ieguvums pieaug, un atmaksāšanās periods samazinās pat līdz 2 gadiem pie vidējā vēja ātruma 6 m·s⁻¹ un līdz 4 gadiem pie vidējā vēja ātruma 5 m·s⁻¹ (4.10. att.).



4.10. att. VAVES spārnu iestatīšanas sistēmas atpelnīšanas analīze ar VAVES jaudu < 20 kW

1 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 4 m·s⁻¹, $\lambda = 3.0$, $\xi = 14.4$ %; 2 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 5 m·s⁻¹, $\lambda = 3.0$, $\xi = 14.4$ %; 3 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, $\lambda = 3.0$, $\xi = 14.4$ %; 4 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 4 m·s⁻¹, $\lambda = 2.5$, $\xi = 28.4$ %; 5 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 5 m·s⁻¹, $\lambda = 2.5$, $\xi = 28.4$ %; 6 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, $\lambda = 2.5$, $\xi = 28.4$ %; 7 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 4 m·s⁻¹, $\lambda = 2.0$, $\xi = 98.9$ %; 8 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 5 m·s⁻¹, $\lambda = 2.0$, $\xi = 98.9$ %; 9 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, $\lambda = 2.0$, $\xi = 98.9$ %; 9 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, $\lambda = 2.0$, $\xi = 98.9$ %; 9 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, $\lambda = 2.0$, $\xi = 98.9$ %; 10 - VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izstrādes izmaksas.

Uzstādot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu VAVES ar jaudu lielāku par 20 kW, atmaksāšanās rādītāji uzlabojas. Iekārtas izmaksas pieaugušas par 93 %, salīdzinot ar VAVES pie jaudas, kas mazāka par 20 kW. Saražotās enerģijas daudzuma pieaugums ir pietiekams, lai uzlabotu atmaksāšanās periodu. Izteikti atmaksāšanās periods ir uzlabojies VAVES ar augstākiem ātrgaitas koeficientiem. Piecu gadu laikā atpelnītos jau lielāks daudzums iespējamu risinājumu pie mazākiem ātrgaitas koeficientiem (4.11. att.).



4.11. att. VAVES spārnu iestatīšanas sistēmas atpelnīšanas analīze ar VAVES jaudu > 20 kW

1 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 4 m s⁻¹, λ = 3.0, ξ = 14.4%; 2 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 5 m·s⁻¹, λ = 3.0, ξ = 14.4%; 3 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, λ = 3.0, ξ = 14.4%; 4 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 4 m·s⁻¹, λ = 2.5, ξ = 28.4%; 5 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 5 m·s⁻¹, λ = 2.5, ξ = 28.4%; 6 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, λ = 2.5, ξ = 28.4%; 7 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 4 m·s⁻¹, λ = 2.0, ξ = 98.9%; 8 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 5 m·s⁻¹, λ = 2.0, ξ = 98.9%; 9 - Papildus iegūtās enerģijas ieguvums v = 6 m·s⁻¹, λ = 2.0, ξ = 98.9%; 10 - VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izstrādes izmaksas.

Lai precīzāk apskatītu atmaksāšanās laiku, ņemsim par piemēru VAVES, kas atmaksājas visīsākajā termiņā un ienes vislielāko peļņu, jo tām vidējais vēja ātrums bijis 6 m \cdot s⁻¹. Lai noteiktu atmaksāšanās laiku, to nav iespējams aprēķināt ar matemātisku formulu, jo atmaksāšanās laiks jāapskata no naudas plūsmas skatu punkta.

Iepriekš izskatīts, ka VAVES, kuru jauda lielāka par 20 kW, aprīkošanai ar spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu nepieciešami pirmreizējie ieguldījumi 9820.00 EUR. Ņemot vērā, ka katru gadu nav eksluatācijas izdevumu, bet tie rodas katru piekto gadu, šīs izmaksas tiek uzkrātas katru gadu. Pirmos desmit gadus ikgadējās ekspluatācijas izmaksas ir 124.00 EUR, savukārt no vienpadsmitā līdz piecpadsmitajam ekspluatācijas gadam, šīs izmaksas ir 168.00 EUR, kopā VAVES kalpošanas laikā 2080.00 EUR. Iespējamā peļņa no elektroenerģijas iegūšanas pie dažādiem rotācijas ātrumiem un vidējiem vēja ātrumiem atšķiras.

	Gadi						
Nosaukums	1	2	3	4	5		
Aprīkošanas izmaksas, EUR	9820.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Ekspluatācijas izmaksas, EUR	124.00	124.00	124.00	124.00	124.00		
Potenciālais ieguvums EcoVert 75, 6 m·s ⁻¹ , $\lambda = 2.0$, $\xi = 98.9\%$	7897.43	7897.43	7897.43	7897.43	7897.43		
Peļņa	-2046.57	5726.86	13500.29	21273.72	29047.15		
Potenciālais ieguvums F180-50, 6 m·s ⁻¹ , $\lambda =$ 2.0, $\xi = 98.9\%$	6157.07	6157.07	6157.07	6157.07	6157.07		
Peļņa	-3786.93	2246.14	8279.21	14312.28	20345.35		
Potenciālais ieguvums T30 pro, 6 m·s ⁻¹ , λ = 2.0, ξ = 98.9%	3114.40	3114.40	3114.40	3114.40	3114.40		
Peļņa	-6829.60	-3839.20	-848.80	2141.60	5132.00		

VAVES atmaksāšanās periods pēc naudas plūsmas

Aprēķinot VAVES atmaksāšanās periodu pēc naudas plūsmas, ir iespēja saprast, ka aprīkot VAVES ir izdevīgi un atmaksāšanās laiks pie vidējā vēja ātruma 6 m·s⁻¹ ir īss. EcoVert 75 un F180-50 VAVES jau otrajā darbošanās gadā ir atpelnījusi sevī ieguldīto naudu. Savukārt T30 pro VAVES peļņu sasniedz ceturtajā lietošanas gadā, kas arī nav slikts rādītājs. No aprēķiniem secināms, ka aprīkotas spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu VAVES ir pelnošākas un spēj gūt peļņu ne tikai par papildus uzstādīto aprīkojumu, bet noteikti spēj veikt ieguldījumu VAVES atmaksas tempā.

4. nodaļas kopsavilkums un secinājumi

- Pēc 2015.gada datiem Latvijā bija 294994 mājsaimniecības, kuras gada laikā vidēji patērēja vairāk nekā 2000 kWh elektroenerģijas, katra ar kopējo elektroenerģijas patēriņu 1182850.525 MWh. Mājsaimniecības ar šādu elektroenerģijas patēriņu ir iespējamie potenciālie VAVES iegādes klienti.
- 2. NACA0018 un NACA0012 spārnu profiliem, izmantojot eksperimentālos datus, noteikta spārna inerces momenta atkarība no hordas un spārna garuma. Funkcija $J_{sp} = 0.0018 \cdot c^{3.5155} \cdot 1$ ar determinācijas koeficientu $R^2 = 0.996$ parāda to, ka spārna inerces moments ir cieši atkarīgs no šiem parametriem un, palielinoties spārna hordas izmēram, palieninās tā inerces moments.
- Pie vienādiem NACA0018 un NACA0012 spārnu profilu ģeometriskajiem parametriem ir iespējamas dažādas spārna masas atkarībā no spārna konstrukcijā izmantotajiem materiāliem, kas būtiski iespaido VAVES inerces momentu un tās reakciju uz slodzes un vēja ātruma izmaiņu.

- 4. Spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas servo motora nepieciešamās jaudas atkarība no spārna inerces momenta tika noteikta eksperimentālajos pētījumos. Pētījumu datu apstrādes rezultātā tika sastādīts empīrisks vienādojums $P_{ss} = 0.7343 \cdot J_{sp}^{0.3813}$, kurš ar augstu precizitāti ($R^2 = 0.9975$) apraksta servomotora jaudas izvēles nosacījumu atkarībā no spārna inerces momenta.
- 5. Strādājot tuvāk cilvēku dzīvesvietām, nepieciešams samazināt VAVES rotācijas frekvenci, tādā veidā nodrošinot augstāku drošību un lielāku komfortu iedzīvotājiem. To var panākt, samazinot ātrgaitas koeficientu.
- 6. Ekonomiskā analīze parāda, ka VAVES ar samazinātu ātrgaitas koeficientu lielāku efektu dod spārnu leņķa aktīvās regulēšanas sistēmas uzstādīšana, kurā ieguldīto līdzekļu atmaksāšanās laiku nosaka gan VAVES ātrgaitas koeficients, gan gada vidējais vēja ātrums. Atkarībā no gada vidējā vēja ātruma pie racionāli izvēlēta ātrgaitas koeficienta papildus kapitālieguldījumi var atmaksāties 2 līdz 7 gados, kas apliecina šādas sistēmas izmantošanas lietderību.

SECINĀJUMI

- 1. Veiktie eksperimentālie un simulācijas pētījumi apliecina, ka VAVES energoefektivitāti var uzlabot ar rotora spārnu leņķa nepārtrauktu regulēšanu atkarībā no vēja virziena, rotora pagrieziena leņķa un rotācijas ātruma, izmantojot adaptīvu servo sistēmu.
- 2. VAVES ar elektrisko jaudu līdz 50 kW, pateicoties to iespējai strādāt ar mazākiem vējiem, ar mazākiem ātrgaitas koeficientiem, ir pierādījis savu pārākumu pār HAVES. VAVES energoefektivitāte ir patreizējais pielietošanas trūkums. Izmantojot jaunu tehnoloģiju spārnu appūtes leņķa regulēšanā, tas dotu VAVES iespēju uzlabot lietderības koeficentu, panākot lielāku saražotās enerģijas daudzumu.
- 3. Izmantojot VAVES simulācijas modeli, ir iespējams uzlabot VAVES tehnoloģiju pārbaudi projektēšanas un izstrādes režīmā, tādā veida samazinot izstrādes laiku iekārtu eksperimentālajā režīmā. Izmantojot simulācijas modeļus, ir iespējams atrast nepieciešamos vadības sistēmas regulatoru parametrus spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmā, nodrošinot sistēmas pamatiestatījumus.
- 4. Spārnu iestatīšanas leņķa servo motora uzdevuma izpildes uzlabošanai, izmantojot izstrādāto simulācijas modeli, tika iegūta korekcijas skaitļa funkcija kā apsteidzoša rotora pagrieziena leņķa aprēķins. Simulācijas rezultāti parāda, ka VAVES, strādājot pie vēja ātruma 6 m·s⁻¹, bez apsteidzošas signāla saites spārna iestatīšanas leņķa uzdevuma izpildes determinācijas koeficients ir R² = 0.9687. Izmantojot apsteidzošo rotora pozīcijas aprēķinu, uzdevuma izpilde uzlabojas un R² = 0.9993
- 5. Eksperimentālie pētījumi pierāda, ka simetriskam spārna profilam, kam rotācijas ass ir novietota 0.25 % hordas garuma no spārna priekšgala, aerodinamiskais slodzes spēks uz spārna rotācijas asi neatkarīgi no vēja ātruma nepastāv, ja relatīvais appūtes leņķis ir robežās no - 20 ° līdz + 20 °. Tas nozīmē, ka servo mehānisms netiek pakļauts papildus aerodinamiskajam slodzes griezes momentam.
- 6. Izmantojot izstrādāto simulācijas modeli MATLAB, *Simulink* vidē veiktais pētījums par VAVES appūtes leņķa ietekmi uz saražoto elektroenerģiju parāda, ka neatkarīgi no VAVES rotācijas ātruma un ātrgaitas koeficienta, izmantojot spārna profilu NACA0018 efektīvākais relatīvais appūtes leņķis $\beta = 16^{\circ}$.
- 7. Aerodinamisko spēku vektoru aprēķinu metodes priekšrocība ir tāda, ka tā dod iespēju vadības sistēmā cikliski pārrēķināt spārna leņķa iestatīšanas uzdevumu atkarībā no mainīgā vēja ātruma, rotora pagrieziena leņķa, rotācijas ātruma un spārna ģeometriskajiem parametriem.
- 8. Simulācijas rezultāti parāda, ka VAVES ar rotora diametru 10 m un ātrgaitas koeficientu 3 pie nominālā vēja ātruma 10 m·s⁻¹, jauns spārna leņķa uzdevums tiek iestatīts katras 2.5 ms. Lai spārnu leņķa regulēšanas servo sistēmas modelis adekvāti simulētu šādu ātru pārejas procesu, tās servo motora modelī jāietver gan elektrisko, gan mehānisko laika konstanti.
- 9. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas ātrdarbības uzlabošanai nepieciešams izvēlēties servo mehānismu bez reduktora. Stenda pētījumi parāda, ka servo mehānisma bez reduktora uzdevuma izpildes, determinācijas koeficients ir augsts ($R^2 = 0.85 \dots 0.99$), turpretī servo mehānismam ar reduktoru uzdevuma izpildes determinācijas koeficients ir būtiski zemāks sakarā ar pazeminātu ātrdarbību ($R^2 = 0.026 \dots 0.228$ strādājot ar slodzi, $R^2 = 0.6286 \dots 0.943$ strādājot bez slodzes).
- 10. Ar simulācijas modeli veiktie pētījumi par VAVES rotora inerces ietekmi uz saražotās elektroenerģijas daudzumu apliecina, ka rotora inerciālās masas samazināšana var uzlabot VAVES kopējo saražoto enerģijas daudzumu. Simulācijas modelis uzrāda, ka VAVES ar nominālo elektrisko jaudu 20 kW, samazinot rotora inerci no 5000 kg·m² līdz 2000 kg·m², strādājot diennakti ar vidējo vēja ātrumu 5 m·s⁻¹, var saražot papildus 4.2 kWh elektroenerģijas.

- 11. VAVES spārna inerces moments ir cieši atkarīgs no spārna hordas un spārna konstrukcijas. Spārna inerces momenta atkarība no spārna garuma ir lineāra. Spārna inerces momenta atkarība no spārna masas ir nosakāma pēc eksperimentos noteiktās empīriskās funkcijas $J_{sp} = 0.0017 \cdot m_{sp}^{1.98}$. Servo motora spārna iestatīšanas leņķa regulēšanai nepieciešamo jaudu atkarībā no spārna inerces momenta ir noteikta pēc šāda empīriska vienādojuma $P_{ss} = 0.7343 \cdot J_{sp}^{0.3813}$ ar determinācijas koeficientu $R^2 = 0.9975$.
- 12. VAVES spārnu iestatīšanas leņķa servosistēmas izstrādei būtu nepieciešami vidēji 5260.00 EUR stacijai ar jaudu zem 20 kW un 9820.00 EUR stacijai ar jaudu virs 20 kW. Analizējot iespējamo saražoto VAVES papildus elektroenerģiju un investētās ierīkošanas izmaksas, jāņem vērā arī papildus izdevumi regulārajām apkopēm, kuras izmaksā vidēji 124 EUR gadā. Ar šādu nosacījumu VAVES spārnu regulēšanas sistēmas atpelnīšanās laiks zem 5 gadiem iespējams pie vidējiem vējiem, kas ir lielāki par 6 m·s⁻¹, vai VAVES ir nepieciešams ar lēngaitas rotoru, kam darba ātrgaitas koeficients λ <= 2.0.</p>
- 13. Apstiprinās izvirzītā hipotēze, ka vertikālās ass vēja stacijas energoefektivitāti var paaugstināt, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, kas ar adaptīvu vadības programmu spēj veikt spārnu leņķa aktīvu regulēšanu pie nestacionāra vēja ātruma un tā radītās aerodinamiskās slodzes uz regulējamo spārnu, kā arī pie nestacionāra VAVES rotora rotācijas ātruma.

PRIEKŠLIKUMI

- 1. Izmantojot dažādu ražotāju izstrādātos servo regulatorus, veikt dziļāku analīzi dažādo servo regulatoru vadības algoritmu ietekmē uz izpildāmā uzdevuma rezultātiem, jo patreizējie pētījumi parādīja, ka leņķa uzdevuma izpilde cieši korelē ar servo regulatora iekšējo vadības ķēdes algoritmu.
- 2. Veikt simulācijas modeļa aprobāciju ar izveidotu precīzu darbā aprakstītu mehānisko un elektrisko konstrukciju VAVES. Tas dotu iespēju pārliecināties par iepriekš pārbaudītu simulācijas modeļu adekvātu funkcionalitāti vienotā simulācijas sistēmā.
- Padziļināti izpētīt un izstrādāt vadības algoritmu, kas nodrošinātu VAVES darbu, pārsniedzot tā nominālo elektrisko jaudu, tādā veidā padarot VAVES konstrukciju par ļoti izdevīgu apgabalos, kur ir novērojami regulāri vēja ātruma kāpumi.

INFORMĀCIJAS AVOTI

- 1. ABB (2011) Technical Guide No. 7 Dimensioning of a Drive System. [Online] [cited 11.10.2016]. Available: https://library.e.abb.com/public/a3ef20fdc69ccc9ac12578 800040ca95/ABB_Technical_guide_No_7_REVC.pdf
- 2. ABB (s.a.) *ABB Motion Control Drives*. [Online] [05.02.2017]. Available: https://library.e.abb.com/public/a56cb4e915dbc494c1257a330050184a/EN_ACSM1_fl yer_REVF.pdf
- Abbas F.A.R., Abdulsada M.A. (2010) Simulation of Wind-Turbine Speed Control by MATLAB. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 5, p. 1793-8163.
- 4. Abdessamad B., Salah K., Mohamed C.E. (2013) Design and Modelling of DC/ DC Boost Converter for Mobile Device Applications. *International Journal of Science and Technology*, Vol. 2, No. 5, p. 394-401.
- Abo-Khalil A.G. (2010) Maximum Power Point Tracking Based on Sensorless Wind Speed Using Support Vector Regression. In: *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10): Proceedings*, December 19-21, 2010. Egypt, Cairo: Cairo University, pp. 678-682.
- 6. Achari K.N., B. Gururaj, D.V.A. Kumar, M.V. Kumar. (2012) A Novel MATLAB/Simulink Model of PMSM Drive using Direct Torque Control with SVM. *International Journal of Computer Applications*, No. 1, p. 34-39.
- 7. Ahlqvist E., Nilsved J. (2015) *Characterisation and Control of a Permanent Magnet Synchronous Machine during Open Circuit Fault*. [Online] [cited 29.12.2016]. Available: http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/222065/222065.pdf
- 8. Ahmed M.H., Wael A.F., Osama A.M. (2011) Modelling and Control of Direct Driven PMSG for Ultra Large Wind Turbines. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, p. 11-27.
- Aho J., Buckspan A., Laks J., Fleming P., Jeong Y., Dunne F., Churchfield M., Pao L, Johnson K. A (2012) Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency through Active Power Control. In: 2012 American Control Conference: Proceeding, June 27-29, 2012. Canada, Montreal, pp. 3120-3131.
- 10. Airfoil Tools (2011) NACA 0018 NACA 0018 Airfoil. [Online] [cited 15.08.2016]. Available: http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il
- Alison R. (2008) Wind Power: Are Vertical Axis Wind Turbines Bette. [Online] [cited 25.07.2016]. Available: http://www.db.lv/laikraksta-arhivs/zinas/alsunga-top-jauns-veja-parks-257737
- Alnasir Z.A., Almarhoon A.H. (2012) Design of Direct Torque Controller of Induction Motor (DTC). *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 2, p. 54-70.
- Anani N.A., Al-Kharji O.A., Ponnapalli P.V., Al-Araji S.R., and Al-Qutayri M.A. (2011) Synchronization of s Single-Phase Photovoltaic Generator with the Low Voltage Utility Grid. In: ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability ES 2011: Proceeding, August 7-10, 2011. USA, Washington, p. 7.
- 14. Andrew K., Wenyan L., Zhe S. (2010) Dynamic Control of Wind Turbines. *Renewable Energy*, Vol. 35, Iss. 2, p. 456-463. doi:10.1016/j.renene.2009.05.022
- 15. Andrej J.F., Stephen T. (2009) Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine. *Wind Engineering*, Vol. 33, No. 3, p. 237-246.
- Ar ES atbalstu izstrādāts jauna vēja ģeneratora prototips [tiešsaiste] [skatīts 01.08.2016.]. Pieejams: http://www.delfi.lv/bizness/uznemumi/ar-es-atbalstu-izstradats-jauna-vejageneratora-prototips.d?id=31673935
- Asress M.B., Aleksandar S., Dragan K., Slobodan S. (2013) Numerical and Analytical Investigation of Vertical Axis Wind Turbine. *FME Transactions*, Vol. 41, No. 1, p. 49-58.
- B&R (S.a.) Auto-tuning Fully Automatic Controller Configuration. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: https://www.br-automation.com/cs/perfection-inautomation/innovations-2015/acopos-p3/acoposmulti/auto-tuning-fully-automaticcontroller-configuration/
- Barambones O. (2012) Sliding Mode Control Strategy for Wind Turbine Power Maximization. *International Journal Energies*, Vol.5, Nr. 7, p. 2310-2330. doi:10.3390/en5072310
- Bartłomiej B., Omelian P. (2013) Mathematical Model of Synchronous Generator for Diagnostics and Settings Tests of Marine Avrs. Zeszytyproblemowe – Maszyny Elektryczne, No. 100, p. 181-184.
- 21. Bati A.F., Brennan F. (2012) The Modelling, Simulation and Control of a 50 kW Vertical Axis Wind Turbine. *Asian Transactions on Engineering*, Vol. 2, No. 4, p. 14-24.
- 22. Bencherif M., Brahmi N.B., Chikhaoui A. (2014) Optimum Selection of Wind Turbines. *Science Journal of Energy Engineering*, Vol. 2, Iss. 4. doi: 10.11648/j.sjee.20140204.12.
- Benedict M., Lakshminarayan V., Pino J., Chopra I. (2013) Fundamental Understanding 23. of the Physics of a Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine with Dynamic Blade Pitching: Experimental and Computational An Approach. In: 54th and AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, Materials Conference: Proceeding, April 8-11, 2013. USA, Boston, p. 1-21.
- 24. Bezrukovs V., Zacepins A., Komashilovs V. (2015) Assessment of Wind Shear and Wind Energy Potential in The Baltic Sea Region of Latvia. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, No. 2, p. 26-39.
- 25. Bharanikumar R., Yazhini A.C., Nirmal K.A., (2010) Modelling and Simulation of Wind Turbine Driven Permanent Magnet Generator with New MPPT Algorithm. *Asian Power Electronics Journal*, Vol. 4, No. 2, p. 52-58.
- Biegel B., Juelsgaard M., Kraning M., Boyd S., Stoustrup J. (2011) Wind Turbine Pitch Optimization. In: 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of 2011 IEEE Multi-Conference on Systems and Control: Proceeding, September 28-30, 2011. USA, Denver, p. 1327-1334.
- BNS (2002) Grobiņā darbu sāk Baltijā lielākā vēja elektrostacija. [tiešsaiste] [skatīts 21.07.2016]. Pieejams: http://www.delfi.lv/bizness/biznesa_vide/gro bina-darbu-sak-baltija-lielaka-veja-elektrostacija.d?id=4276353
- 28. Bonfiglioli (S.a.) *Pitch Control.* [Online] [cited 25.11.2016]. Available: http://www.bonfiglioli.com/en/wind/applications/pitch-control/
- 29. Bugimir M. (2013) *Hollow-bore Servo Motors* [Online] [cited 03.02.2017]. Available: http://www.motioncontroltips.com/hollow-bore-servomotors/
- 30. Bursa A., Micallef D. (2012) *Effects of Geometry and Tip Speed Ratio on the HAWT Blade's Root flow*. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/555/1/012002/pdf
- 31. Carlin P.W., Laxson A.S., Muljadi E.B. (2001) The History and State of the Art of Variable-Speed wind TurbineTechnology. *Wind Energy*, Vol. 6, p. 129-159.
- Centrālās statistikas pārvade (2015) Enerģētika galvenie rādītāji [tiešsaiste] [skatīts 20.07.2016.]. Pieejams: http://www.csb.gov.lv/statistikas-temas/energetika-galvenie-raditaji-30331.html
- 33. Centrālās statistikas pārvade (2016a) *Atjaunīgo Energoresursu patēriņš pēdējos desmit gados pieauga par 12%* [tiešsaiste] [skatīts 20.07.2016.]. Pieejams: http://www.csb.gov.lv/statistikas-temas/energetika-galvenie-raditaji-30331.html

- 34. Centrālās statistikas pārvalde (2016) *Elektroenerģijas ražošana, imports, eksports un patēriņš (milj. kilovatstundas)* [tiešsaiste] [skatīts 26.07.2016]. Pieejams: http://www.csb.gov.lv/statistikas-temas/energetika-galvenie-raditaji-30331.html
- 35. Centrālās statistikas pārvalde (s.a.) Mājsaimniecību sadalījums pēc gada vidējā elektroenerģijas patēriņa (%) [Tiešsaiste] [17.03.2017]. Pieejams: http://data.csb.gov.lv/pxweb/lv/vide/vide_energ_pat/0301.px/?rxid=add53256-b774-4f55-8166-5e7683a56f2f
- 36. Centrālās statistikas pārvalde (s.a.a) Mājsaimniecību kopējais skaits un mājsaimniecības vidējais lielums regionos, republikas pilsetas, laukos/pilsetās [Tiešsaiste] [17.03.2017]. Pieejams: http://data.csb.gov.lv/pxweb/lv/Sociala/Sociala ikgad iedz iedzskaits/IS0211.px/?r

http://data.csb.gov.lv/pxweb/lv/Sociala/Sociala_ikgad_iedz_iedzskaits/IS0211.px/?r xid=7ee5bb2b-7c93-4ccb-8a34-1aa4ade09cc3

- 37. Centurion Energy (2013) *Types of Wind Turbines*. [Online] [cited 21.07.2016]. Available: http://centurionenergy.net/types-of-wind-turbines
- Chaitep S., Chaichana T., Watanawanyoo P., Hirahara H. (2011) Performance Evaluation of Curved Blades Vertical Axis Wind Turbine. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 57, No. 3, p. 435-446.
- 39. Channaveer P.M., Rao K.U. (2012) Simulation of a Buck-Boost Single Phase Voltage Source Inverter for Distribution Generation Systems. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol. 2, Iss. 5, p. 3628-3632.
- 40. Chen N., Yu J.L. (2008) Active Power Dispatch and Regulation of Wind Power System Based on Electrical Dissecting Information of Electric Power Network. *Proceedings of the CSEE*, Vol. 28, p. 51-58.
- 41. Chertok D.H., Hablanian D., Mctaggart P., Bennett K. (2004) Development of a Direct Drive Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbines, doi:10.2172/834551, No. 1, p. 23-52.
- 42. Chougule P. (2014) Overview and Design of Self-Acting Pitch Control Mechanism for Vertical Axis Wind Turbine Using Multi Body Simulation Approach. [Online] [cited 04.02.2017]. Available: http://iopscience.iop.org/article/10.10 88/1742-6596/524/1/012055/pdf
- 43. Codina G.O. (S.a) *State Space Fundamentals* [online] [cited 06.10.2016]. Available: http://dmi.uib.es/~goliver/SS/Teoria/T2_SS_Fundam.pdf
- 44. D'Ambrosio M., Medaglia M. (S.a.) Vertical Axis Wind Turbines: History, Technology and Applications. [Online] [cited 06.09.2016]. Available: http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:326493/fulltext01
- 45. Damodarareddy K., Nagarajaram P., Asif M., Ramu B. (2013) Back-to-Back PWM Converter Fed PMSG Wind Turbine System. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, Vol. 3, Iss. 7, p. 2250-3021.
- 46. David A. (S.a.) *Models of Lift and Drag Coefficients of Stalled and Unstalled Airfoils in WindTurbines and Wind Tunnels*. [Online] [cited 05.10.2016]. Available: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090001311.pdf
- Davood S., Ahmad S., Pourya A., Ali A.A. (2013) Aerodynamic Design and Economical Evaluation of Site Specific Small Vertical Axis Wind Turbines. *Applied Energy*, Vol. 101, p. 765-775.
- 48. Deglaire P., Engblomb S., Ågrena O., Bernhoff H. (2009) Analytical Solutions for a Single Blade in Vertical Axis Turbine Motion in Two-Dimensions. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 28, Iss. 4, p. 506-520.
- 49. Dodd J. (2014) *First 2MW Vertiwind vertical-axis Prototype Built*. [Online] [cited 25.07.2016]. Available: http://www.db.lv/laikraksta-arhivs/zinas/alsunga-top-jauns-veja-parks-257737

- 50. Dvorak P. (2009) *Hydraulic Pitch Control for Wind-Turbine Blades* [online] [cited 04.02.2017]. Available: http://www.windpowerengineering.com/design/mechanic al/gearboxes/hydraulic-pitch-control-for-wind-turbine-blades/
- Eiropas savienības oficiālais vēstnesis (2009) Eiropas Parlamenta un Padomes Direktīva 2009/28/EK [tiešsaiste][skatīts 21.07.2016.]. Pieejams: http://www.wipo.int/e docs/lexdocs/laws/lv/eu/eu212lv.pdf
- 52. Eitel E. (2014) Basics of Rotary Encoders: Overview and New Technologies [online] [cited 04.02.2017]. Available: http://machinedesign.com/sensors/basics-rotary-encoders-overview-and-new-technologies-0
- 53. Elektrum (2016) *Elektroenerģijas ražošana*. [tiešsaiste] [skatīts 21.07.2016]. Pieejams: https://www.elektrum.lv/lv/majai/par-mums/elektroenergijas-razosana/
- 54. Elkhoury M., Kiwata T., Aoun E. (2015) Experimental and Numerical Investigation of a Three-Dimensional Vertical-Axis Wind Turbine with Variable-Pitch. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 139, p. 111-123.
- 55. Ellis G. (S.a.) Achieve Superior Servo Performance, Quickly, with Auto-Tuning. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: http://www.kollmorgen.com/uploadedFiles/koll morgencom/Service_and_Support/Knowledge_Center/White_Papers/KOL-Auto-Tuning-WP-04-11-vSEO.pdf
- 56. Encyclopaedia of Alternative Energy (2011) *Horizontal-axis Wind Turbine* (*HAWT*) [online] [cited 21.07.2016]. Available: http://www.daviddarling.info/encyclope dia/H/AE_horizontal-axis_wind_turbine.html
- 57. Enefit (2015) *Līdz ar divu Eesti Energia vēja parku atvēršanu Baltijas vēja enerģijas ražošanas kapacitāte pieaugs par 11 %* [tiešsaiste] [skatīts 21.07.2016.]. Pieejams: https://www.enefit.lv/jaunumi/-/news/2013/09/05/baltijas-veja-energijas-razosanas-kapacitate-pieaug-par-11-procentiem
- 58. Eriksson S., Kjellin J., Bernhoff H. (2013) Tip Speed Ratio Control of a 200 kW VAWT with Synchronous Generator and Variable DC Voltage. *Energy Science & Engineering*, Vol. 1, Iss. 3, p. 135-143. DOI: 10.1002/ese3.23.
- 59. Estonian Wind Power Association (S.a.) *Wind Energy in Estonia*. [Online] [cited 20.07.2016]. Available: http://www.tuuleenergia.ee/en/windpower-101/statistics-of-estonia/
- 60. Fekril H., Nejad S.M.H. (2015) No Load Performance of a Novel Synchronous Permanent Magnet Generator with Soft Magnetic Composite. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 5, Iss. 3, p. 24-29.
- 61. Fiedler A.J., Tullis S. (2009) Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine. *Wind Engineering*, Vol. 33, No. 3, p. 237-246.
- Fiona D., Lucy Y.P., Alan D.W., Bonnie J., Neil K. (2011) Adding Feed Forward Blade Pitch Control to Standard Feedback Controllers for Load Mitigation in Wind Turbines. *Journal Mechatronics*, Vol. 21, Iss. 4, p. 682-690. doi:10.1016/j.mechatronics.2011.02.011.
- 63. Gardiner G. (2011) *HAWTs vs. VAWTs* [online] [cited 26.07.2016]. Available: http://www.compositesworld.com/articles/hawts-vs-vawts
- 64. Gerakopulos R., Boutilier M.S.H., Yarusevych S. (2010) Aerodynamic Characterization of a NACA 0018 Airfoil at Low Reynolds Numbers. **In**: *40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit: Proceeding*, June 28-July 1, 2010. USA, Chicago. p. 14.
- 65. Gerald M.A., Franz A.P., Mary A.C., James E.S. (2010) Lift Augmentation for Vertical Axis Wind Turbines. *International Journal of Engineering*, Vol.4, Iss. 5, p. 430-442.
- 66. Guerts B., Ferreira S.C., Bussel G. (2010) Aerodynamic Analyse of a Vertical Axis Wind Turbine in a Diffuser. **In:** 3rd EWEA Conference "Torque 2010: The Science of making Torque from Wind": Proceeding, June 28-30, 2010. Greece, Crete, p. 12-18.

- 67. Habtamu B., Yingxue Y. (2011) Effect of Camber Air Foil on Self Starting of Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 3, p. 302-312.
- 68. Halstead R. (2011) VAWT vs. HAWT Technology [online] [cited 26.07.2016]. Available: http://www.onlinetes.com/article/wind-sail-type-vertical-axis-wind-turbines-111011/
- 69. Hameed M.S., Afaq S.K. (2013) Design and Analysis of a Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbine Blade Using Analytical and Numerical Techniques. *Ocean Engineering*, Vol. 57, p. 248-255.
- Hameed M.S., Shahid F. (2012) Evaluation of Aerodynamic Forces over a Vertical Axis Wind Turbine Blade through CFD analysis. *Applied Mechanical Engineering*, Vol. 2, Iss. 1. doi:10.4172/2168-9873.1000116.
- 71. Hamid A.H.A., Rashid H., Noh M.H.M., Nayan M.A.M. (2012) Comparative Analysis of Straight-Bladed and Curved-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. *Advances in Mathematical and Computational Methods*, Vol. 2, No. 1, p. 46-51.
- 72. Helmy S., Amged S. E-Wakeel, Abdel Rahman M., Badr M. A. L. Real-Time Modelling and Control of Synchronous Generator Based on PC. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, p. 93-98.
- 73. Hendrik V., Peter S., Luc D., Alex Van den B. (2012) A Combined Wye-Delta Connection to Increase the Performance of Axial-Flux PM Machines With Concentrated Windings. *Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 2, p. 403-410.
- 74. Hu P. (2009) Reliability Evaluation of Generating Systems Containing Wind Power and Energy Storage. *Journal of Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 3, p. 783-791.
- 75. Huynh Q.M., Nollet F., Essounbouli N., Hamzaoui A. (2011) Control of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine for Stand-Alone System Using Fuzzy Logic. *Atlantis Press*, No. 1, p. 720-727.
- 76. Ihor Shchur. (2011) Estimation of Electromagnetic Compatibility and Efficiency of the adjustable Load Systems of PMSG in Wind Turbines. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), No. 1, p. 85-90.
- 77. Inergy (s.a.) *Ecovert* 75 *Wind Turbine*. [Online] [cited 06.10.2016]. Available:http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090001311.pdf
- International Energy Agency (s.a.) Wind Energy Roadmap. [Online] [cited 29.12.2016]. Available:https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmap s/wind_roadmap_foldout.pdf
- 79. Ion N., Radu B., Marcel S. (2012) Small Power Wind Turbine. *Incas Bulletin*, Vol. 4, Iss. 1, p. 135-142.
- Islam M., Ting D.S.K., Fartaj A. (2008) Aerodynamic Models for Darrieus Type Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbines. *Journal Elsevier – Renewable And Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, Iss. 4, p. 1087-1109. doi:10.1016/j.rser.2006.10.023.
- 81. Yang C.X., Li S.T. (2013) Effect of Moment of Inertia to H Type Vertical Axis Wind Turbine Aerodynamic Performance. In: 6th International Conference on Pumps and Fans with Compressors and Wind Turbines: Proceeding, September 19-22, 2013. China, Pekin, p. 1-40.
- Ying T., Ying Z., Ling C. (2017) A Novel Digital Filter Control Technique of Servo System. [Online] [05.02.2017]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/64 14140/?reload=true
- 83. Johan M., Jan P., Sjoerd W.H.H. (2006) Inertial Response of Variable Speed Wind Turbines. *Electric Power Systems Research*, Vol. 76, p. 980-987.
- 84. Kesnere R. (2016) *Nauda jāpelna, ne jāapgūst* [tiešsaiste] [skatīts 01.08.2016.]. Pieejams: http://www.diena.lv/uznemeja-diena/nauda-japelna-ne-jaapgust-14134773
- 85. Khan S.A., Rajkumar R.K., Aravind C.V. (2013) Performance Analysis of 20 Pole 1.5 KW Three Phase Permanent Magnet Synchronous Generator for Low Speed Vertical Axis Wind Turbine. *Energy and Power Engineering*, No. 4B, Vol. 5, p. 423-428.

- 86. Kodati P., Erkkinen T. (2017) *Design and PLC Implementation of Complex Industrial Control Strategies*. [Online] [01.01.2011]. Available: https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/design-and-plcimplementation-of-complex-industrial-control-strategies.html
- Kollmorgen (2010) Motion Control: Integrate Model-Based Machine Design with Motion Control. [Online] [cited 04.02.2010]. Available: http://www.kollmorgen.co m/uploadedFiles/kollmorgencom/Service_and_Support/Knowledge_Center/Articles/Mo del_Based_Design_11-09_Design_World_eprint.pdf
- 88. Kollmorgen (2011) AKD[™] User Guide. [Online] [cited 11.10.2016]. Available: http://www.kollmorgen.com/uploadedFiles/Products/Drives/AC_Servo_Driv es/AKD/AKD_Manuals/903-200006-00%20AKD%20User%20Guide en Rev%20C.pdf
- 89. Kollmorgen (s.a.) *Two-in-One:* Servo Drive with Programmable Control [Online] [cited 04.02.2017]. Available: http://www.kollmorgen.com/en-us/products/drives/servo/akd-pdmm/_literature/pdmm-brochure_reva_en/
- 90. Kursītis G. (2012) Atklāj jaudīgāko vēja parku Latvijā. Plānotās investīcijas 200 milj. eur. [tiešsaiste] [21.07.2016.]. Pieejams: http://www.db.lv/foto-video/foto/papildinataatklaj-jaudigako-veja-parku-latvija-planotas-investicijas-200-milj-eiro-370759
- 91. Latvijas Republikas tiesību akti (2012) *Sistēmas pieslēguma noteikumi elektroenerģijas ražotājiem* [tiešsaiste] [skatīts 21.07.2016]. Pieejams: http://likumi.lv/doc.php?id=244670
- 92. Latvijas Republikas tiesību akti (2016) *Enerģētikas attīstības pamatnostrādes 2016.-*2020. gadam [tiešsaiste] [skatīts 26.07.2016.]. Pieejams: http://likumi.lv/doc.php?id=280236
- 93. Latvijas Republikas tiesību akti (2016a) *Elektroenerģijas tirgus likums* [tiešsaiste] [skatīts 19.07.2016.]. Pieejams: http://likumi.lv/doc.php?id=108834
- 94. Latvijas Republikas tiesību akti (2016b) *Grozījumi elektroenerģijas tirgus likumā* [tiešsaiste] [skatīts 19.07.2016.]. Pieejams: http://likumi.lv/ta/id/282649-grozijumielektroenergijas-tirgus-likuma
- 95. Latvijas valsts standarts (2008) *LVS EN 50438:2008*. [tiešsaiste] [skatīts 21.07.2016.]. Pieejams: https://www.lvs.lv/en/products/previewPdf/23859?format=pdf
- 96. Latvijas Vēstnesis (2002). *Par vēja pelnītu naudu Nr.114* [tiešsaiste] [skatīts 01.08.2016.]. Pieejams: https://www.vestnesis.lv/ta/id/65192
- 97. Latvijas Vides, ģeoloģijas un metereoloģijas centrs (2015). *Gaujas upju baseinu apgabala apsaimniekošanas plāns* [tiešsaiste] [skatīts 27.12.2016.]. Pieejams: https://www.meteo.lv/fs/CKFinderJava/userfiles/files/Vide/Udens/Ud_apsaimn/UBA% 20plani/Gaujas_upju_baseinu_apgabala_apsaimniekosanas_plans_2016_-2021_g__final.pdf
- 98. Lēvalde A. (2011) *Alsungā top jauns vēja parks* [tiešsaiste] [skatīts 25.07.2016.]. Pieejams: http://www.db.lv/laikraksta-arhivs/zinas/alsunga-top-jauns-veja-parks-257737
- 99. Lundin A. (s.a.) *Efficiency Analysis of a Planetary Gearbox* [online] [cited 27.12.2016]. Available: http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:397023/fulltext01.p df.
- 100. Mehmood N., Liang Z., Khan J. (2012) CFD Study of NACA 0018 for Diffuser Design of Tidal Current Turbines. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: http://maxwellsci.com/print/rjaset/v4-4552-4560.pdf
- 101. MHI Vestas Offshore Wind (S.a.) V164-8.0 MW Breaks World Record for Wind Energy Production. [Online] [cited 21.07.2016]. Available: http://www.mhivestasoffsho re.com/v164-8-0-mw-breaks-world-record-for-wind-energy-production/
- 102. Miau J.J., Liang S.Y., Yu R.M., Hu C.C., Leu T.S., Cheng J.C., Chen S.J. (2012) Design and Test of a Vertical-Axis Wind Turbine with Pitch Control. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 225, p. 338-343.

- 103. Minh Q.D., Francesco G., Sonia L., Marco M., Kim H.L. (2015) Improving Transient Stability in a Grid-Connected Squirrel-Cage Induction Generator Wind Turbine System Using a Fuzzy Logic Controller. *Energies*, Vol. 8, Iss. 7, p. 6328-6349. doi:10.3390/en8076328.
- 104. Ministru kabineta rikojums (2016) Par Enerģētikas attīstības pamatnostādnēm 2016.-2020. Gadam [Tiešsaiste] [16.03.2017]. Pieejams: https://m.likumi.lv/doc.php?id=280236
- 105. Mittal R., Sandu K.S., Jain D.K. (2009) Isolated Operation of Variable Speed Driven PMSG for Wind Energy Conversion System. *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 3, p. 269-273.
- 106. Mohamed M.H. (2012) Performance Investigation of H-Rotor Darrieus Turbine with New Airfoil Shapes. *Energy*, Vol. 47, Iss. 1, p. 522-530. doi:10.1016/j.energy.2012.08.044.
- 107. Muhamed M.A.B., Hayat N., Uzair F.A., Ali Z., Rehan J., Zahid H. (2012) Vertical Axis Wind Turbine – A Review of Various Configurations and Design Techniques. *Renewable* and Sustainable Energy, Vol. 16, Iss. 4, p. 1926-1939. doi:10.1016/j.rser.2011.12.004.
- 108. Muljadi E., Butterfield C.P. (2001) Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation. In: Presented at the 2001 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Phoenix: Proceeding, October 3-7, 2001. USA, Arizona, p. 240-246
- 109. Muljadi E., Gevorgian V., Singh M. (2012) Understanding Inertial and Frequency Response of Wind Power Plants. In: *IEEE Symposium on Power Electronics and Machines in Wind Applications Denver: Proceeding*, July 16-18, 2012. USA, Denver, p. 1-8.
- 110. Muszyński M., Mikołajuk K., Toboła A. (2013) Control of DC Capacitor Voltage in Active Power Filters. *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 4, p. 247-247.
- 111. Naik R., Desai S.S. (2015) Comparative Study of Closed and Open Loop Control Employing UPF Control Strategy for Standalone Variable Speed Wind Turbine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 5, Iss. 3, p. 73-77.
- 112. Nikitins L., Stecurins A., Scerbina A. (2012) Vertical Axis Wind Turbine [online] [cited 01.08.2016]. Available: http://www.google.com.na/patents/CA2433905C ?cl=enCached4
- 113. Novak P., Ekelund T., Jovik I., Schmidtbauer B. (1995) Modeling and Control of Variable-Speed Wind-Turbine Drive-System Dynamics. In: *1994 IEEE Conference on Control Applications: Proceeding*, August 24-26, 1995, USA, Baltimore, p. 28-38.
- 114. Official Statistics Portal of Republic of Lithuania (S.a.) [online] [cited 20.07.2016]. Available: http://osp.stat.gov.lt/en/temines-lenteles24
- 115. Paluszek A.M., Bhatta P. (2012) Vertical Axis Wind Turbine Using Individual Blade Pitch and Camber Control Integrated With Matrix Converter. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: http://www.google.de/patents/US8193657
- 116. Pandey K.K., Tiwari A.N. (2012) Maximum Power Point Tracking of Wind Energy Convertion System with Parmanent Magnet Syncronous Generator. *International Journal* of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1, Iss. 5, p. 3609-3620. doi: 10.1109/TPEL.2011.2162251.
- 117. Pankovska E., Dieziņa S. (2012) ES Miljonus grib atgūt tiesā [tiešsaiste] [skatīts 01.08.2016.]. Pieejams: http://www.db.lv/laikraksta-arhivs/zinas/es-miljonus-grib-atgut-tiesa-374106
- 118. Qasim A.Y., Usubamatov R., Zain Z.M., Quad G.A. (2012) The Parameters Effect on Power Coefficient Vertical Axis Wind Turbine. *IIUM Engineering Journal*, Vol. 13, No. 1, p. 59-66.
- 119. Qingan L., Takao M., Yasunari K., Junsuke M., Kazuma F., Masayuki Y. (2015) Effect of Number of Blades on Aerodynamic Forces on a Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine. *Energy*, Vol. 6, No. 1, p. 68-74.

- 120. Radhunathan V.R. (2011) Self Governing Pitch Control Mechanism in Vertical Axis Wind Turbine. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: http://www.google.com/pate nts/WO2011158256A2?cl=en&hl=de
- 121. Ragheb M. (2014) Wind Energy Conversion Theory, Betz equation. [Online] [cited 22.07.2016]. Available: http://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%2 0Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation n.pdf
- 122. Rakesh R., Pawan M., Mahendra A. (2014) Analysis of Blade Design, Power Output and Efficiency of a Horizontal Axis Wind Turbine on a Working Model. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 4, Iss. 12, p. 508-510.
- 123. Ramasamy N. (S.a.) *Vertical Axis Wind Turbines*. [Online] [cited 22.07.2016]. Available: http://www.conserve-energy-future.com/VerticalAxisWindTurbines.php
- 124. Ran L., Rumby J.R., Tavner. P.J.I. (2004) Use of Turbine Inertia for Power Smoothing of Wind Turbines with a DFIG. In: *Proceedings of International conference "11th International Conference on Harmonics and Quality of Power": Proceeding*, September 12-15, 2004. USA, Lake Placid, p. 106-111.
- 125. REUK (2014) What is a Savonius Wind Turbine-Savonius (VAWT). [Online] [cited 22.07.2016]. Available: http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm
- 126. Rolan A., Luna A., Vazquez G., Aguilar D., Azevedo G. (2009) Modelling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009): Proceeding*, July 5-8, 2009. Korea, Seoul: Seoul Olympic Parktel, pp. 734-739.
- 127. Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija (s.a.) *Elektroenerģija* [Tiešsaiste] [17.03.2017]. Pieejams: https://www.sprk.gov.lv/lapas/Elektroenergija#Tarifi87
- 128. Sachin K., Jaspreet K. (2012) Implementation of Pitch Control of Wind Turbine Using Simulink. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, Vol. 1, Iss. 4, p. 196-200.
- 129. Sadales tīkls (2016a) *Mikroģeneratora pieslēgums* [tiešsaiste] [skatīts 19.07.2016.]. Pieejams: https://www.sadalestikls.lv/lat/klientiem/pieslegumi/mikrogene ratoru_pieslegums/mikrogeneratora_piesleguma_ierikosana/
- 130. Sadales tīkls (2016b) *Elektroenerģijas NETO norēķinu sistēma* [tiešsaiste] [skatīts 19.07.2016.]. Pieejams: https://www.sadalestikls.lv/lat/klientiem/pieslegumi/mi krogeneratoru pieslegums/neto_uzskaite_mikrogeneratoriem/
- 131. Sadales tīkls (s.a.a) *Elektroenerģijas tirgotāji mājsaimniecībām* [Tiešsaiste] [16.03.2017].Pieejams:http://www.sadalestikls.lv/lat/klientiem/tirgus/tirgus_majsaimnieci bam/elektroenergijas_tirgotaji/
- 132. Sadales tīkls. (s.a.b) *Atzīto mikroģeneratoru un invertoru saraksts* [tiešsaiste] [skatīts 25.07.2016.]. Pieejams: https://www.sadalestikls.lv/lat/klientiem/pieslegumi/mi krogeneratoru pieslegums/mikrogeneratoru invetoru saraksts/
- 133. Scerbina A. (2009) Vertical Axis Rotor-type Wind Turbine. [Online] [cited 01.08.2016]. Available: https://www.google.com/patents/US20090202356
- 134. Schlecht B., Mtauweg S., Rosenlöcher T. (2011) Dynamic Design of an Electromechanical Pitching System for Wind Turbinesby Means of Multi-Body Simulation. *SIMPACK News*, No. 1, p. 24-27.
- 135. Sean A. (2013) *Motion Control System*. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: https://drc.libraries.uc.edu/bitstream/handle/2374.UC/701617/EET2013_Alle n_Sean.pdf?sequence=1
- 136. Seenews-Renewables (2015) *Nelja Energia Starts Building 60-MW Lithuanian Wind Farm.* [Online] [cited 20.07.2016]. Available: http://renewables.s eenews.com/news/nelja-energia-starts-building-60-mm-lithuanian-wind-farm-459442

- 137. Serebryakov A., Levin N., Sokolov A., Kamolins E. (2014) Efficiency Estimation for Permanent Magnets of Synchronous Wind Generators. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Vol. 51, Iss. 1, p. 21-31.
- Shires A., Kourkoulis V. (2013) Application of Circulation Controlled Blades for Vertical Axis Wind Turbines. *Energies*, Vol. 6, p. 3744-3763.
- 139. Siemens (2012) SINAMICS S120. [Online] [cited 11.10.2016]. Available: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/625/59737625/att_59993/v1/FH1_012012_e ng_en-US.pdf
- 140. Sigernes F. (S.a.) *Savonius Wind Rotor Basics*. [Online] [cited 06.09.2016]. Available: http://kho.unis.no/doc/Savonius_windrotor_basics.pdf
- 141. Singh M. (2008) Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants. [Online] [cited 26.07.2016]. Available: www.nrel.gov/docs/fy12osti/52780.pdf
- 142. Soua S., Bridge B. (2012) Statistical Analysis of Accelerometer Data in the Online Monitoring of a Power Slip Ring in a Wind Turbine. [Online] [cited 10.10.2016]. Available:http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/23/3/035006/meta
- 143. Swartz A.R., Jerome P.L., Sweetman B., Rolfes R., Zerbst S. (2012) Structural Monitoring of Wind Turbines using Wireless Sensor Networks. [Online] [cited 10.10.2016]. Available: http://www.rmsgroup.org/rms_papers/tamug_papers/other/lync h_cambridge_08.pdf
- 144. Taher G.A., Ahmad M.A., Mahdi S.Al-A., M. Hassan. (2015) Effect of Number of Blades and Blade Chord Length on the Performance of Darrieus Wind Turbine. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*, Vol. 2, No. 1, p. 16-25.
- 145. Tang C., Pathmanathan M., Soong W.L., Ertugrul N. (2008) Effects of Inertia on Dynamic Performance of Wind Turbines. In: 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08): Proceeding, December 14-17, 2008, Australia, Sydney, pp. 1-6.
- 146. Thakur T., Gupta S.K. (2012) Modelling of a Stand-Alone Induction Generator on Load Using Matlab Simulink. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, Vol. 3, p. 729-733.
- 147. *The European Wind Energy Association* (S.a.). [Online] [cited 21.07.2016]. Available: http://www.ewea.org/
- 148. The Renewable Energy Website (S.a.) *Wind Turbine Tip Ratio*. [Online] [cited 25.11.2016]. Available: http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/wind-turbine-tip-speed-ratio/
- 149. Tilak T., Shailendra K.G. (2012) Modeling of a Stand-Alone Induction Generator on Load Using MATLAB Simulink. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, Vol. 3, No. 4, p. 729-733.
- Tin W.M., Myo M.A. (2008) Simulation of Synchronous Machine in Stability Study for Power System. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 39, p. 128-133.
- 151. Vertical axis wind turbine (2012) [14.02.2012] [cited 01.08.2016] Available: http://www.google.com.na/patents/CA2433905C?cl=enCached4
- 152. Vpturbines (s.a.) Variable pitch blade control explained. [Online] [cited 22.07.2016]. Available: http://www.vpturbines.com/html/tech.html
- 153. Vilsbøll N., Pinegin A., Goussarov D., Bugge J. (1996) The Experience of Designing and Testing a 20 kW Multi Pole Permanent Magnet Generator for Wind Turbines. *DEWI Magazin*, No. 9, p. 74-83.
- 154. Wang H., Yang M., Niu L., Xu D. (2010) Current-Loop Bandwidth Expansion Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. In: 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications: Proceeding, June 15-17, 2010. Taiwan, Taichung, p. 1340-1345.

- 155. Widodo W.S., Chin A.C., Haeryip S., Yuhazri M.Y. (2012) Design and Analysis of 5 KW Savonius Rotor Blade. *Global Engineers & Technologists Review*, Vol. 2, No. 8.
- 156. WindEurope (2016) *Wind Power Statistics*. [Online] [cited 21.07.2016]. Available: https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-power-2015-european-statistics/
- 157. Wu D., Wang Z. (2007) Modelling and Design of Control System for Variable Speed Wind Turbine in All Operating Region. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development,* Vol. 1, Iss. 3, p. 62-68.
- 158. Zhang L., Pei Y., Liang Y., Zhang F., Wang Y., Meng J., Wang H. (2012) Design and Implementation of Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine with Collective Pitch Control. In: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation: Porceeding*, August 2, 2012. China, Beijing, p. 1258-1263.

PIELIKUMS

1. pielikums



07.09.2014. datuma eksperimentālie vēja mērījumu rezultāti





2. att. Vēja vidējās vērtības sadalījums



3. att. Vēja virziena momentānie mērījumi



4. att. Vēja rozes diagramma







1. att. Vēja ātruma mērījumi bez datu apstrādes



2. att. Vēja ātruma vidējās vērtības sadalījums



3. att. Vēja virziena momentānie mērījumi



4. att. Vēja rozes diagramma





07.12.2014. datuma eksperimentālie vēja mērījumu rezultāti





2. att. Vēja ātruma vidējās vērtības sadalījums



3. att. Vēja virziena momentānie mērījumi



4. att. Vēja rozes diagramma





Spārna profila NACA0018 aerodinamisko koeficientu CL un CD raksturlīknes

VES spārna aerodinamiskā spēka aprēķina programmas komandrinda MATLAB *Editor*

📝 Edit	or - C:\Users\Toms\Google Drive\Doktorantura\D	isertacija\2Nodala\MatlabBloki\AerodinamikasSimulacija\AerodynamicalVectorCaluclationEditor.m*	⊙ ×
Ae	rodynamicalVectorCaluclationEditor.m* 🛛 🔀 🕇 🕂		
1	%Iel?d?t visus simulacijai nep	ieciešamos datus	
2 -	load('AlphaVector.mat')		
3 -	load('NACA0018 Re Alpha CD.mat')		
4 -	load ('NACA0018 Re Alpha CL.mat')		
5 -	load('ReVector.mat')		
6	\$Simul?cijas main?gle un konstantes		
7 -	sim BladeLenght = 10;		
8 -	vAIR = 1.460e-5;	<pre>%Kin?tisk? viskozit?te m2*s-1</pre>	
9 -	RoAir = 1.225;	%Gaisa bl?vums, kg*m3	
10 -	sim TSR = $3.5;$	% Turb?nas ?trgaitas koeficients	
11 -	sim TurbineRadius = 5;	%Turb?na Radius, m	
12 -	sim BladeChord = 0.77;	%Turb?nas sp?rna platums, m	
13 -	sim AmbientTemperature = 10;	<pre>%?ra gaisa temperat?ra, C</pre>	
14 -	<pre>scrsz = get(0,'ScreenSize');</pre>		
15 -	sim WindSpeed = 20;	%V?ja atrums	
16 -	sim SimPeriod = 360;		
17 -	sim Ts = 0.001;		
18 -	sim Slope = 1;		
19	%Trub?nas le??iskais ?trums		
20 -	<pre>sim Omega = (sim TSR*sim WindSpeed)/sim TurbineRadius;</pre>		
21	%Reinoldsa Skaitis		
22 -	<pre>sim ReNumber =(sim WindSpeed*sim BladeChord*((sim Omega*sim TurbineRadius)/sim WindSpeed))/vAIR;</pre>		
23	%Turb?nas ?eometrisk? konstante		
24 -	<pre>sim_TurbineGeometricalCoef = sim_BladeChord*sim_BladeLenght*RoAir/2;</pre>		
25	Simul?cijas mode?a izsaukšana no EDITOR vides		
26 -	<pre>simOut = sim('AerodynamicalVectorCaluclation');</pre>		

VES rotora simulācijas modeļa State Space matricu definīcijas MATLAB Editor vidē



7. pielikums

No WXT520 saņemto datu apstrādes programmas centrālais modulis CoDeSys V2.5 FBD valodā



No WXT520 saņemto datu nolasīšanas programma CoDeSys V2.5 vides STL valodā

PROGRAM RS485

VAR

ReadComPort: SERIAL_INTERFACE; RS485CommIsOk: BOOL; RS485ErrorTON: TON; END_VAR

StringArray:=ADR(Receive.Data);
stringdone:=StringArray^;

String_all:=stringdone; Receive.Index:=0; Receive.Data:=EmptyArray; ELSE

RS485ErrorTON(IN:=(Receive.Index=0), PT:=t#5s); IF RS485ErrorTON.Q THEN RS485CommIsOk:=TRUE; ELSE RS485CommIsOk:=FALSE; END_IF

No WXT520 saņemto datu apstrādes programmas CoDeSys V2.5 IL valodā

LD	String_all				
MID	Cik,Pos_st				
ST	_ImpVar_147_203				
LD	_ImpVar_147_203				
ST	Direction_str				
LD	_ImpVar_147_203				
STRING TO WORD					
ST –	ImpVar 147 22				
LDN	VaisalaOff				
ST	ImpVarEnEno 147 282				
LD	ImpVarEnEno 147 282				
JMPCN	EnEnoLabel 282 147				
LD	ImpVar 147 22				
MOVE	F · ···				
ST	ImnVar 147 282				
EnEnol abe					
ID					
	ImpVarEnEno 147 282				
IMPCN	EnEnol abol 22 147				
	ImpVar = 147 - 282				
LD ST					
SI EnEnaLah					
	TDUE				
	IRUE				
	String_all				
FIND	"Dm="				
51	$\lim_{n \to \infty} \frac{14}{2}$				
LD	$\lim_{n \to \infty} \frac{14}{2}$				
ST	Pos_int				
LD	Pos_int				
ADD	3				
ST	_ImpVar_147_3				
LD	_ImpVar_147_3				
ST	Pos_st				
LD	String_all				
FIND	'D,Sm='				
ST	_ImpVar_147_4				
LD	_ImpVar_147_4				
ST	Cik_int				
LD	Cik int				
SUB	Pos st				
ST	ImpVar 147 5				
LD	ImpVar 147 5				
ST	Cik				
LD	String all				
MID	Cik2,Pos st2				
ST	ImpVar 147 53				
LD	ImpVar 147 53				
ST	Wind speed str				
-	r				

LD	ImpVar 147 53			
STRING 7	TO REAL			
ST –				
LDN	VaisalaOff			
ST	ImpVarEnEno 147 288			
LD	ImpVarEnEno 147 288			
JMPCN	EnEnoLabel 288 147			
LD	ImpVar 147 303			
MOVE	_ 1			
ST	ImpVar 147 288			
EnEnoLabel 288 147:				
LD	TRUE			
LD	ImpVarEnEno 147 288			
JMPCN	EnEnoLabel 289 147			
LD	ImpVar 147 288			
ST	i16 WindSpeedDirect			
EnEnoLabel 289 147:				
LD	TRUE			
LD	String all			
FIND	'Sm='			
ST	_ImpVar_147_63			
חו	ImpVar 147 63			
ST	Pos int?			
51	105_1112			
LD	Pos int?			
ADD	3			
ST	ImnVar 147 68			
~ 1				
LD	ImpVar 147 68			
ST	Pos st2			

VES eksperimentālo mērījumu reģistratora CoDeSys V2.5 vides STL programma datu reģistrēšanai MySQL datubāzē

FUNCTION BLOCK SQLStatements2St VAR INPUT aWindSpeed;aActivePower;aLabmda;aWindDirection;aTorque;aRef;aTorqueReference ;aMotorVoltage;aMotorCurrent;aTemperature;aPressure;aStatus;REAL. END VAR VAR OUTPUT Statement1:STRING;Statement2: STRING;Statement3: STRING; END VAR VAR aReference: REAL; sTemp1:sTemp2:sTemp3:sTemp4:sTemp5:sTemp7:sTemp6:Constant1:Constant2:Constant41 :Constant61:sTemp8:sTemp9:sTemp10:sTemp11:sTemp12:sTemp13:sTemp1a:sTemp2a:sTe mp3a:sTemp4a:sTemp5a:sTemp6a:sTemp7a:sTemp8a:sTemp9a:sTemp10a:sTemp11a:STRI NG END VAR Constant1:='INSERT INTO fly'; Constant2:=CONCAT(Constant1, '(W,P,L,D,T,R,a1,a2,a3,a4,a5,a6) Values('); sTemp1:= CONCAT (REAL TO STRING(aWindSpeed), ', '); sTemp2:=CONCAT (sTemp1, REAL TO STRING(aActivePower)); sTemp3:=CONCAT (sTemp2, ','); sTemp4:=CONCAT (", REAL TO STRING(aLabmda)); sTemp5:=CONCAT (sTemp4, ','); sTemp6:=CONCAT (sTemp5, REAL TO STRING(aWindDirection)); sTemp7:=CONCAT (sTemp6, ','); sTemp8:=CONCAT (sTemp7, REAL TO STRING(aTorque)); sTemp9:=CONCAT (sTemp8, ','); sTemp10:=CONCAT (sTemp9, REAL TO STRING(aRef)); sTemp11:=CONCAT (sTemp10, ','); Statement1:=CONCAT (Constant2, sTemp3); Statement3:=sTemp11a; sTemp1a:= CONCAT (REAL TO STRING(aTorqueReference), ', '); sTemp2a:=CONCAT (sTemp1a, REAL TO STRING(aMotorVoltage)); sTemp3a:=CONCAT (sTemp2a, ','); sTemp4a:=CONCAT (sTemp3a, REAL TO STRING(aMotorCurrent)); sTemp5a:=CONCAT (sTemp4a, ','); sTemp6a:=CONCAT (sTemp5a, REAL TO STRING(aTemperature)); sTemp7a:=CONCAT (sTemp6a, ','); sTemp8a:=CONCAT (sTemp7a, REAL TO STRING(aPressure)); sTemp9a:=CONCAT (sTemp8a, ','); sTemp10a:=CONCAT (sTemp9a, REAL TO STRING(aStatus)); sTemp11a:=CONCAT (sTemp10a, '); ');

Optimālā spārnu iestatīšanas leņķa analīzes programma MATLAB Editor vidē

```
clear all
load('AlphaVector.mat')
load('NACA0018 Re Alpha CD.mat')
load('NACA0018 Re Alpha CL.mat')
load('ReVector.mat')
vAIR = 1.460e-5; % Kinematic viscosity m2/s
RoAir = 1.225;
                 % Air density kg/m3
sim TurbineRadius = 5:
sim TSR= 2.0;
sim WindSpeed = 10;
sim BladeChord = 1;
sim AmbientTemperature = 20;
sim TurbineBladeLenght = 10;
for k = 1:360
 sim TetaAngle = k*1;
 sim Omega=(sim TSR*sim WindSpeed)/sim TurbineRadius;
 sim ReNumber = 1000000;
 ReNumber(k)=sim ReNumber;
 sim TurbineGeometricalCoef = sim BladeChord*sim TurbineBladeLenght*RoAir;
 simOut = sim('PichAngleSearchSimulink');
 Min = min(sim AnalyseDataOut(:,4));
 Max = max(sim AnalyseDataOut(:,4));
 IndexMin = find(Min == sim AnalyseDataOut(:,4));
 IndexMax = find(Max == sim AnalyseDataOut(:,4));
 MinData(k,:) = sim AnalyseDataOut(IndexMin(1),:);
 MaxData(k,:) = sim AnalyseDataOut(IndexMax(1),:);
 MaxDataP(k,:) = sim AnalyseDataOutNoPitch(1,:);
End
 AllDataMax = MaxData;
 AllDataMax(:,5) = MaxDataP(:,1);
 AllDataMax(:,6) = MaxDataP(:,2);
 AllDataMax(:,7) = MaxDataP(:,3);
 SumPower = sum(AllDataMax(:,7));
 SumPowerP = sum(AllDataMax(:,4));
figure(1)
alpha = squeeze(AllDataMax(:,[4,end]));
plot(1:1:360,alpha)
xlabel('azimuth angle (deg)')
ylabel('Torque (Nm)')
subplot(1,2,2)
alpha = squeeze(AllDataMax(:,[2,3,6]));
plot(1:1:360,alpha)
xlabel('azimuth angle (deg)')
ylabel('Alpha (Nm)')
```



VES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modelis MATLAB Simulink vidē

Servo mehānismu eksperimentālo mērījumu apstrādes komandrinda MATLAB *Editor* pakotnē

```
clear all
sSearchMaxLevel = 50;
FileName = 'Load2.xls';
MeasureRange = '0To50';
ReadRangeStart = 5;
ReadRangeEnd = 100;
ReadRange = ReadRangeStart + ReadRangeEnd + 1;
ResultNameFall = ['FallData', MeasureRange, FileName];
ResultNameRise = ['RiseData', MeasureRange, FileName];
Numeric = xlsread(FileName);
Data(:,1) = Numeric(:,2);
Data(:,2) = Numeric(:,3);
Data(:,3) = Numeric(:,4);
Data(:,4) = Numeric(:,5);
Data(:,5) = Numeric(:,6);
Data2 = Data;
for i=1:1:10
       findarrayRise = find(Data(:,2)>5);
       findarrayFall = find(Data(:,2) < 10);
       if findarrayRise(1,1) == 1
         DataWritenOn = Data(findarrayFall(1,1)+20:length(Data), :);
         clear Data:
         Data=DataWritenOn;
         findarrayRise = find(Data(:,2)>5);
         findarrayFall = find(Data(:,2) < 10);
       end
       DataArrayRise{i} = Data(findarrayRise(1,1))-
       ReadRangeStart:findarrayRise(1,1)+ReadRangeEnd,:);
       DataWritenOn = Data(findarrayRise(1,1)+20:length(Data), :);
       clear Data:
       Data=DataWritenOn;
       findarrayRise = find(Data(:,2)>10);
       findarrayFall = find(Data(:,2) < 10);
       DataWritenOn = Data(findarrayFall(1,1)+10:length(Data), :);
       clear Data:
       Data=DataWritenOn:
end
Data = Data2;
for j=1:1:10
       if j==1
       findarrayRise = find(Data(:,2)>10);
       DataWritenOn = Data(findarrayRise(1,1)+10:length(Data), :);
       clear Data:
       Data=DataWritenOn;
       end
       findarrayRise = find(Data(:,2)>10);
```

```
findarrayFall = find(Data(:,2)<10);
       DataArrayFall{i} = Data(findarrayFall(1,1)-
       ReadRangeStart:findarrayFall(1,1)+ReadRangeEnd,:);
       DataWritenOn = Data(findarrayFall(1,1)+50:length(Data), :);
       clear Data;
       Data=DataWritenOn;
       findarrayRise = find(Data(:,2)>10);
       findarrayFall = find(Data(:,2)<10);</pre>
       DataWritenOn = Data(findarrayRise(1,1)+10:length(Data), :);
       clear Data:
       Data=DataWritenOn;
end
%Rise Data Analyse
for k=1:1:10
  Temp = DataArrayRise\{k\};
  TotalStepArrayRise(:,k)=Temp(:,1);
end
for l=1:1:ReadRange
       MeanStepRise(1,1) = mean(TotalStepArrayRise(1,:));
       ErrorBarRise(1,1) = std(TotalStepArrayRise(1,:));
end
if k == 10
  TotalStepArrayRise(:,11)=Temp(:,2);
end
TotalStepArrayRise(:,12)=MeanStepRise;
TotalStepArrayRise(:,13)=ErrorBarRise;
%Fall Data analyse
for u=1:1:10
  Temp = DataArrayFall{u};
  TotalStepArrayFall(:,u)=Temp(:,1);
end
for c=1:1:ReadRange
  MeanStepFall(c,1) = mean(TotalStepArrayFall(c,:));
  ErrorBarFall(c,1) = std(TotalStepArrayFall(c,:));
end
if u == 10
  TotalStepArrayFall(:,11)=Temp(:,2);
end
TotalStepArrayFall(:,12)=MeanStepFall;
TotalStepArrayFall(:,13)=ErrorBarFall;
LastRiseData(:,1) = DataArrayRise\{1, 2\}(:,1);
LastRiseData(:,2) = MeanStepRise(:,1);
LastRiseData(:,3) = ErrorBarRise(:,1);
LastFallData(:,1) = DataArrayFall{1, 2}(:,1);
LastFallData(:,2) = MeanStepFall(:,1);
LastFallData(:,3) = ErrorBarFall(:,1);
sSearchTimeLevelRise = sSearchMaxLeve * 0.63;
sSearchTimeLevelFall = sSearchMaxLeve * 0.27;
FindTime = find(sSearchTimeLevelRise < TotalStepArrayRise(:,12));
```

ProcessTimeRise = ((FindTime(1,1)-5) * 10)/1000;FindTime = find(sSearchTimeLevelFall > TotalStepArrayFall(:,12)); ProcessTimeFall = ((FindTime(1,1)-5) *10)/1000; Time = (((1:length(TotalStepArrayRise(:,12)))-1)).'; SimulinkDataRef = Time/100; SimulinkDataRef(:,2) = TotalStepArrayRise(:,11); SimulinkDataOut = Time/100; SimulinkDataOut(:,2) = TotalStepArrayRise(:,12); %%% Do the file saving xlswrite(ResultNameFall,TotalStepArrayFall); xlswrite(ResultNameRise,TotalStepArrayRise); %%% Plot the results figure; plot(TotalStepArrayFall,'DisplayName','TotaStepArrayFall') figure; plot(TotalStepArrayRise,'DisplayName','TotaStepArrayRise');

FlyFox-20kW rotora inerces analīzes komandrinda MATLAB Editor pakotnē

clear TableWithProducedEnergy for t=1:400 clear MathMOdelEnergyOut MathModelTSROut MathModelEffOut FinalInertiaOFSystem = 2000 + (t*10); for k=1:3531 Inertia(k,2) = FinalInertiaOFSystem; end %Run The simulation of the mathlab sim('RuralEngineering2014 CodeRunV2E0.slx') %Take the data from the runed arrea RealEnergy = MathMOdelEnergyOut(3531,2); ModeledEnergy = MathMOdelEnergyOut(3531,1); SimulationMeanCp = mean(MathModelEffOut); SimulationMeanTSR = mean(MathModelTSROut); TableWithProducedEnergy(t,1) = RealEnergy; TableWithProducedEnergy(t,2) = ModeledEnergy; TableWithProducedEnergy(t,3) = FinalInertiaOFSystem; TableWithProducedEnergy(t,4) = SimulationMeanCp; TableWithProducedEnergy(t,5) = SimulationMeanTSR; TableWithProducedEnergy(t,6) = RealEnergy-ModeledEnergy; end ModeledEnergy = TableWithProducedEnergy(:,2); RealEnergy = TableWithProducedEnergy(:,1); InertiaData = TableWithProducedEnergy(:,3); SimulatedMeanCp = TableWithProducedEnergy(:,4); SimulatedMeanTSR = TableWithProducedEnergy(:,5); PowerDif = TableWithProducedEnergy(:,6); figure(1) plot(InertiaData,ModeledEnergy,'b.-') grid on xlabel('Modeled Inertia kg/m3') vlabel('Generated Energy, kWh') title('Inertia Vs Produced Energy') hold figure(2) plot(InertiaData,PowerDif,'b.-') grid on xlabel('Modeled Inertia kg/m3') ylabel('Power dif.') title('Inertia Vs Power dif.') hold

15. pielikums

Eksperimentālā spārna izstrāde



1.att. NACA0018 spārna izstrāde



2. att. Spārna eksperimentālais stends



3.att. Vēja virzības pārbaude pirms eksperimenta uzsākšanas