



Latvijas Lauksaimniecības universitāte  
Latvia University of Agriculture  
Tehniskā fakultāte  
Faculty of Engineering



*Mg.sc.ing.* **Toms Komass**

**VERTIKĀLĀS ASS VĒJA ROTORA  
ENERGOEFEKTIVITĀTES UZLABOŠANA AR  
SPĀRNU LEŅĶA AKTĪVO REGULĒŠANU**

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

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

*Dr.sc.ing.* zinātniskā grāda iegūšanai

SUMMARY

of the Doctoral thesis for the scientific degree of *Dr.sc.ing.*

Jelgava

2017

**Promocijas darbs izstrādāts** Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Enerģētikas institūtā no 2011. gada 1. septembra līdz 2017. gada 1. aprīlim.

**Zinātniskais vadītājs:**

Dr.habil.sc.ing., profesors (*emeritus*) **Andris Šnīders**.

**Darba konsultants:**

Dr.sc.ing., docents **Vitālijs Osadčuks**.

**Oficiālie recenzenti:**

Dr.sc.ing. **Imants Ziemeļis** – Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors;

Dr.sc.ing. **Kārlis Ketners** – Rīgas Tehniskās universitātes profesors;

Dr.sc.ing. **Steven D Keen** – Vēja elektro staciju, dinamisko procesu simulācijas speciālists.

**Promocijas darba aizstāvēšana notiks** Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauksaimniecības nozares Lauksaimniecības inženierzinātnes apakšnozares promocijas padomes atklātajā sēdē 2017. gada 29. augustā, plkst. 10:00, Jelgavā, J. Čakstes bulv. 5, Tehniskajā fakultātē 429.auditorijā.

**Ar promocijas darbu, pielikumu un kopsavilkumu var iepazīties** Latvijas Lauksaimniecības universitātes Fundamentālajā bibliotēkā, Jelgavā, Lielā iela 2.

**Atsaukmes sūtīt** Promocijas padomes sekretāram, profesoram Dr.sc.ing. Imantam Ziemeļim, LLU Tehniskā fakultāte, J. Čakstes bulv. 5, Jelgava, LV-3001.

**Promocijas padomes priekšsēdētājs:**

Dr.sc.ing. profesors **Juris Priekulis**

**The promotion work has been developed** in the Energetics Institute of Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering during the period 01 September 2011 to 01 April 2017.

**Scientific supervisor:**

Dr.habil.sc.ing., Professor (*emeritus*) **Andris Šnīders**.

**Work adviser:**

Dr.sc.ing., Associate Professor **Vitālijs Osadčuks**.

**Official reviewers:**

Dr.sc.ing. **Imants Ziemeļis** – Professor of Latvia University of Agriculture;

Dr.sc.ing. **Kārlis Ketners** – Professor of Riga Technical University;

Dr.sc.ing. **Steven D Keen** – specialist in wind power stations, dynamic processes simulation.

**Defence of the promotion work will take place** at open session of Agricultural Engineering Branch Promotion Council of Latvia University of Agriculture on 29 August 2017 at 10:00 a.m., Auditorium 429, Faculty of Engineering, 5 J.Čakstes Blvd, Jelgava.

**The promotion work, its appendix and summary are available for viewing** in Fundamental Library of Latvia University of Agriculture, 2 Lielā Street, Jelgava.

**Please address you references to** Dr.sc.ing. Imants Ziemeļis, Secretary of Promotion Council, LUA Faculty of Engineering, 5 J.Čakstes Blvd, Jelgava LV-3001.

**Chairman of Promotion Council:**

Dr.sc.ing. Professor **Juris Priekulis**

## SATURS / CONTENT

PĒTĪJUMA AKTUALITĀTE .....	5
PĒTĪJUMU HIPOTĒZE, MĒRKIS UN UZDEVUMI .....	6
ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA .....	7
Publikācijas vispārārtzītos recenzējamos zinātniskajos izdevumos.....	7
Ziņojumi zinātniskajās konferencēs .....	7
Pētniecisko rezultātu patenti .....	8
1. VĒJA TEHNOLOĢISKO IEKĀRTU IZSTRĀDES UN IZMANTOŠANAS PROBLEMĀTIKA .....	8
1.1. VES konstruktīvo risinājumu salīdzinošā analīze .....	9
1.2. VES vadības sistēmas analīze, spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas apskats .....	10
2. VAVES TEHNOLOĢISKO IEKĀRTU SIMULĀCIJAS MODEĻU IZSTRĀDE.....	12
2.1. Vēja ātruma eksperimentālie mērījumi .....	13
2.2. Aerodinamiskā griezes momenta simulācijas modeļa izstrāde.....	15
2.3. VAVES rotora simulācijas modeļa izstrāde.....	17
2.4. Mehāniskā pārvada simulācijas modeļa izstrāde .....	19
2.5. PMSG simulācijas modeļa izstrāde.....	20
3. SPĀRNA AERODINAMISKO LEŅĶU REGULĒŠANAS SISTĒMAS UN SIMULĀCIJAS MODEĻA IZSTRĀDE.....	20
3.1. Spārnu leņķa aktīvās regulēšanas sistēmas konstruktīvā risinājuma analīze un izstrāde .....	21
3.2. Servo regulatora vadības algoritmu analīze un izstrāde simulācijas modelī.....	23
3.3. Spārna optimālo aerodinamisko leņķu aprēķins.....	24
3.4. Spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas simulācijas modeļa izstrāde .....	26
4. SPĀRNU IESTATĪŠANAS LEŅĶA REGULĒŠANAS SISTĒMAS EKONOMISKAIS PĀMATOJUMS .....	29
4.1. Servo motora jaudas izvēles analīze.....	29
4.2. Atmaksāšanās perioda analīze.....	30
SECINĀJUMI.....	31

URGENCY OF THE STUDY .....	33
HYPOTHESIS, OBJECTIVE AND TASKS OF THE STUDY .	34
APPROBATION OF SCIENTIFIC WORK .....	35
Works published in generally accepted reviewable scientific publications.....	35
Reports at scientific conferences.....	35
Study-related patents.....	36
1. PROBLEMS IN DEVELOPMENT AND USE OF WIND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT .....	36
1.1. Comparative Analysis of WPP Design Solutions .....	37
1.2. Analysis of WPP Control System, Review of Pitch Control System .....	38
2. DEVELOPMENT OF VAWPP TECHNOLOGICAL EQUIPMENT SIMULATION MODEL.....	40
2.1. Experimental Measurements of Wind Speed .....	41
2.2. Development of Aerodynamic Torque Simulation Model ...	43
2.3. Development of VAWPP Rotor Simulation Model.....	45
2.4. Development of Mechanical Transmission Simulation Model .....	47
2.5. Development of PMSG Simulation Model.....	48
3. DEVELOPMENT OF BLADE AERODYNAMIC PITCH CONTROL SYSTEM AND SIMULATION MODEL.....	48
3.1. Development and Analysis of Blade Pitch Active Control System Design Solution.....	49
3.2. Servo Regulator Control Algorithm Analysis and Development in Simulation Model.....	51
3.3. Blade Optimal Aerodynamic Pitch Estimate .....	52
3.4. Development of Blade Pitch Control Simulation Model .....	54
4. ECONOMIC FEASIBILITY OF BLADE PITCH CONTROL SYSTEM .....	57
4.1. Analysis of Servomotor Power Choice .....	57
4.2. Analysis of Payback Period.....	58
CONCLUSIONS.....	59
INFORMĀCIJAS AVOTI / REFERENCES .....	61

## PĒTĪJUMA AKTUALITĀTE

Enerģētikas nozīmei Latvijā ir padziļināta uzmanība, pamatojoties gan uz pašu izvirzītiem mērķiem, gan Eiropas Savienības izvirzītiem uzdevumiem, kas ir saistīti ar energoneatkarību, energoefektivitāti un atjaunojamo energo resursu 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.

Latvija pēc atjaunojamo energo resursu (turpmāk – AER) izmantošanas ierindojas 3. vietā aiz Austrijas un Zviedrijas, pateicoties lielajam hidroelektrostaciju saražotajam apjomam. Upju resursi Latvijas teritorijā ir pietiekami noslogoti, lai vēl vairāk paplašinātu elektroenerģijas ieguvi hidroelektrostacijās, 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.

Decentralizēto VES izmantošanu raksturo daži pozitīvi faktori, piemēram, nav nepieciešams būvēt jaudīgas elektropārvades līnijas un ir iespējams veikt elektroenerģijas ražošanu tuvāk patērētājam decentralizēti visā valsts teritorijā.

Lai veicinātu vēja staciju uzstādīšanu, ir nepieciešams izstrādāt normatīvos dokumentus, kas norādītu visu kārtību, atvieglojumus un citus rīcības plānus personām, kuras ir gatavas investēt vēja staciju iegādē un uzstādīšanā. Lai Latvijas valsts iegūtu vairāk, labākais risinājums būtu izmantot esošo zinātnisko un ražošanas potenciālu, lai valsts mērķu labā izstrādātu savu vēja staciju, 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.

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 specifiski un ar lielu potenciālu nākotnē.

Pamatojoties uz nozīmīgumu vēja enerģētikas attīstības veicināšanā, tika izvēlēta promocijas darba tēma „Vertikālās ass vēja rotora spārnu leņķa aktīva regulēšana energoefektivitātes uzlabošanai”, kā darba mērķi izvirzot, izstrādāt un izpētīt jaunu tehnoloģisko risinājumu simulācijas modeli vertikālās ass vēja staciju spārnu leņķa regulēšanas sistēmā vertikālās ass vēja rotora lietderības koeficienta uzlabošanai.

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 un pētījumu metodes.

## PĒTĪJUMU HIPOTĒZE, MĒRKIS UN UZDEVUMI

**Zinātniskā darba hipotēze:** vertikālās ass vēja elektrostacijas lietderības koeficients var tikt paaugstināts, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, kas ar atbilstošu vadības programmu veiku spārnu leņķa regulēšanu pie nestacionāra rotora rotācijas ātruma un mainīgas vēja ātruma uz regulējamo spārnu radītas aerodinamiskās slodzes.

Izvirzītās hipotēzes sevī iekļauj vertikālās ass vēja stacijas darba rakstura izpēti, spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas izpēti, nestacionārās vēja plūsmas enerģijas ietekmes analīzi, turbīnas rotora inerces ietekmi uz VES 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 šādi 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 pētījumu 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 un esošajiem pētījumiem. Izstrādāt simulācijas modeli MATLAB *Simulink* vidē spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmai, validācijai izmantojot eksperimentāli iegūtos datus.

# ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA

## Publikācijas vispārārtzītos recenzējamajos zinātniskajos izdevumos

1. Komass T. (2013) Load Effect on the Dynamic Parameters of the Wind Station. **In:** *19<sup>th</sup> 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, 2013. 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”*: Proceeding, 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

1. Komass T. (2013) Load Effect on the Dynamic Parameters of the Wind Station. **In:** *19<sup>th</sup> 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.
4. Komass T. (2016) Experimental Analysis of Vertical Axis Wind Turbine

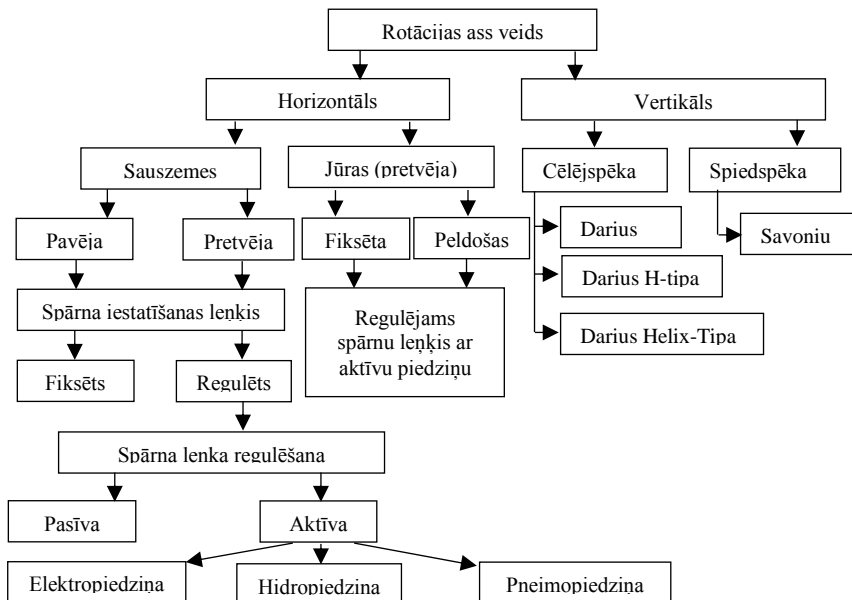
Active Pitch Control System with Permanent Magnet Synchronous Motor using MATLAB Simulink tools. **In:** 13<sup>th</sup> International Conference of young scientists on energy issues: Proceeding, May 26, 2016. Lithuania, Kauna.

## 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 Patentu Nr.14910-B, 20.12.2014.

## 1. VĒJA TEHNOLOĢISKO IEKĀRTU IZSTRĀDES UN IZMANTOŠANAS PROBLEMĀTIKA

Komerčiālās VES tiek iedalītas divās galvenajās pamatgrupās pēc rotora vārpstas rotācijas virziena: horizontālās ass un vertikālās ass. Horizontālās ass VES konstrukcija ir ievērojami daudzveidīgāka salīdzinājumā ar vertikālās ass VES. Tas izskaidrojams ar daudzu gadu laikā izveidoto pielietojumu (1.1. att.).

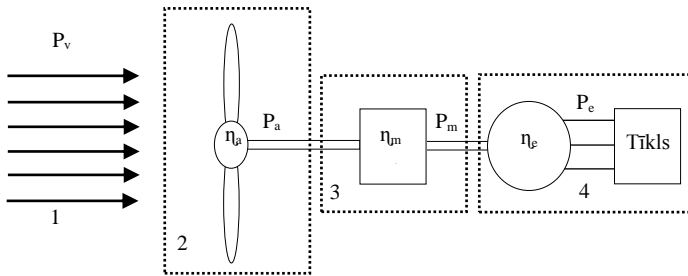


1.1. att. VES iedalījums pēc konstrukcijas



Horizontālās ass VES konstrukcijas pamatā ir propellera tipa rotors, turpretī vertikālās ass VES rotors var tikt izveidots no dažādiem spārnu konstrukcijas veidiem iedalot divās pamatgrupās: cēlējspēka un spiedspēk. Horizontālās un vertikālās ass VES iedalījums izveidojies vēsturiski, kad VES konstrukcija tika mainīta atkarībā no nepieciešamās uzstādīšanas vietas un uzstādāmās jaudas (1.1. att.).

Vēja jauda  $P_v$ , kas tiek aprēķināta pēc gaisa plūsmas 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) (1.2. att.).



1.2. att. VES enerģijas pārveide

1 – gaisa plūsma;  $P_v$  – gaisa plūsmas jauda, kW; 2 - VES rotors;  $P_a$  – rotora aerodinamiskā jauda, kW;  $\eta_a$  – aerodinamiskais lietderības koeficients; 3 – VES mehāniskais pārvads;  $P_m$  – mehāniskā jauda, kW,  $\eta_m$  – mehānisko pārvadu lietderības koeficients; 4 – VES elektroģenerators un elektroiekārtas;  $P_e$  – aktīvā elektriskā jauda, kW;  $\eta_e$  – elektriskais lietderības koeficients.

## 1.1. VES konstruktīvo risinājumu salīdzinošā analīze

Apstrādājot visu informāciju, kas ir apskatīta, tika sastādīts salīdzinājums starp horizontālās ass vēja elektrostaciju (turpmāk – HAVES) un vertikālās ass vēja elektrostaciju (turpmāk – VAVES). Priekšrocības un trūkumi tiek apskatīti divos appūtes laukuma  $S$  diapazonos,  $<100 \text{ m}^2$  un  $>100 \text{ m}^2$ . 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.

HAVES un VAVES priekšrocības vai trūkumi jāvērtē un jāsalīdzina atkarībā no konkrēta pielietojuma. Vietās ar zemākiem vēja ātrumiem lielāka priekšroka tiek dota VAVES, turpretī HAVES spēj efektīvāk strādāt pie lielākiem vēja ātrumiem. Mūsdienās lielu tirgus daļu ar appūtes laukumu līdz  $100 \text{ m}^2$

aizņem tieši VAVES, jo to īpašības vairāk piemērotas urbanizētiem vides apstākļiem (Gardiner G., 2011).

1.1. tabula

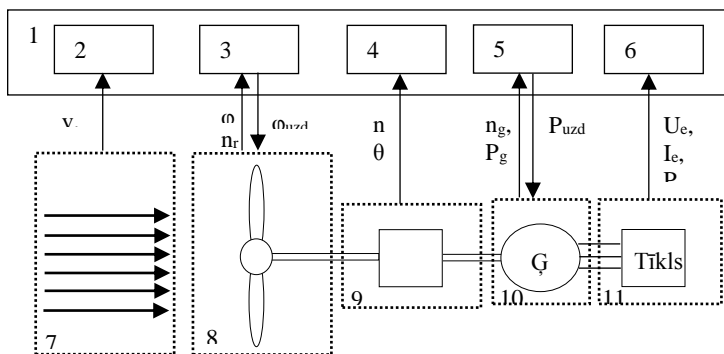
### HAVES un VAVES salīdzinājums

Rādītāji	S < 100 m <sup>2</sup>		S > 100 m <sup>2</sup>	
	Horizontāls	Vertikāls	Horizontāls	Vertikāls
Rotora veids	Nesimetrisks	Simetrisks	Nesimetrisks	Simetrisks
Vēja virziena sekošanas mehānisms	Aktīvs vai pasīvs	Netiek pielietots	Aktīvs	Netiek pielietots
Spārna iestatīšanas leņķa mehānisms	Aktīvs vai pasīvs	Netiek pielietots	Aktīvs vai pasīvs	Netiek pielietots
Trokšņa līmenis	(5 – 60 dB)	(0 – 10 dB)	(10–70 dB)	(10 – 30 dB)
v <sub>min</sub>	2.5 – 5 m·s <sup>-1</sup>	1.5 – 3 m·s <sup>-1</sup>	4.5 – 5 m·s <sup>-1</sup>	3.0 – 5 m·s <sup>-1</sup>
v <sub>max</sub>	~25 m·s <sup>-1</sup>	~15 m·s <sup>-1</sup>	~25 m·s <sup>-1</sup>	~15 m·s <sup>-1</sup>
Rotora pašstarts	Ir (pie jebkāda vēja ātrums)	Ir (pie v > 6 m·s <sup>-1</sup> )	Ir (pie jebkāda vēja ātrums)	Ir (pie v > 6 m·s <sup>-1</sup> )
Multiplikatora izmantošana	Pēc izvēles	Pēc izvēles	Nepieciešams	Nepieciešams
λ	~ 6	~3 līdz 4	~ 6	~3 līdz 4
Masta augstums	L <sub>masts</sub> = 5·D	L <sub>masts</sub> = 2·D	L <sub>masts</sub> = 2·D	L <sub>masts</sub> = 1.5·D

VAVES energoefektivitātes rādītāja lietderības koeficienta palielināšanai elektriskās jaudas diapazonā no 10 kW līdz 100 kW, nepieciešams veikt jaunas izstrādes. Apskatot VAVES ar jaudu no 10 kW, uzstādīto VES skaits ir mazs jo VAVES lietderības koeficients ir zemāks salīdzinot ar HAVES (Halstead R, 2011). VAVES efektīvākai komercializēšanai nepieciešams veikt dažādas jaunas izstrādes, piemēram, rotora konstrukcijas un mehāniskā pārvada pilnveide, energoefektivitātes paaugstināšana ar spārnu leņķa aktīvo regulēšanu, elektroģenerators speciālas konstrukcijas izstrāde.

## 1.2. VES vadības sistēmas analīze, spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas apskats

VES vadības sistēma atbilstoši tehniskajam uzdevumam izpilda vairākas funkcijas: bremžu sistēmas vadību, spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanu, gondolas pagrieziena leņķa kontroli, elektriskās slodzes regulēšanu, slodzes un elektriskā tīkla diagnostiku, ģenerators diagnostiku. Programmējamo loģisko kontrolleris (turpmāk – PLK) nolasa informāciju no ikviena VES mezgla un iekārtas, kurās ir uzstādīti mērīšanas sensori (1.3. att.).

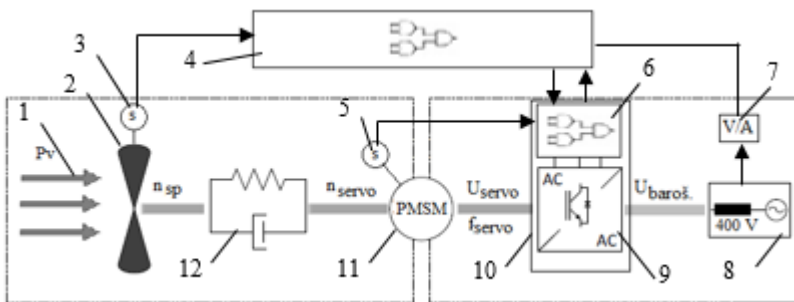


### 1.3. att. VES vadības iekārtu sadalījums pēc izpildes funkcijas

1 – centrālās vadības sistēma; 2 – gaisa plūsmas mērīšanas interfeiss; 3 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšana un mērīšana; 4 – mehānisko pārvadu diagnostika; 5 – elektroģeneratora slodzes regulēšana un stāvokļa uzraudzība; 6 – elektriskā tīkla mēriekārtas un tīkla invertora vadība; 7 – gaisa plūsma, 8 – turbīnas rotors un spārni; 9 – mehāniskais pārvads; 10 – elektroģenerators; 11 – elektriskais tīkls, vai kāda cita veida slodze;  $v$  – vēja ātrums,  $\text{m s}^{-1}$ ;  $\phi$  – gaisa plūsmas virziens,  $^{\circ}$ ;  $\phi$  – spārnu iestatīšanas leņķis,  $^{\circ}$ ;  $n_r$  – rotora rotācijas ātrums,  $\text{min}^{-1}$ ;  $\phi_{uzd}$  – spārnu iestatīšanas leņķa uzdevums,  $^{\circ}$ ;  $n$  – mehānisko vārpstu rotācijas ātrums,  $\text{min}^{-1}$ ;  $\theta$  – rotora pagrieziņa leņķis,  $^{\circ}$ ;  $n_g$  – ģenerators rotācijas ātrums,  $\text{min}^{-1}$ ;  $P_g$  – ģenerators elektriskā jauda, kW;  $P_{uzd}$  – ģenerators uzdotā jauda, kW;  $U_e$  – tīkla spriegums, V;  $I_e$  – tīkla strāva, A;  $P_e$  – tīkla elektriskā jauda, kW.

Vēja virziena mērījumi nepieciešami VAVES spārnu iestatīšanas leņķa vai HAVES gondolas pagrieziņa leņķa regulēšanas iekārtām (1.3.att.). VAVES lietderības koeficienta paaugstināšanas risinājums ir spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma, kas spēj uzraudzīt rotora optimālos spārnu aerodinamiskos leņķus. HAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma ir pieejama lielākajai daļai piedāvāto VES. VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēma komerciāli netiek piedāvāta. Lai piedāvātu nākotnē VAVES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, ir nepieciešams sīki izpētīt tās iespējamus tehniskos risinājumus. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanu nodrošina ar decentrālu PLK vai VES centrālu PLK. Atkarībā no sistēmas mērījumiem par vēja virzienu, rotora rotācijas ātrumu un pagrieziņa leņķi, izejā tiek aprēķināts spārnu optimālais iestatījuma leņķis. Izmantojot servo mehānismus, ir iespējams veikt aprēķinātā iestatīšanas leņķa izpildi.

Servo regulators 10 sastāv no loģiskās vadības 6 un spēka interfeisa 9. Servo regulatoram, vadot servo mehānismu, tiek izpildīts uzdotais spārnu iestatīšanas leņķa uzdevums. Servo regulatoram loģiskās vadības elektroniskā shēma nodrošina sastādītās loģiskās programmas izpildi, servo regulatora un servo motora diagnostiku. Servo motora pagrieziņa leņķa elektromehāniskais sensors 5 un servo regulators 10 veido noslēgtu kontūru (1.4. att.).



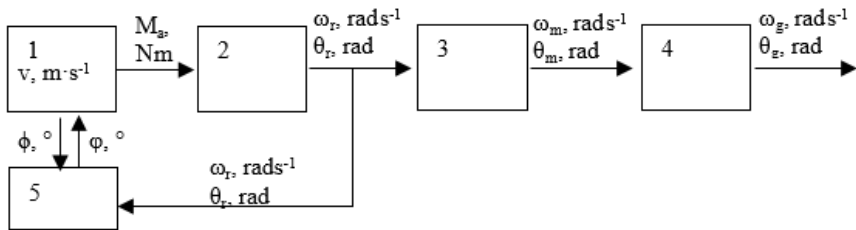
#### 1.4. att. VES spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas vadības sistēmas uzbūve

1 – gaisa plūsma; 2 – VES rotora spārns; 3 – spārna iestatīšanas leņķa mēriekārta;  
 4 – spārnu iestatīšanas leņķa vadības sistēma; 5 – servo mehānisma pagrieziena leņķa mēriekārta; 6 – servo regulatora vadības bloks; 7 – elektriskā tīkla mēriekārta;  
 8 – elektriskais tīkls; 9 – servo regulatora spēka interfeiss; 10 – servo regulators;  
 11 – servo piedziņa; 12 – reduktors un mehāniskais pārvads;  $P_v$  – gaisa plūsmas jauda, kW;  $n_{sp}$  – spārna rotācijas ātrums,  $\text{min}^{-1}$ ;  $n_{servo}$  – servo motora rotācijas ātrums,  $\text{min}^{-1}$ ;  $U_{servo}$  – servo motora spriegums, V;  $f_{servo}$  – servo motora sprieguma frekvence,  $\text{s}^{-1}$ ;  $U_{baroš}$  – elektriskā tīkla spriegums, V.

VAVES simulācijas modelis dod iespēju ne tikai simulēt fizikālos procesus, bet arī sastādīt vadības sistēmas loģisko programmu (Komass T., 2014). Programmu ir iespējams pārbaudīt ar sastādīto VES simulācijas fizikālo modeli. Šāds risinājums palīdz pārbaudīt vadības sistēmas loģisko programmu. Atkarībā no tā, cik precīzi ir sastādīts VAVES fizikālais modelis, 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 (*Structure Text*).

## 2. VAVES TEHNOLOĢISKO IEKĀRTU SIMULĀCIJAS MODEĻU IZSTRĀDE

VAVES simulācijas modeļa izstrāde ir nepieciešama, lai uzlabotu jaunu produktu attīstību un ātrāku nonākšanu lietotāja sektorā. Simulācijas modeļa struktūru ir nepieciešams izveidot modulāru, katrai VES iekārtai izveidojot atsevišķu apakšsistēmu. Lai izpildītu pētījuma mērķi, ir nepieciešams apskatīt katru VES iekārtu, kurai pakārtoti ir nepieciešams izstrādāt simulācijas modeļa apakšsistēmu (2.1. att.).



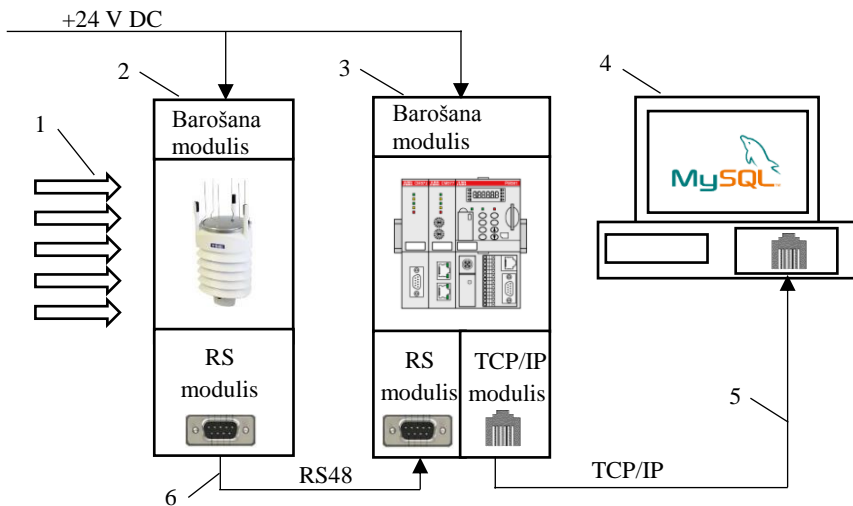
2.1. att. VAVES simulācijas modeļa struktūra

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,  $\text{m s}^{-1}$ ;  $M_a$  – aerodinamiskais griezes moments,  $\text{Nm}$ ;  $\omega_r$  – rotora rotācijas ātrums,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $\theta_r$  – rotora pagrieziens leņķis,  $^\circ$ ;  $\omega_m$  – mehāniskā pārvada izejas rotācijas ātrums,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $\theta_m$  – mehāniskā pārvada izejas pagrieziens leņķis,  $^\circ$ ;  $\omega_g$  – ģeneratora vārpstas rotācijas ātrums,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $\theta_g$  – ģeneratora vārpstas pagrieziens leņķis,  $^\circ$ ;  $\phi$  – gaisa plūsmas leņķis pret ziemeļu virzienu,  $^\circ$ .

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 apakšsistēmu simulācijas modelim un ievadot reālā objekta parametrus, ir iegūts funkcionējošs simulācijas modeļa elements. Modulārais simulācijas modeļa risinājums dos lielāku pielietojamību. Iegūstot jaunus fizikālā objekta pētījumu rezultātus, ir ērti veikt atsevišķu apakšsistēmu uzlabojumus vai pielāgojumus jaunajiem rezultātiem (Komass T., 2013b)

## 2.1. Veja ātruma eksperimentālie mērījumi

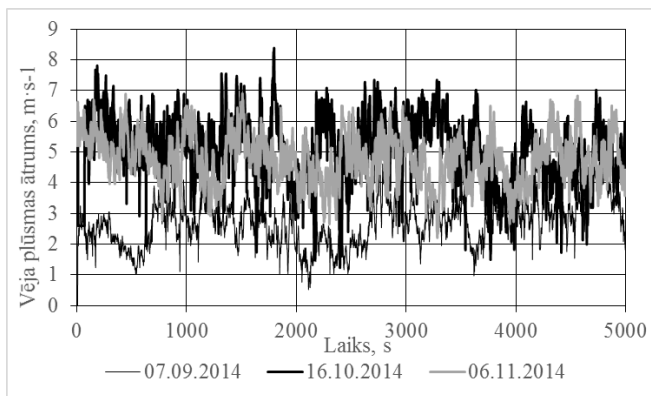
Mērījumi tika veikti Beļģijas pilsētā Ostendē laika posmā no 3.09.2014. līdz 12.11.2014. Gaisa plūsmas mērāparāts 2 tika novietots 12 m augstā mastā un tika pieslēgts pie nolasīšanas ierīces 3. Datu ierakstīšana un apstrāde tika veikta, izmantojot datorprogrammu MySQL 4 (2.2.att.). Mērāparāts tika kalibrēts atbilstoši lietošanas instrukcijā sniegtajiem norādījumiem.



2.2. att. **Vēja parametru mērījumu slēguma shēma**

1 – vējš; 2 – WXT520 gaisa plūsmas ātruma un virziena mēriekārta; 3 – PM573 datu nolasīšanas un apstrādes iekārta; 4 – dators ar uzstādīto datu saglabāšanas datorprogrammu MySQL; 5 – TCP datu pārraides kanāls; 6 – RS485 datu pārraides kanāls ar ACSII protokolu.

Ekspimentālo mērījumu dati uzrāda izteiktu vēja ātruma nelineāro raksturu. Tas ir iemesls, kāpēc ir svarīgi VAVES simulācijas modelī izmantot ekperimentāli mērītos datus, lai simulācijas modelis tiktu pēc iespējas precīzāk validācijas laikā pakļauts dabiskiem apstākļiem (2.3. att.).



2.3. att. **Vēja ātruma mērījumi Beļģijas pilsētā Ostende**

## 2.2. Aerodinamiskā griezes momenta simulācijas modeļa izstrāde

Cēlēj spēka projekcija uz spārna lineārā ātruma vektora ass ir spēks, kas veic vēja turbīnas rotācijas kustību. Spied spēka projekcija uz spārna lineārā ātruma vektora ass ir bremzējošs spēks un ir vērst pretēji kustības virzienam. Cēlēj spēka un spied spēka lielumu pie noteikta gaisa plūsmas ātruma nosaka cēlēj spēka koeficients CL un spied spēka koeficients CD. Pētījumi parāda, ka CL un CD koeficienti ir iegūstami tikai eksperimentāli. Cēlēj spēka un spied spēka projekcijas uz spārna lineārā ātruma vektora ass aprēķināmi sekojoši (Savejo):

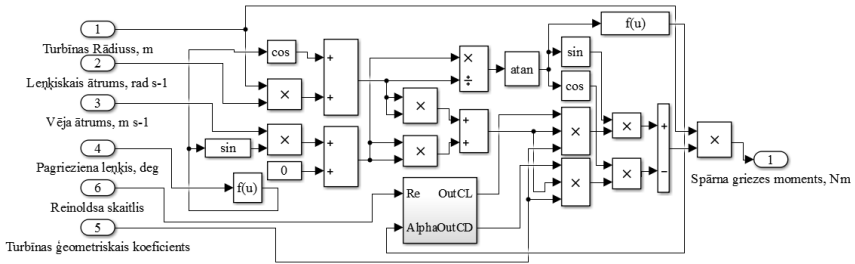
$$F_L = \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta}{\frac{R\omega_r}{v} + \cos\theta}\right)\right) \cdot ((\cos\theta \cdot v + \omega \cdot R)^2 + (\sin\theta \cdot v)^2) \cdot CL \cdot \frac{c \cdot l \cdot \rho}{2}, \quad (2.1.)$$

$$F_D = \cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta}{\frac{R\omega_r}{v} + \cos\theta}\right)\right) \cdot ((\cos\theta \cdot v + \omega \cdot R)^2 + (\sin\theta \cdot v)^2) \cdot CD \cdot \frac{c \cdot l \cdot \rho}{2}, \quad (2.2.)$$

- kur
- l – spārna garums, m;
  - F<sub>L</sub> – cēlēj spēka projekcija, N;
  - F<sub>D</sub> – spied spēka projekcija, N;
  - v<sub>τ</sub> – tangenciālais vēja ātruma vektors;
  - v<sub>r</sub> – radiālais vēja ātruma vektors;
  - ω<sub>r</sub> – turbīnas rotora rotācijas leņķiskais ātrums, rad s<sup>-1</sup>;
  - R – turbīnas rotora rādiuss, m;
  - v – vēja ātrums, m s<sup>-1</sup>.

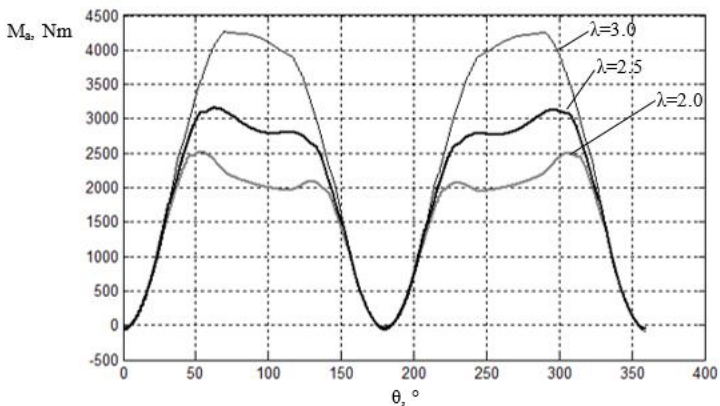
Apakšsistēma „*AerodynamicBlade*” izstrādāta ar mērķi simulēt aerodinamiskos spēkus reālā laikā. Simulācijas modeļa apakšsistēmas iekšējā struktūra sastāv no ieejas signālu nolasīšanas portiem, matemātisko aprēķinu funkcijām, pārlūktabulām, izejas porta un ierakstīšanas porta. Sistēma sakārtota loģiskā matemātiskā aprēķinu secībā, lai cikla laikā tiktu veikts precīzs aerodinamisko spēku un griezes momenta aprēķins. Šajā simulācijas modelī ir izvēlēts NACA0018 profils ar CL un CD rādītājiem pie atbilstoša Reinoldsa skaitļa (2.4. att.) (Komass T., 2015b).

Simulācijas modeļa nozīme ir iespēja to izmantot tālākos pētījumos. Izveidotā atvērtā apakšsistēmas struktūra atļauj ērti veikt dažādas izmaiņas un izmantot papildus izejas informāciju, kas nepieciešama papildus no vektoru aprēķinu metodes. Apakšsistēma aprēķina aerodinamisko spēka vektoru skaitlisko vērtību un leņķi pret spārna rotējošo kodrinātu asi (Komass T., 2015b).



2.4. att. Viena spārņa aerodinamiskā griezes momenta simulācijas modeļa apakšsistēmas „AerodynamicBlade” iekšējā struktūra

Aerodinamiskā spēka aprēķina modelī turbīnas rotors pagriežas ar soli  $1^\circ$ . Simulācijas modeļa solis  $\text{sim\_Step} = 0.01$  s, kas nodrošina aprēķinu soli simulācijas modelim  $0.01^\circ$ . Simulācijas laikā tiek pārbaudīts griezes momenta aprēķins pie rotora pagrieziņa leņķa no  $0^\circ$  līdz  $360^\circ$ . Rotora pagrieziņa leņķis  $0^\circ$  ir pret gaisa plūsmas virzienu (2.5. att.).



2.5. att. Spārņu griezes momenta simulācijas rezultāti

Lai sasniegtu izvirzītos mērķus un simulācijas modelis atbilstu reālam objektam, ir nepieciešams izmantot aerodinamisko spēku vektoru aprēķinu metodi. Izmantojot šo aprēķinu metodi, simulācijas modelī nodrošina precīzu aerodinamiskā griezes momenta aprēķinu uz vienu spārni atkarībā no rotora relatīvā pagrieziņa leņķa pret vēju (Komass T., 2015a).

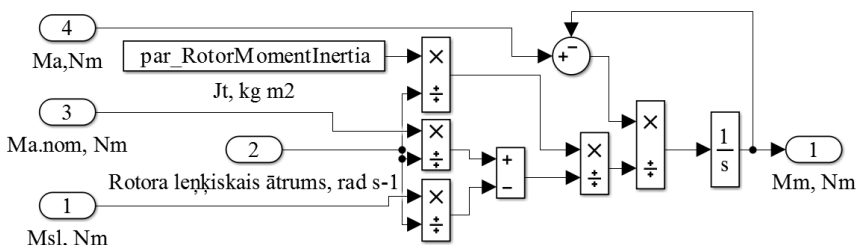


### 2.3. VAVES rotora simulācijas modeļa izstrāde

Zinātniskajos rakstos tiek analizēti aerodinamiskie pārejas procesi vēja turbīnās. Pētījumi pierāda, ka vēja rotora inerces lielums var ietekmēt saražotās elektroenerģijas daudzumu. Papildus nepieciešams izpētīt, cik liels enerģētiskais ieguvums tiek ietekmēts, izmainot rotora inerces momentu, kāda ir šī ietekme un cik lielā mērā tas ir saistīts ar pašas VES slodzes regulēšanas sistēmas izpildījumu (Komass T., 2013c). Pārejas procesu no vēja ātruma izmaiņas līdz VES rotora rotācijas ātruma izmaiņai var aprakstīt ar pirmās kārtas inerciālu posmu, ko izsaka pārvades funkcija (Komass T., 2013a) (2.6. att.):

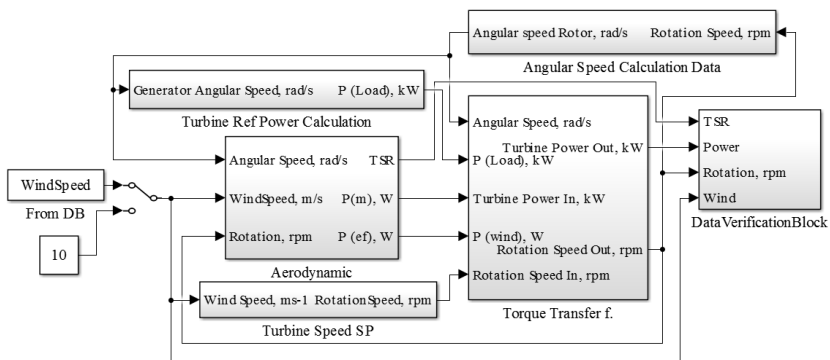
$$W_t(s) = \frac{\omega_r(s)}{v(s)} = \frac{K_t}{\left(\frac{J_r \cdot \omega_{r,nom}}{M_{r,nom}}\right) \cdot s + 1} \quad (2.3.)$$

- 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  $s^{-1}$ ;  
 $K_t$  – VES rotora pārvades koeficients, rad  $m^{-1}$ ;  
 $J_r$  – VES rotora inerces moments, kg  $m^2$ ;  
 $\omega_{r,nom}$  – VES nominālais leņķiskais ātrums, rad  $s^{-1}$ ;  
 $M_{r,nom}$  – VES rotora nominālais griezes moments, Nm.



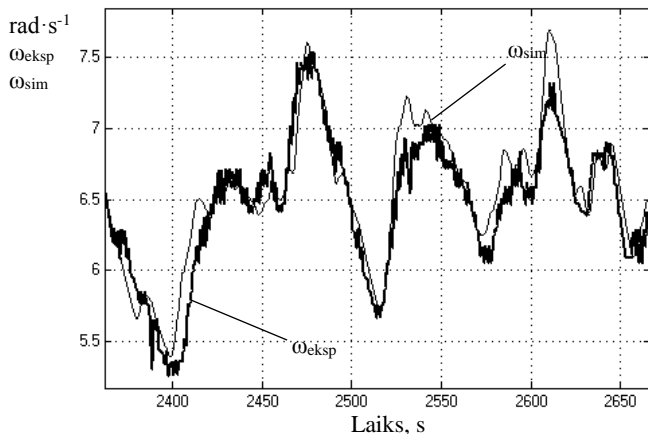
2.6. att. Turbīnas rotora apakšsistēma

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 elektroenerģijas daudzumu. Pirms simulācijas modelis tiek izmantots šim eksperimentam, tas tiek validēts ar eksperimentālajiem datiem. Eksperiments tika veikts 2015. gada trešajā ceturksnī Beļģijas pilsētā Ostendē. Eksperimentālais objekts bija VAVES ar nosaukumu „Flyfox-20kW”, sastāvot no divu bloku rotora ar četriem spārnēm katrā blokā, rotora diametrs un spārņa garums ir 7.5 m (2.7. att.) (Komass T., 2013a).



2.7. att. „Flyfox-20kW” pārejas procesu simulācijas modelis

Apskatot „Flyfox-20kW” simulācijas rezultātus rezultātu posmā, kur VES rotors ir ieskrējies un nostabilizējies, rezultāti parāda, ka simulācijas modeļa datiem ir cieša sakritība ar VES eksperimentālajiem mērījumiem. Simulācijas un eksperimentālo datu statistiskā analīze uzrāda datu sakritību ar  $R^2 = 0.842$  (2.8. att.).

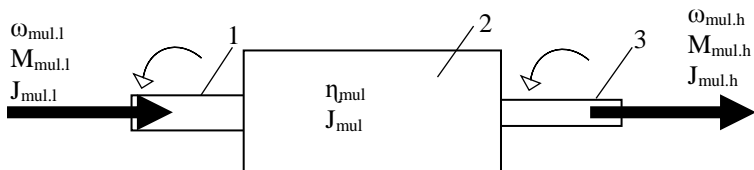


2.8. att. „Flyfox-20kW” validācijas rezultāti

Eksperimentālā pētījuma rezultātā ir izstrādāts un aprobēts VES rotora un aerodinamisko spēku simulācijas modelis MATLAB *Simulink* vidē. Modeļa izstrāde ir veikta gan aerodinamisko spēku aprēķinam, gan rotora inerces pārejas funkcijai un sloģošanas algoritmam. Izstrādātais simulācijas modelis tālāk tiek izmantots VAVES simulācijas modelī spārnu iestatīšanas leņķa aprobācijai.

## 2.4. Mehāniskā pārvada simulācijas modeļa izstrāde

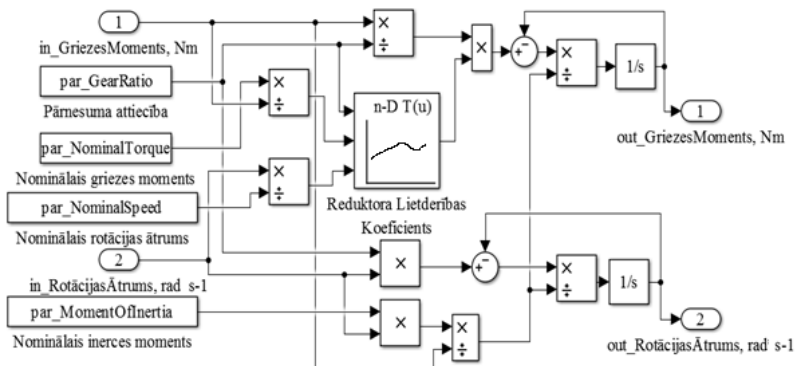
VES aerodinamiskās enerģijas mehāniskā pārvades sistēma sastāv no vēja turbīnas lēngaitas vārpstas, multiplikatora un ātrgaitas vārpstas (2.9. att.). Analizētajos zinātniskajos pētījumos izvirzītajos risinājumos tiek apskatīta konstrukcija, neizmantojot multiplikatoru VES un aizvietojojot to ar pastāvīgo magnētu sinhrono daudzpolu ģeneratoru. Pastāvīgo magnētu daudzpolu ģeneratorus ir iespējams veidot dažādas konstrukcijas, panākot nepieciešamo lēngaitas ātrumu (Komass T., 2013a).



2.9. att. Mehāniskā pārvada enerģijas plūsmas shēma

1 – lēngaitas vārpsta; 2 – multiplikators; 3 – ātrgaitas vārpsta;  $\omega_{mul,l}$  – lēngaitas vārpstas rotācijas ātrums, rad s<sup>-1</sup>;  $M_{mul,l}$  – lēngaitas vārpstas griezes moments, Nm;  $J_{mul,l}$  – lēngaitas vārpstas inerces moments, kg m<sup>2</sup>;  $\eta_{mul}$  – multiplikatora lietderības koeficients;  $J_{mul}$  – multiplikatora kopējais inerces moments, kg m<sup>2</sup>;  $\omega_{mul,h}$  – ātrgaitas vārpstas rotācijas ātrums, rad s<sup>-1</sup>;  $M_{mul,h}$  – ātrgaitas vārpstas griezes moments, Nm;  $J_{mul,h}$  – ātrgaitas vārpstas inerces moments, kg m<sup>2</sup>.

Izstrādājot MATLAB *Simulink* vidē multiplikatora apakšsistēmas modeli, tiek izmantota parametru ievade caur apakšsistēmas parametru logu. Lietderības koeficienta meklēšanas tabula kā ieejas signālus saņem griezes momentu, rotācijas ātrumu un pārnese skaitli. Multiplikatora apakšsistēmas izejā tiek aprēķināts ātrgaitas vārpstas griezes moments un rotācijas ātrums (2.10. att.).



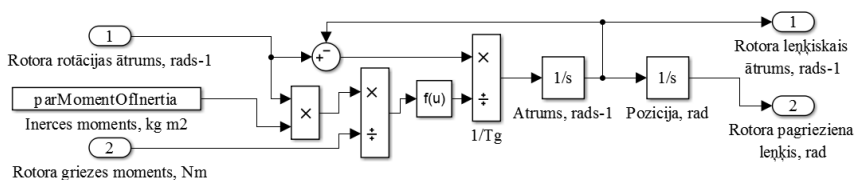
2.10. att. Multiplikatora apakšsistēmas iekšējā struktūra

## 2.5. PMSG simulācijas modeļa izstrāde

Promocijas darba izvirzīto mērķu sasniegšanai tiek simulētas ģenerators elektromehāniskās īpašības, sprieguma avota un strāvas avota funkcija (2.12. att.). PMSG spriegumam ir lineāra funkcija no rotācijas frekvences  $U_g = f(\omega_g)$  (Komass T., 2013b):

$$\left(\frac{J_g \cdot \omega_{g,n}}{M_{g,n}}\right) \frac{dU_g}{dt} + U_g = \frac{U_{nost}}{\omega_{nost}} \cdot \omega_g, \quad (2.4)$$

- kur  $T_m$  – elektromagnētiskā laika konstante, s;  
 $\omega_g$  – ģenerators rotācijas leņķiskā frekvence, rad s<sup>-1</sup>;  
 $U$  – ģenerators izejas spriegums, V;  
 $\omega_{g,n}$  – PMSG rotācijas nominālā leņķiskā frekvence, rad s<sup>-1</sup>;  
 $J_g$  – PMSG inerces moments, kg m<sup>2</sup>;  
 $M_{g,n}$  – PMSG nominālais griezes moments, Nm.



2.12. att. PMSG mehānisko pārejas procesu simulācijas apakšsistēma

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

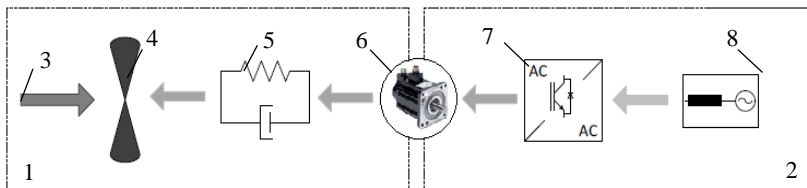
## 3. SPĀRNA AERODINAMISKO LEŅĶU REGULĒŠANAS SISTĒMAS UN SIMULĀCIJAS MODEĻA IZSTRĀDE

Jaunākie pētījumi, aerodinamiskie aprēķini un modelēšanas rezultāti liecina, ka, veicot vēja turbīnas spārna iestatīšanas leņķa korekciju, iespējams paaugstināt turbīnas lietderības koeficientu (Komass T., 2015c). VAVES ar fiksētu spārna leņķi vēja enerģijas izmantošanas koeficients ir par aptuveni 14% mazāks nekā turbīnām ar regulējamu spārna leņķi.

Pētījumi pierādījuši, ka HAVES konstrukcijā priekšroka tiek dota vēja rotora spārnu iestatīšanas leņķa aktīvai automatiskai regulēšanai ar elektriskiem katram spārnim neatkarīgiem servomehānismiem. VES ar jaudu < 5 kW nepieciešams veikt regulēšanu ar elektromehāniski centralizētu spārnu iestatīšanas sistēmu. VAVES spārnu aerodinamisko leņķu regulēšanas sistēma nav līdz šim pielietota nevienā no esošajiem komercizstrādājumiem (Komass T., 2016).

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

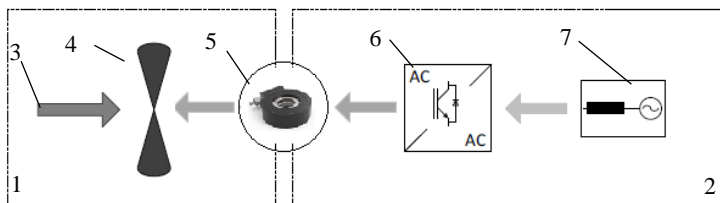
Kā elektriskā piedziņa tiek izmantoti servo motori 6. Servo mehānismam ar reduktoru ir priekšrocības: mehānisko vibrāciju absorbcija reduktorā 5; iespēja izmantot motoru ar mazāku griezes momentu; radiālās un aksiālās slodzes absorbcija reduktorā; servo sistēmas stabilitāte (Komass T., 2016) (3.1. att.).



3.1. att. Spāra leņķu regulēšanas sistēmas ar reduktoru

1 – spāra leņķu regulēšanas sistēmas mehāniskais posms; 2 – spāra leņķu regulēšanas sistēmas elektronikas posms; 3 – gaisa plūsma; 4 – spāra konstrukcija; 5 – reduktors; 6 – servo motors; 7 – servo regulators; 8 – elektroenerģijas avots.

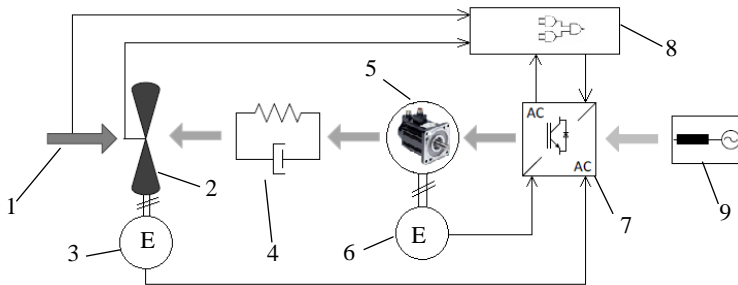
Konstrukcijā, neizmantojot reduktoru, lieto servo motorus 5 ar dobu vidu, kam dobumā var izvīrīt cauri spāra rotācijas vārpstu. Šāda veida servo motora konstrukcija ir ērta un piemērota šādiem tehnoloģiskajiem risinājumiem (Komass T., 2016) (3.2. att.).



3.2. att. Spāru leņķa regulēšanas sistēmas konstruktīvais risinājums bez reduktora

1 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas mehāniskais posms; 2 – spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas elektronikas posms; 3 – gaisa plūsma in tās perturbācija uz spāra virsmu; 4 – spāra konstrukcija; 5 – servo motors; 6 – servo regulators; 7 – elektroenerģijas avots.

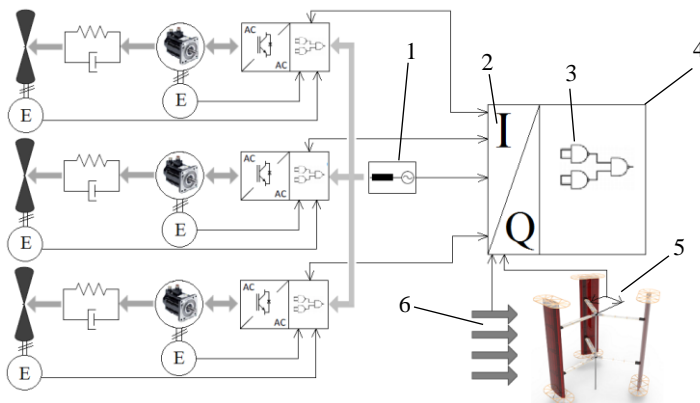
Vienam spārnam iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmā ir servo motors 7, piedziņas regulators 7, mehāniskais pārvads 4 un spāra pagriešana leņķa mēriekārtas 3 un 6. Servo motoru regulē servo regulators, kas sastāv no elektriskā spēka un loģiskās vadības interfeisa. Centrālā vadības sistēma 8 mēra vēja ātrumu un virzienu, rotora pagriešana leņķi, spārna esošo pagriešana leņķi (3.3. att.).



**3.3. att. Spārnu iestatīšanas leņķa piedziņas vadības sistēmas struktūrskāme**

1 – gaisa plūsmas perturbācija uz spārna mehānisko konstrukciju; 2 – spārna mehāniskā konstrukcija; 3 – spārna iestatīšanas leņķa elektromehāniskā mēriekārta; 4 – reduktors; 5 – servo motors; 6 – servo motora pagriezienu leņķa elektromehāniskā mēriekārta; 7 – servo regulators; 8 – centrālās vadības kontrolieris; 9 – elektroenerģijas avots.

VAVES ar trīs aktīvi regulējamiem spārniem katrs spārns strādā kā autonomns elements. Spārnu regulēšanas sistēmā tiek izmantots centrālais kontrolieris, kas veic datu nolasišanu 2 un apstrādi 3, aprēķinot katra spārna iestatīšanas leņķa uzdevumus (Komass T., 2016) (3.5. att.). Elektroenerģijas nodrošināšana notiek izmantojot centrālu elektroenerģijas avotu.

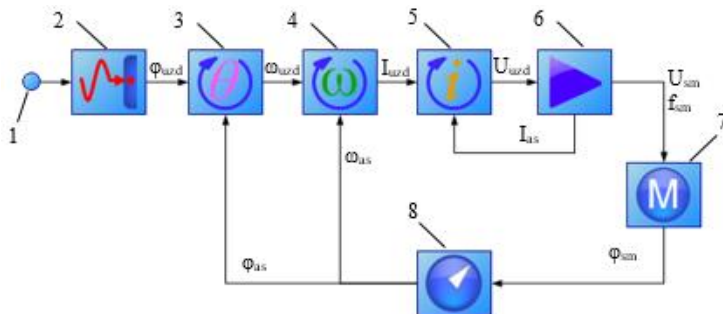


**3.5. att. Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas struktūrskāme**

1 – centralizēts elektroenerģijas avots; 2 – centrālā vadības kontrolieris ieeju-izeju interfeiss; 3 – centrālā vadības kontrolieris loģiskās programmas interfeiss; 4 – centrālais kontrolieris; 5 – vēja rotora pagriezienu leņķa mēriekārta; 6 – vēja mēriekārta.

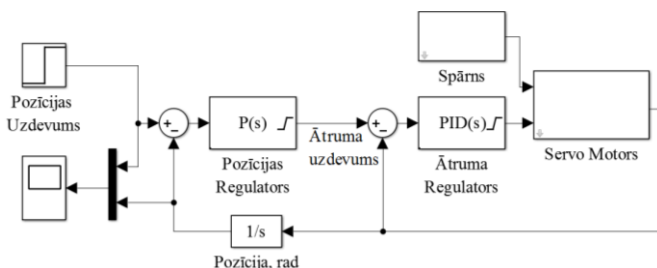
### 3.2. Servo regulatora vadības algoritmu analīze un izstrāde simulācijas modelī

Servo regulatoros neatkarīgi no ražotāja ir izstrādāta vienota servo motora regulēšanas programmas struktūra, kas sastāv no 3 virknē slēgtām ķēdēm: strāvas vadības ķēde 5, ātruma vadības ķēde 4, pozīcijas vadības ķēde 3 (3.10. att.). Regulatoros atsevišķi ražotāji izmanto arī apsteidzošas vadības ķēdes kādā no nepieciešamajiem regulēšanas mezgļiem.



#### 3.6. att. Servo motora regulatora vadības ķēdes pamatstruktūra

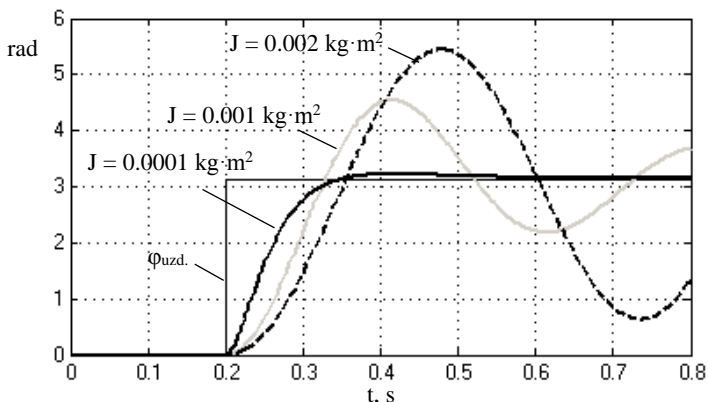
1 – pozīcijas uzdevums; 2 – signāla apstrādes modulis; 3 – pozīcijas regulēšanas ķēde; 4 – ātruma regulēšanas ķēde; 5 – strāvas regulēšanas ķēde; 6 – IGBT regulēšana; 7 – servo motors; 8 – servo motora pozīcijas sensors;  $\varphi_{uzd}$  – pagriezienu leņķa uzdevums, °;  $\varphi_{as}$  – pagriezienu leņķa atgriezeniskā saite, °;  $\omega_{uzd}$  – rotācijas ātruma uzdevums;  $\omega_{as}$  – rotācijas ātruma atgriezeniskā saite;  $I_{uzd}$  – strāvas uzdevums, A;  $I_{as}$  – servo motora strāvas mērījumi, A;  $U_{uzd}$  – IGBT sprieguma uzdevums, V;  $U_{sm}$  – servo motora vadības spriegums, V;  $f_{sm}$  – servo motora sprieguma frekvence, s<sup>-1</sup>;  $\varphi_{sm}$  – servo motora pagriezienu leņķis, °.



#### 3.7. att. Servo motora un regulatora simulācijas modelis

Simulācijas rezultāti parāda, ka simulācijas modelis 3.7. att. regulē uzdoto pozīcijas uzdevumu un var tikt parametrizēts nepieciešamajam regulēšanas objektam. Simulācijas rezultāti parāda, ka ātruma un pozīcijas regulēšanas ķēdes

ir nepieciešams ieregulēt, ievadot precīzus regulēšanas objekta parametrus, lai simulācijas modelī būtu atbilstoši inerces momenti (Komass T., 2016) (3.8. att.).



3.8. att. Pozīcijas uzdevuma izpilde ar dažādām objekta inerēm  
 $\varphi_{\text{uzd}}$  – pozīcijas uzdevuma signāls, °;  $J$  – slodzes inerces moments,  $\text{kg m}^2$ .

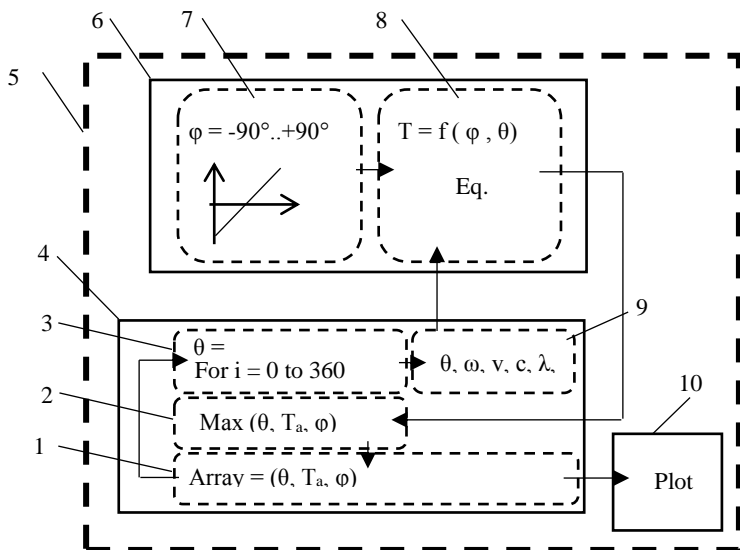
Servo regulatoriem regulēšanas ķēdes tiek parametrizētas noteiktā secībā (Komass T., 2015c). Arī simulācijas modelim šī secība ir jāsauglabā, tādā veidā nodrošinot atbilstošus rezultātus. Pirmā tiek parametrizēta strāvas regulēšanas ķēde, tālāk ātruma regulēšanas ķēde. Nobeigumā tiek parametrizēta pozīcijas izpildes ķēde. Neatbilstoša parametru iestatīšana kādā no zemākajām ķēdēm var ietekmēt augstāk esošo vadības ķēžu izejas rezultātus. Ja tiek mainīti parametri kādā no zemākajām ķēdēm, tad vienlaikus nepieciešams veikt parametru pārbaudi visām augstāk esošajām ķēdēm.

### 3.3. Spārna optimālo aerodinamisko leņķu aprēķins

Spārnu aerodinamisko leņķu regulēšanas sistēmas mērķis ir iegūt augstāku VAVES lietderības koeficientu. Tas nozīmē, ka noteiktā rotora pagriezienā katram spārnam ir savi optimālie aerodinamiskie leņķi. Apskatītajos pētījumos nav norādīts, kādi ir optimālie spārna aerodinamiskie leņķi kā funkcija no rotora pagriezienu leņķa un rotora ātrgaitas koeficienta.

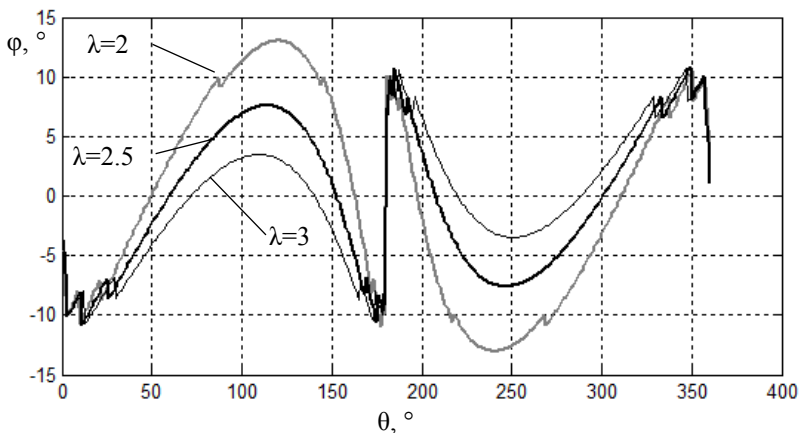
Tika izstrādāta speciāla aprēķina programma MATLAB *Editor* vidē. Programmas cikls, ievadot nepieciešamos ieejas parametrus, veic simulācijas modeļa izsaukšanu. Katrā simulācijas izsaukšanas laikā simulē spārna iestatīšanas leņķi no  $-90^\circ$  līdz  $+90^\circ$  ar soli  $0.1^\circ$ . Simulācijas aprēķins no *Editor* programmas tiek izsaukts, simulējot rotora pagriešanu 360 reizes ar soli  $1^\circ$ . Pēc viena cikla aprēķina datu masīvā tiek atrasts lielākais sasniegtais aerodinamiskais griezes moments pie noteiktajiem spārna leņķiem (3.9. att.) (Komass T., 2015c).





3.9. att. Aerodinamisko leņķu analīzes programmas struktūra

1 – aerodinamisko leņķu rezultāti; 2 – optimālā iestatīšanas leņķa meklēšanas algoritms; 3 – rotora pagrieziena leņķa iestatījuma algoritms; 4 – datu aprēķinu un simulācijas rezultātu apstrādes modulis; 5 – aerodinamisko leņķu aprēķinu programma; 6 – spārņa griezes momenta aprēķina simulācijas modelis; 7 – spārņu iestatīšanas leņķa modelēšana; 8 – spārņa griezes momenta aprēķins pēc ievadītajiem datiem; 9 – spārņa griezes momenta aprēķinu ieejas parametru kopa; 10 – datu grafiskā apstrāde.



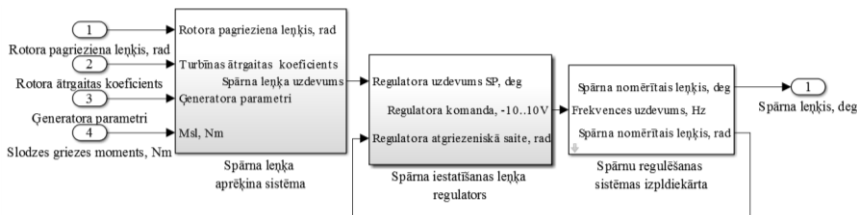
3.10. att. Uzlaboto spārņu iestatīšanas leņķa korekcijas  $\phi$  raksturlienes atkarībā no turbīnas ātrgaitas koeficienta

Veicot aprēķinu modeļa pārbaudi, tika izvēlēti sekojoši turbīnas iestatījumi: turbīnas ātrgaitas koeficients  $\lambda = 2.0, 2.5, 3.0$ ; turbīnas spārna horda  $c = 1$  m; āra gaisa temperatūra  $= 20$  °C; vēja ātrums  $v = 10$  m·s<sup>-1</sup>; spārna garums  $l = 10$  m; rotora pagriezienu leņķis  $\theta = 0 \dots 360$  °; vēja plūsmas virziena leņķis  $\phi = 0$  °; spārna iestatīšanas leņķis  $\varphi = -90 \dots +90$  °.

Programmas izejas rezultātos redzams, ka leņķu raksturlīknes ir atkarīgas no rotora ātrgaitas koeficienta (3.10.att.). Simulācijas sistēmas izejas rezultāti pierāda, ka pētījuma mērķis ir sasniegts un ir iegūts optimālais spārnu iestatīšanas leņķis, kā funkcija no turbīnas rotora pagriezienu leņķa  $\varphi = f(\theta)$ . Iegūtie rezultāti atspoguļo vēja turbīnas parametru iekšējo korelāciju (Komass T., 2015c).

### 3.4. Spārna iestatīšanas leņķa regulēšanas simulācijas modeļa izstrāde

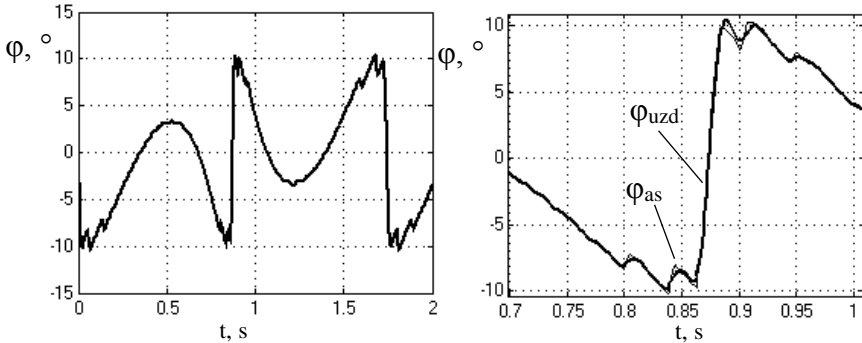
VES spārna regulēšanas sistēma ir modulāra, kur katrs modulis atbild par savu spārnu. Sistēmas struktūra satur trīs atsevišķus spārnu regulēšanas modulius, kur katrā modulī ietilpst savs regulēšanas servo motors ar spārnu. Uz visu sistēmu ir viens kopējs iestatīšanas leņķa uzdevuma aprēķinu bloks. Ar centrālās vadības sistēmas bloka palīdzību tiek sekots līdzī visiem centrālajiem procesiem un atkarībā no rotora pagriezienu leņķa, vēja plūsmas virziena un turbīnas darba stāvokļa tiek aprēķināts un noformēts izejas signāls (3.11. att.).



3.11. att. Spārna leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modelis

Izmantojot izveidoto spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas simulācijas modeli, ir iespējams veikt simulācijas pārbaudes, noskaidrojot kā sistēma, izmantojot servo motoru, spētu veikt specifiskās uzdevuma raksturlīknes izpildi. Pagriezienu leņķa uzdevuma raksturlīkne ir iegūta no spārna aerodinamisko leņķu aprēķinu rezultātiem.

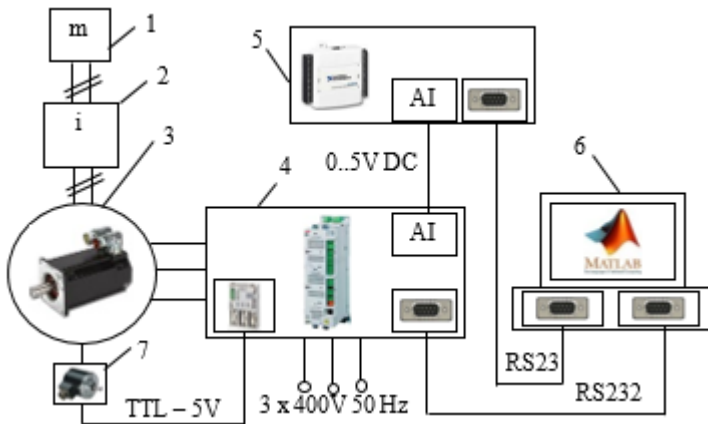
Spārna leņķa regulēšanas sistēmas simulācijas modeļa reģistrētie simulācijas rezultāti uzrāda uzdotu leņķa izpildi ar augstu precizitāti. Izmantojot apsteidzoša vadības uzdevuma aprēķinu simulācijas izejas rezultāti tiek uzlaboti. Uzdotā un izpildītā leņķa datu analizē redzams, ka determinācijas koeficients  $R^2 = 0.9687$  ar standartnovirzi  $1.199$  °. Pie vienādiem nosacījumiem izmantojot apsteidzošo rotora pozīcijas aprēķinu  $R^2 = 0.9993$  ar standart novirzi  $0.168$  ° (3.12. att.).



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

$\varphi_{uzd}$  – spārna leņķa uzdevums, °;  $\varphi_{as}$  – spārna leņķa atgriezeniskā saite, °.

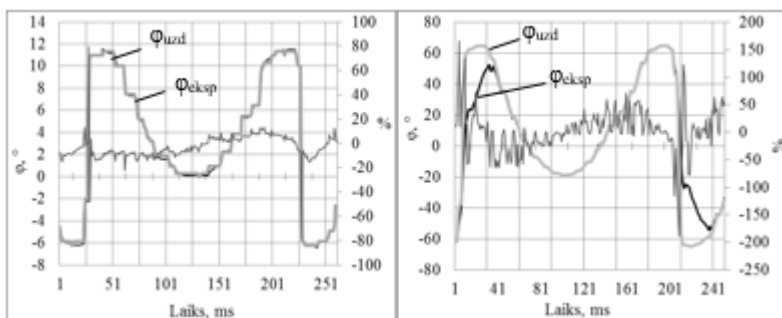
Simulācijas modeļa pārbaudei tika izveidots stends eksperimentālo mērījumu veikšanai un simulācijas modeļa validēšanai (3.13. att.). Stenda struktūras pamatā ir servo motors 3 ar maināmu slodzes masu 1. Servo motora regulēšanu veic servo regulators 4 saņemot anlogo signālu no signāla konvertatora 5. Pagrieziena leņķa uzdevums tiek smulēts reālā laikā, izmantojot MATLAB *Simulink* 6 simulācijas modeli ar spārna leņķiem (3.13. att.).



**3.13. att. Servo sistēmas eksperimentālā stenda struktūrshēma**

1 – slodze 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.

Ekspimentālie rezultāti uzrāda, ka servo motoram, strādājot bez reduktora, ir iespējams izpildīt uzdoto pagrieziena leņķa uzdevumu ar lielāku precizitāti pie nepieciešamā sistēmas uzdevuma izmaiņas ātruma (3.14. att.).



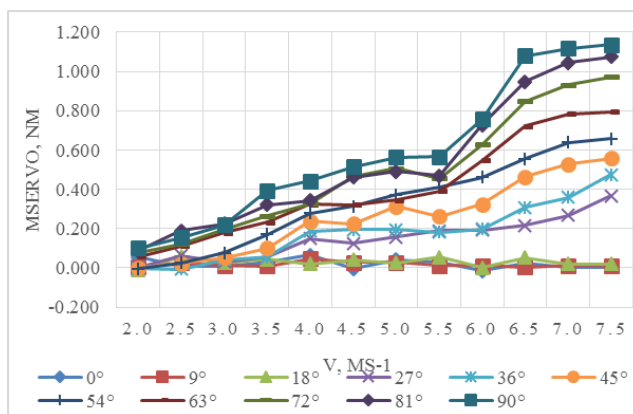
a.

b.

3.14. att. Servo sistēmas eksperimentālie rezultāti

a – servo mehānisms bez reduktora; b – servo mehānisms ar reduktoru.

Spārnu leņķa regulēšanas sistēmas ārējās perturbācijas ir spārna masas inerces moments un griezes moments, kas veidojas gaisa plūsmas iedarbes rezultātā uz spārna rotācijas asi. Pētījuma mērķis ir noskaidrot, cik liels griezes moments veidojas uz spārna rotācijas asi. Pētījumā tika izmantots 3.13.att. aprakstītais eksperimentālo mērījumu stends.



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

Ekspimentālie rezultāti uzrāda, spārnu appūtes leņķim, esot robežās no  $-20^\circ$  līdz  $+20^\circ$  spārnam pret tā leņķu regulēšanas rotācijas asi, netiek uzrādīti

papildus aerodinamiskie pretestības spēki. Palielinoties relatīvā appūtes leņķa lielumam virs 20 °, uz spārnu sāk darboties aerodinamiskais pretestības spēks. Atkarībā no aerodinamiskā pretestības spēka lieluma ir nepieciešams paredzēt servo motora papildus jaudas rezervi (3.15. att). Izmantojot eksperimentālos rezultātus, ir iespējams noteikt nepieciešamā spārna lieluma reālo aerodinamisko pretestības griezes momentu uz regulējamo rotācijas asi.

#### 4. SPĀRNU IESTATĪŠANAS LEŅĶA REGULĒŠANAS SISTĒMAS EKONOMISKAIS PAMATOJUMS

VAVES jau daudzus gadus ir kā neatņemama sastāvdaļa vēja enerģijas apguvei. VAVES lietderības koeficienta palielināšanas uzdevums ir ļoti svarīgs. Šobrīd vēl neviens ražotājs nav izveidojis VAVES ar spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, tāpēc noteikt precīzas tā izmaksas, ieņēmumus un peļņu ir apgrūtināts. 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. Servo motora jaudas izvēles analīze

Spārnu regulēšanas sistēmas servo motora jauda ir svarīga, lai sasniegtu nepieciešamo regulēšanas precizitāti un aprēķinātu iespējamās servo motora un regulatora izmaksas. Servo motora jauda spārna leņķa regulēšanai ir aprēķināma, un izvēle notiek pēc sekojošiem kritērijiem: spārna inerces momenta, VAVES spārna garuma, VAVES spārna materiāla, VAVES rotora diametra, VAVES darba ātrgaitas koeficienta, spārna centrālās spēka, gaisa plūsmas perturbācijas (4.1. tabula).

4.1. tabula

##### Spārna leņķu regulēšanas servo mehānisma jaudas analīze

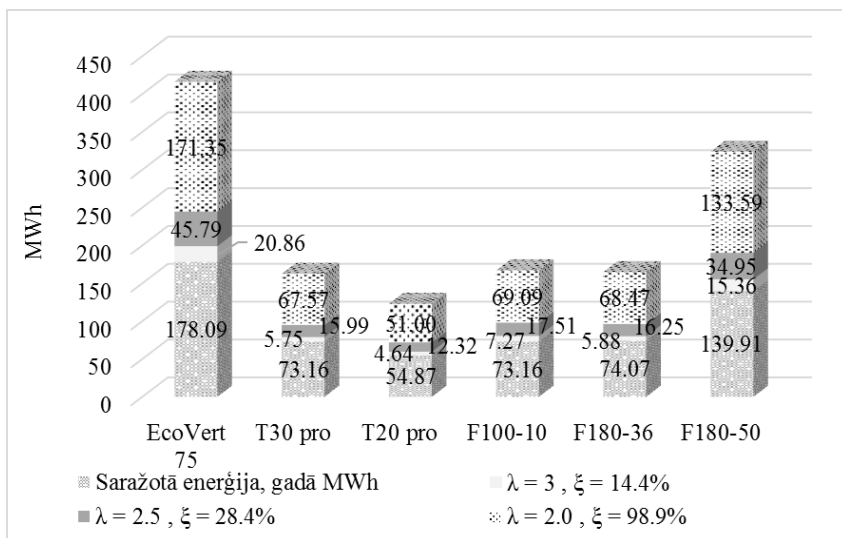
		Rādītāji	VAVES rotora rādiuss, m			
			1	2	3	4
		Hordas garums, m	0.20	0.40	0.60	0.80
		Spārna garums, m	2	4	6	8
		Spārna masa, kg	1.52	12.13	40.93	97.02
		Spārna inerces moments, kg·m <sup>2</sup>	0.002	0.060	0.456	1.912
m·s <sup>-1</sup>	12	Servo sistēmas jauda, kW	0.067	0.252	0.568	1.004
		Patērētā enerģija diennaktī, kWh	4.824	18.144	40.896	72.288
	6	Servo sistēmas jauda, kW	0.008	0.032	0.071	0.126
		Patērētā enerģija diennaktī, kWh	0.576	2.304	5.112	9.072
	5	Servo sistēmas jauda, kW	0.005	0.005	0.005	0.005
		Patērētā enerģija diennaktī, kWh	0.360	0.360	0.360	0.360
	4	Servo sistēmas jauda, kW	0.002	0.009	0.021	0.037
		Patērētā enerģija diennaktī, kWh	0.144	0.648	1.512	2.664

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.

## 4.2. Atmaksāšanās perioda analīze

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.

Latvijas teritorijās, kur vidējais vēja ātrums ir  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  VAVES saražotais elektroenerģijas daudzums pieaug atkarībā no VAVES nominālās jaudas. Pastāvīgi strādājot pie lielākiem vēja ātrumiem, padara VAVES daudz lietderīgāku un palielina cilvēkiem vēlmi to iegādāties. VAVES, strādājot režīmā ar zemāko ātrgaitas koeficientu, lietderības koeficienta uzlabošana jūtami samazina iekārtas atmaksāšanās periodu (4.1. att.).



4.1. att. Elektroenerģijas ieguvums, izmantojot spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmu, pie vēja ātruma  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Spārnu iestatīšanas leņķa regulēšanas sistēmas atmaksāšanās perioda garums ir mainīgs atkarībā no sekojošiem faktoriem: vidējā vēja ātruma uzstādāmajā vietā, VES nominālās jaudas, VES rotora darba ātrgaitas koeficienta. Atkarībā no šiem nosauktajiem faktoriem sistēmas atmaksāšanās periods var mainīties no 3 līdz pat 12 gadiem.

## SECINĀJUMI

1. 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.
2. 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.
3. Pētījumi parāda, ka, izmantojot VAVES simulācijas modeli, ir iespējams uzlabot VAVES tehnoloģiju pārbaudi projektēšanas un izstrādes režīmā, tādā veidā 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. 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.
5. 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·m<sup>2</sup> līdz 2000 kg·m<sup>2</sup>, strādājot diennakti ar vidējo vēja ātrumu 5 m·s<sup>-1</sup>, var saražot papildus 4.2 kWh elektroenerģijas.
6. Izmantojot izstrādāto simulācijas modeli par spārna aerodinamiskā griezes momenta aprēķinu, 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. 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<sup>-1</sup>, bez apsteidzošas signāla saites spārna iestatīšanas leņķa uzdevuma izpildes determinācijas koeficients  $R^2 = 0.9687$ . Izmantojot apsteidzošo rotora pozīcijas aprēķinu, uzdevuma izpilde uzlabojas un  $R^2 = 0.9993$

8. Eksperimentālie pētījumi pierāda, ka simetriskam spārna profilam, kam rotācijas ass ir novietota 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  $-20^\circ$  līdz  $20^\circ$ . Tas nozīmē, ka servo mehānisms netiek pakļauts papildus aerodinamiskajam slodzes griezes momentam.
9. Simulācijas rezultāti parāda, ka VAVES ar rotora diametru 10 m un ātrgaitas koeficientu 3 pie nominālā vēja ātruma  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  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.
10. 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).
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 nepieciešamā jauda atkarībā no spārna inerces momenta ir noteikta pēc šāda empīriskā 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 ierīkšanas 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  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vai VAVES ir nepieciešams ar lēngaitas rotoru, kam darba ātrgaitas koeficients  $\lambda \leq 2.0$ .



## URGENCY OF THE STUDY

A special attention is paid to the importance of power industry in Latvia, based on both own purposes and tasks put forward by the European Union, which are connected with energy independence, energy efficiency and specific weight of renewable energy resources (Legal Enactments of the Republic of Latvia, 2016). All proposed requirements directly affect also Latvian power industry, its production and consumption. Primary problem of power industry is energy independence. According to 2016 data, energy import in Latvia was average 21% of generated electric power; however, this figure is variable in dependence on the reviewed period and market situation.

In terms of use of renewable energy resources (hereinafter referred to as RER) Latvia occupies 3rd place after Austria and Sweden due to a large volume generated by hydroelectric power plants. River resources in Latvian territory are loaded enough to even more extend electric power production by hydroelectric power stations, therefore one of prospective solutions for promotion of energy independence on national scale is the development of wind power industry in two primary directions (Latvia Centre of Environment, Geology and Meteorology): formation of new wind parks, which is already being implemented in Western territory of Latvia where 3 largest wind parks in the country are operating; installation of low and middle power wind plants with rated electric power up to 100 kW in the decentralized way in rural and urbanized areas of Latvia.

Decentralized use of WPP is featured by more positive factors, such as no need to construct powerful electricity transmission lines and possibility to carry out electric energy production closer to the consumer in the decentralized way throughout the country's territory.

In order to promote the installation of wind plants, it is necessary to develop norm-setting documents that would specify the entire procedure, privileges and other action plans for persons who are ready to invest in acquisition and installation of wind power plants. In order the Latvian state would benefit more, the best solution would be the use of existing scientific and industrial potential to develop own wind plant that would meet the specific use requirements. In many world countries, domestic resources are politically used and promoted for government orders, which is the right step since it stimulates production and creates new jobs.

Efficient and high-value work on development of a new product will require to use modern practices and technologies. Latvian scientists have studied subjects associated with wind power industry, starting with wind power potential in individual areas of and throughout the territory of Latvia and up to development of individual solutions. Latvian scientists are the authors of more wind plant patents having the specificity and a great future potential.

Based on the importance to promote the development of wind power industry, the subject of the promotion work was chosen: "Energy efficiency improvement for vertical axis wind rotor with active pitch control", putting

forward as the work objective the development and study of a new simulation model of technological solutions for the improvement of the efficiency factor of the vertical axis wind rotor in the system of vertical axis wind plant pitch control.

The promotion work gives a review of current studies on wind power industry and use, improvement, estimates and efficiency increase of vertical axis wind plants. After analysis of existing studies, the promotion work objectives and tasks were put forward, a schedule and the methods of studies were developed.

## **HYPOTHESIS, OBJECTIVE AND TASKS OF THE STUDY**

**Scientific work hypothesis:** efficiency factor of vertical axis wind power plant can be increased through the use of the pitch control system that by means of a respective control program would carry out the pitch control at nonstationary rotor rotation speed and variable wind speed in accordance with aerodynamic load produced by controllable wings.

The proposed hypotheses include: study of vertical axis wind plant operation character, study of blade pitch angle control system, analysis of nonstationary wind flow energy impact, turbine rotor inertia impact on WPP operation and output electric power.

**Scientific work objective:** to theoretically and experimentally substantiate the multiple use of the vertical axis wind power plant (VAWPP) simulation model in modern production and development processes, the possibilities of using the wind power plant pitch control system programs.

### **Tasks put forward for attainment of the work objective:**

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.

## APPROBATION OF SCIENTIFIC WORK

### Works published in generally accepted reviewable scientific publications

1. 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, 2013. 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”*: Proceeding, 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.

### Reports at scientific conferences

5. 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.
6. 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.
7. 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.

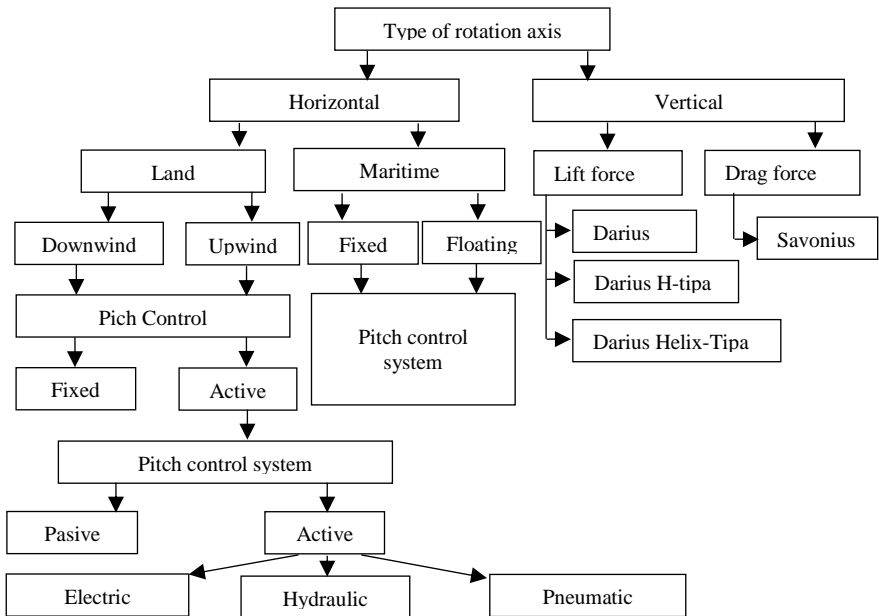
8. Komass T. (2016) Experimental Analysis of Vertical Axis Wind Turbine Active Pitch Control System with Permanent Magnet Synchronous Motor using MATLAB Simulink tools. **In:** *13<sup>th</sup> International Conference of young scientists on energy issues*: Proceeding, May 26, 2016. Lithuania, Kaunas.

### Study-related patents

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

## 1. PROBLEMS IN DEVELOPMENT AND USE OF WIND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

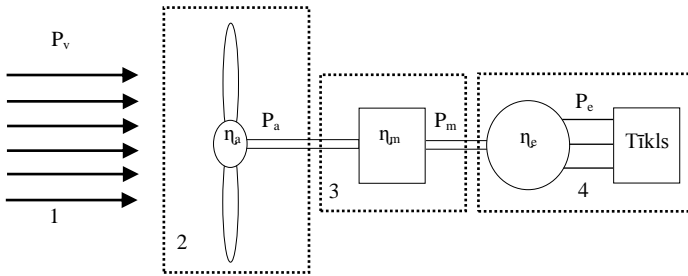
Commercial WPPs are divided into two basic groups in accordance with the rotor shaft rotation direction: horizontal axis and vertical axis. Horizontal axis WPP design is considerably more versatile compared to vertical axis WPP. It is explained by their use that has been formed during many years Fig. 1.1.).



**Fig. 1.1. WPP breakdown in accordance with design**

Horizontal axis PPS design is based on the propeller-type rotor while the vertical axis WPP rotor may be made of various blade structures, divided into two basic groups: lifting power and dragging power. Division into horizontal and vertical axis WPPs has been formed historically when WPP design was modified in accordance with necessary installation location and installed power (Fig. 1.1.).

Wind power  $P_v$ , which is calculated based on the wind flow speed, acts upon WPP rotor, at which output the aerodynamic rotor power  $P_a$  is obtained. Mechanical transmissions, such as shafts, bearings and multiplier, transmit mechanical power  $P_m$  at the output. At the end of the energy transformation stage, the mechanical energy is transformed into electric energy, generating on the output the usable electric  $P_e$  (Qasim A.Y., 2012) (1.2. att.).



**Fig. 1.2. WPP energy transformation**

1 – air flow;  $P_v$  – air flow power, kW; 2 - WPP rotor;  $P_a$  – rotor aerodynamic power, kW;  $\eta_a$  – aerodynamic efficiency factor; 3 – WPP mechanical transmissions;  $P_m$  – mechanical power, kW,  $\eta_m$  – efficiency factor of mechanical transmissions; 4 – WPP electric generator and electric equipment;  $P_e$  – active electric power, kW;  $\eta_e$  – electric efficiency factor.

## 1.1. Comparative Analysis of WPP Design Solutions

Having processed all the reviewed information, a comparison was prepared between the horizontal axis wind power plant (hereinafter referred to as HAWPP) and the vertical axis wind power plant (hereinafter referred to as VAWPP). The advantages and drawbacks are reviewed in two ranges of blowing area  $S$ :  $<100 \text{ m}^2$  and  $>100 \text{ m}^2$ . The most expressed distinction of VAWPP is workability at low wind speed; however, its operation is restricted by big wind flows because VAWPP does not use the blade pitch control system.

The advantages and drawbacks of HAWPP and VAWPP should be assessed and compared in dependency on specific application. In locations with lower wind speeds more preference is given to VAWPP while HAWPP, on the contrary, is capable to work more efficiently at higher wind speeds. At present time, a large market segment with the blowing area up to  $100 \text{ m}^2$  is occupied just

by VAWPPs since their properties are more adapted to the urbanized environment conditions (Gardiner G., 2011).

Table 1.1.

### Comparison of HAWPP and VAWPP

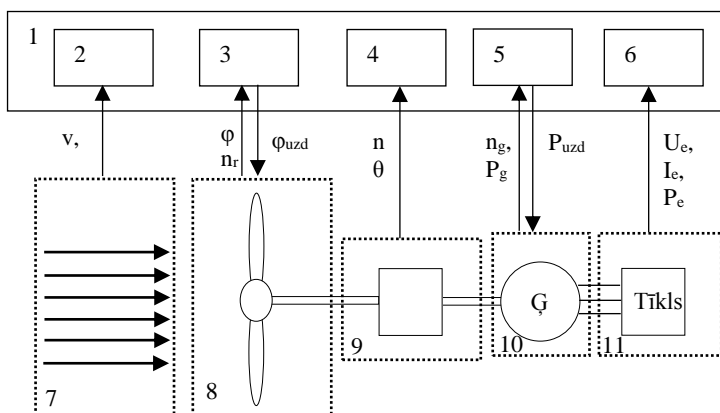
Positions	S < 100 m <sup>2</sup>		S > 100 m <sup>2</sup>	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Rotor type	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Blade profile	Asymmetric	Symmetric	Asymmetric	Symmetric
Way direction tracking mechanism	Active or passive	Not used	Active	Not used
Blade pitch mechanism	Active or passive	Not used	Active or passive	Not used
Noise level	(5 – 60 dB)	(0 – 10 dB)	(10–70 dB)	(10 – 30 dB)
v <sub>min</sub>	2.5 – 5 m·s <sup>-1</sup>	1.5 – 3 m·s <sup>-1</sup>	4.5 – 5 m·s <sup>-1</sup>	3.0 – 5 m·s <sup>-1</sup>
v <sub>max</sub>	~25 m·s <sup>-1</sup>	~15 m·s <sup>-1</sup>	~25 m·s <sup>-1</sup>	~15 m·s <sup>-1</sup>
Rotor self-start	Yes	Yes	Yes	Yes
Use of multiplier	At choice	At choice	Necessary	Necessary
Tip Speed Ratio	~ 6	~3 to 4	~ 6	~3 līdz 4
Mast height	L <sub>masts</sub> = 5·D	L <sub>masts</sub> = 2·D	L <sub>masts</sub> = 2·D	L <sub>masts</sub> = 1.5·D

v<sub>min</sub> – cut in wind speed, m·s<sup>-1</sup>; v<sub>max</sub> – cut off wind speed; D – rotor diameter

In order to increase the efficiency factor of VAWPP within the electric power range 10 kW to 100 kW, new practical development should be carried out. Reviewing VAWPPs with power 10 kW demonstrates a small number of installed VAWPPs since VAWPP efficiency factor is lower compared to HAWPPs (Halstead R, 2011). More efficient commercialization of VAWPPs requires carrying out new developments, such as improvement of rotor design and mechanical transmission, increase in energy efficiency with active pitch control, development of a special design for electric generator.

## 1.2. Analysis of WPP Control System, Review of Pitch Control System

WPP control system in accordance with the technical assignment requirements performs more functions: brake system control, blade pitch control, nacelle swing angle control, electrical load control, load and electric network diagnostics, generator diagnostics. Programmable logic controller (hereinafter referred to as PLC) reads information from each WPP unit and equipment device wherein measurement sensors are installed (Fig.1.3.).



**Fig. 1.3. Breakdown of WPP control devices according to performable function**

1 – central control systems; 2 – wind flow measurement interface; 3 – blade pitch control and measurement; 4 – mechanical transmission diagnostics; 5 – electric generator load control and measurement; 6 – electric network measurement equipment and network inverter control; 7 – air flow; 8 – turbine rotor and blades; 9 – mechanical transmission; 10 – electric generator; 11 – electric network or other type of load;  $v$  – wind speed,  $m\ s^{-1}$ ;  $\phi$  – air flow direction,  $^{\circ}$ ;  $\varphi$  – blade pitch,  $^{\circ}$ ;  $n_r$  – rotor rotation speed,  $min^{-1}$ ;  $\varphi_{uzd}$  – preset blade pitch,  $^{\circ}$ ;  $n$  – mechanical shaft rotation speed,  $min^{-1}$ ;  $\theta$  – rotor angle,  $^{\circ}$ ;  $n_g$  – generator rotation speed,  $min^{-1}$ ;  $P_g$  – generator electric power, kW;  $P_{uzd}$  – preset generator power, kW;  $U_e$  – mains voltage, V;  $I_e$  – mains current, A;  $P_e$  – mains power, kW.

Wind direction measurements are necessary for VAWPP pitch or HAWPP nacelle swing angle control equipment (Fig. 1.3.). Solution for the increase in VAWPP efficiency factor is the blade pitch control system that is capable to supervise the optimal rotor blades aerodynamic angles. HAWPP blade pitch control system is available in most of the offered WPPs. VAWPP blade pitch control system is not offered commercially. In order to offer in future VAWPP blade pitch control system, it is necessary to carry out a detailed study of its possible technical solutions. Blade pitch control is provided by means of decentral PLC or WPP central PLC. Optimal blade pitch is estimated at the output in accordance with the system measurements of wind speed, rotor rotation speed and angle. Use of servomechanisms allows to implement the estimated pitch.

Servo regulator 10 consists of logic control 6 and power interface 9.

Servo regulator controls the servomechanism in accordance with the preset pitch. Logic control electronic circuit ensures execution of the prepared logical program by the servo regulator as well as diagnostics of servo regulator and servomotor. Servomotor angle electromechanical sensor 5 and servo regulator 10 form a closed circuit (Fig. 1.4.).

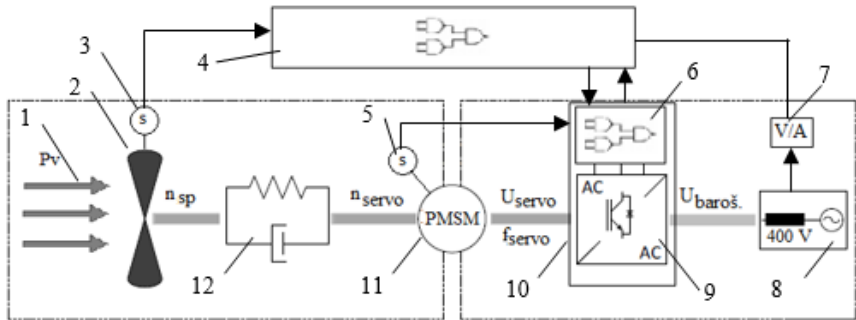


Fig. 1.4. Arrangement of WPP blade pitch control system

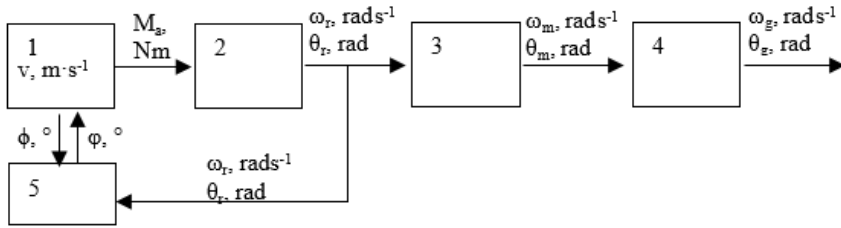
1 – air flow; 2 – WPP rotor blade; 3 – blade pitch measurement device; 4 – blade pitch control system; 5 – servo mechanism swing angle measurement device; 6 – servo regulator control unit; 7 – electric network measurement equipment; 8 – electric network; 9 – servo regulator power interface; 10 – servo regulator; 11 – servodrive; 12 – gearbox and mechanical transmission;  $P_v$  – air flow power, kW;  $n_{sp}$  – blade rotation speed,  $\text{min}^{-1}$ ;  $n_{servo}$  – servomotor rotation speed,  $\text{min}^{-1}$ ;  $U_{servo}$  – servomotor voltage, V;  $f_{servo}$  – servomotor voltage frequency,  $\text{s}^{-1}$ ;  $U_{baroš.}$  – mains voltage, V.

VAWPP simulation model allows not only simulating the physical processes but also compiling the control system logical program (Komass T., 2014). The program can be tested with the prepared WPP simulation physical model. Such solution helps to check the control system logical program. Depending on how precisely VAWPP physical model is constructed, it is possible to obtain approximated or precise control system program. MATLAB *Simulink* user is provide with the control system program conversion from *Simulink* graphic program language into PLC language ST (*Structure Text*).

## 2. DEVELOPMENT OF VAWPP TECHNOLOGICAL EQUIPMENT SIMULATION MODEL

Working out of VAWPP simulation model is necessary in order to improve the development of new products and provide their faster reaching the consumer sector. The simulation model structure should be built as modular, establishing an individual subsystem for each WPP equipment unit. In order to reach the study objective, it is necessary to review each WPP equipment unit that needs a repeated development of the simulation model subsystem (Fig. 2.1.).





**Fig. 2.1. Structure of VAWPP simulation model**

1 – air flow aerodynamic torque simulation subsystem; 2 – WPP rotor simulation subsystem; 3 – mechanical transmission simulation subsystem; 4 – generator simulation subsystem; 5 – blade pitch control system;  $v$  – air flow speed,  $\text{m s}^{-1}$ ;  $M_a$  – aerodynamic torque,  $\text{Nm}$ ;  $\omega_r$  – rotor rotation speed,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $\theta_r$  – rotor rotation angle,  $^\circ$ ;  $\omega_m$  – mechanical transmission output rotation speed,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $\theta_m$  – mechanical transmission output rotation angle,  $^\circ$ ;  $\omega_g$  – generator shaft rotation speed,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $\theta_g$  – generator shaft rotation angle,  $^\circ$ ;  $\phi$  – air flow angle against north direction,  $^\circ$ .

Choosing such simulation model structure allows to conveniently construct WPP simulation model in accordance with specified pattern. To ensure a complete compatibility with actual objects, it is necessary to create a parameter input window for each subsystem. Adding the subsystem to the simulation model and entering the actual object parameters allow to obtain a functioning element of the simulation model. Modular solution of the simulation model will provide a wider usability. Obtaining new outcomes of physical object studies allows to conveniently carry out improvements of individual subsystems or their adaption to the new outcomes (Komass T., 2013b).

## 2.1. Experimental Measurements of Wind Speed

Measurements were carried out in Belgian town Ostende within the period 03.09.2014 to 12.11.2014. Airflow measuring instrument 2 was installed on 12m high mast and connected to readout device 3. Data recording and processing were carried out with use of computer program MySQL 4 (Fig. 2.2.). Measuring instrument was calibrated in accordance with instructions in the user manual.

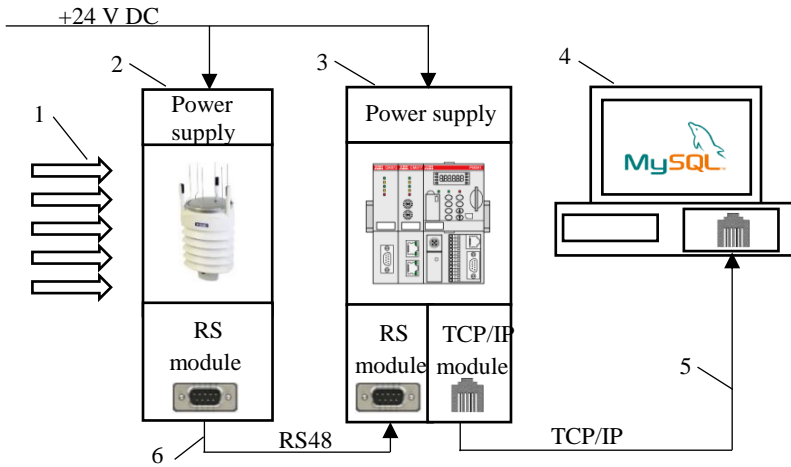


Fig. 2.2. **Connection diagram of wind parameter measurements**

1 – wind; 2 – WXT520 air flow speed and direction measuring equipment; 3 – PM573 data readout and processing equipment; 4 – computer with installed data storage program MySQL; 5 – TCP data transmission channel; 6 – RS485 data transmission channel with ACSII protocol.

Data of experimental measurements demonstrates an expressed nonlinear character of wind speed. It is the reason why the use of experimentally measured data in VAWPP simulation model is important for possibly more precise exposure of the simulation model to natural conditions during the validation (Fig. 2.3.).

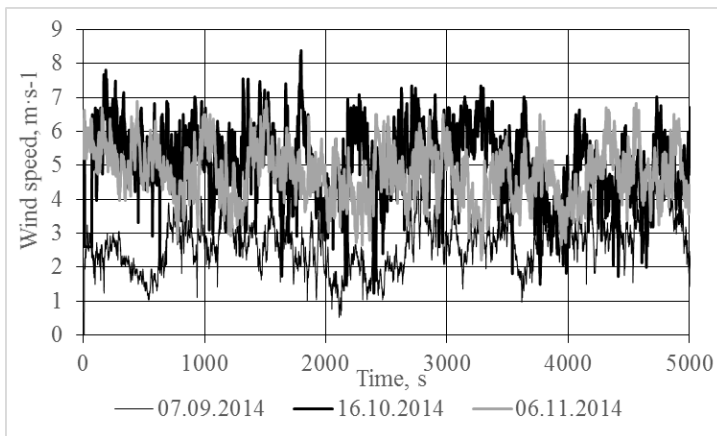


Fig. 2.3. **Wind speed measurements in Belgian town Ostende**

## 2.2. Development of Aerodynamic Torque Simulation Model

Lift force projection on the blade linear speed vector axis is a force that performs rotational movement of wind turbine. Drag force projection on the blade linear speed vector axis is a braking force against the movement direction. Value of lift force and braking force at a certain airflow speed is determined by lift force coefficient  $CL$  and braking force coefficient  $CD$ . Studies demonstrate that coefficients  $CL$  and  $CD$  are only obtainable experimentally. Lift force and drag force projections on the blade linear speed vector axis can be estimated as follows (Savejo):

$$F_L = \sin(\tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta}{\frac{R \cdot \omega_r}{v} + \cos \theta}\right)) \cdot ((\cos \theta \cdot v + \omega \cdot R)^2 + (\sin \theta \cdot v)^2) \cdot CL \cdot \frac{c \cdot l \cdot \rho}{2}, \quad (2.1.)$$

$$F_D = \cos(\tan^{-1}\left(\frac{\sin \theta}{\frac{R \cdot \omega_r}{v} + \cos \theta}\right)) \cdot ((\cos \theta \cdot v + \omega \cdot R)^2 + (\sin \theta \cdot v)^2) \cdot CD \cdot \frac{c \cdot l \cdot \rho}{2}, \quad (2.2.)$$

- where  $l$  – blade length, m;  
 $F_L$  – lift force projection, N;  
 $F_D$  – drag force projection, N;  
 $v_\tau$  – tangential wind speed vector;  
 $v_r$  – radial wind speed vector;  
 $\omega_r$  – turbine rotor rotation angular speed,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  
 $R$  – turbine rotor radius, m;  
 $v$  – wind flow speed,  $\text{m s}^{-1}$ .

Subsystem “*AerodynamicBlade*” is developed with the objective of realtime simulation of aerodynamic forces. Internal structure of simulation model subsystem consists of input signal readout ports, mathematical calculation functions, browsing tables, output port and recording port. The system is arranged in a logical sequence of mathematical calculations in order to perform a precise calculation of aerodynamic forces and torque during the cycle. In this simulation model, NACA0018 profile is chosen with  $CL$  and  $CD$  values at respective Reynolds number (Fig. 2.4.) (Komass T., 2015b).

The importance of the simulation model is in the possibility of its use in further studied. The created open structure of the simulation model allows to conveniently carry out various modifications and use the additional output information that is additionally required by the vector estimate method. The subsystem provides all force vectors numerical values and values of angles against the blade rotating coordinate axis (Komass T., 2015b).

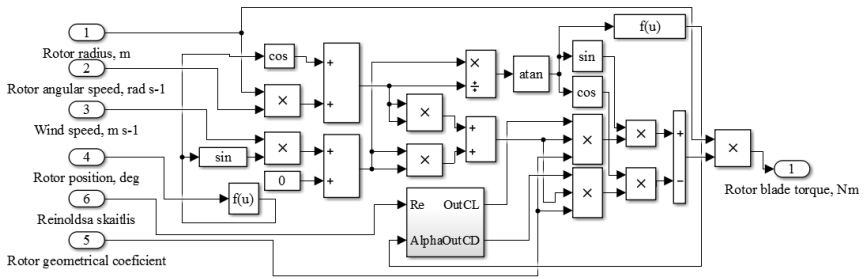


Fig. 2.4. One blade aerodynamic torque simulation model subsystem “AerodynamicBlade”, internal structure

In aerodynamic force calculation model, the turbine rotor rotates with  $1^\circ$  step. Simulation model step  $\text{sim\_Step} = 0.01$  s, which provides  $0.01^\circ$  estimate step for the simulation model. During the simulation, the torque estimate is checked at rotor rotation angle from  $0^\circ$  to  $360^\circ$ . Rotor rotation angle  $0^\circ$  is against airflow direction (Fig. 2.5.).

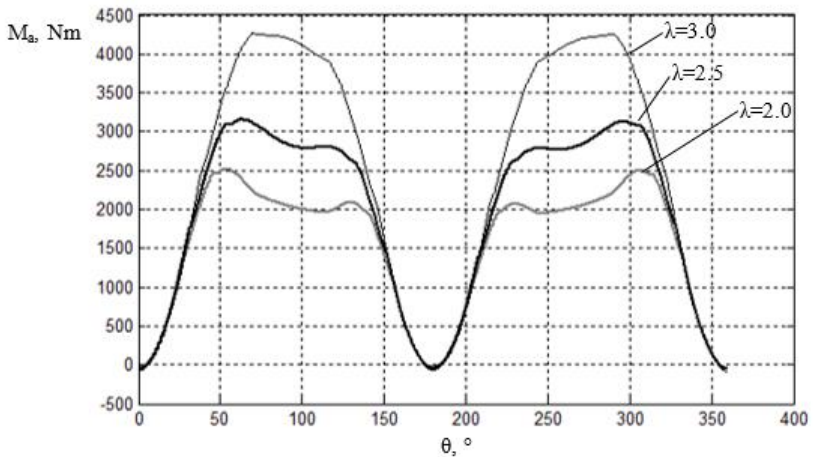


Fig. 2.5. Blade torque simulation results

To reach the set objectives and the correspondence of the simulation model to the actual object, it is necessary to use the aerodynamic force vector estimate method. Use of this estimate method provides the simulation model with a precise calculation of aerodynamic torque per blade in dependence to rotor relative rotation angle against wind (Komass T., 2015a).

### 2.3. Development of VAWPP Rotor Simulation Model

Scientific articles analyze aerodynamic transition processes in wind turbines. The studies prove that the wind turbine inertia value can affect the amount of generated electric energy. It is necessary to additionally study how much the energetic benefit is affected upon change in rotor inertia moment, what is this impact and to what extent it is connected with the construction of the very WPP load control system (Komass T., 2013c). transitional process from the wind speed change to WPP rotor rotation speed change can be described by the first degree inertial stage, which is expressed by the transmission function (Komass T., 2013a) (Fig. 2.6.):

$$W_t(s) = \frac{\omega_r(s)}{v(s)} = \frac{K_t}{\left(\frac{J_r \cdot \omega_{r.nom}}{M_{r.nom}}\right) \cdot s + 1} \quad (2.3.)$$

where  $W_t(s)$  – WPP rotor transmission function;

$\omega_r(s)$  – Laplace transformation from rotor angular speed, rad s<sup>-1</sup>;

$v(s)$  – Laplace transformation from wind speed, m s<sup>-1</sup>;

$K_t$  – WPP rotor transmission ratio, rad m<sup>-1</sup>;

$J_r$  – WPP rotor inertia moment, kg m<sup>2</sup>;

$\omega_{r.nom}$  – WPP nominal angular speed, rad s<sup>-1</sup>;

$M_{r.nom}$  – WPP rotor nominal torque, Nm.

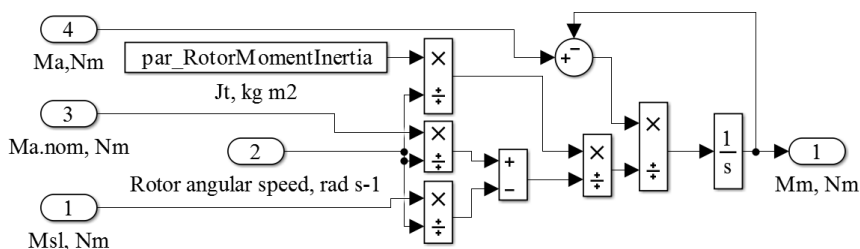


Fig. 2.6. Turbine rotor subsystem with use of open transmission function

Impact of rotor inertia on VAWPP operation quality and amount of generated electric energy is determinable both theoretically and experimentally. Use of the constructed simulation model for VAWPP rotor allows to study the rotor inertia moment impact on the amount of generated electric energy. Prior to use of the simulation model in this experiment, it was validated by experimental data. The experiment was carried out in third quarter of 2015 in Belgian town Ostende. The experimental object was VAWPP named “Flyfox-20kW”, consisting of two-section rotor with four blades in each section, rotor diameter and blade length 7.5 m (Fig. 2.7.) (Komass T., 2013a).

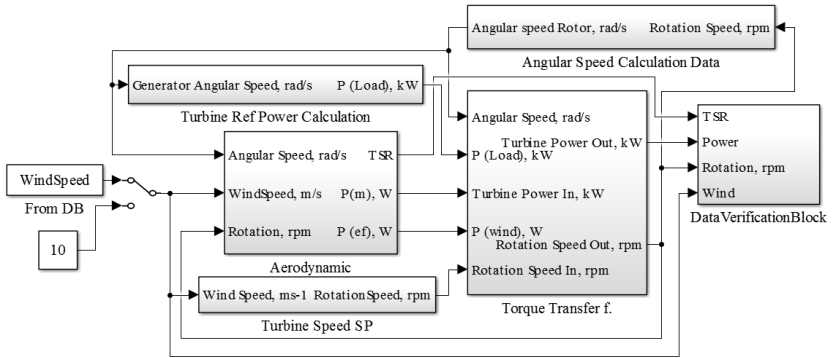


Fig. 2.7. “Flyfox-20kW”, simulation model of transitional processes

Reviewing “Flyfox-20kW” simulation results within a phase where WPP rotor has accelerated and stabilized demonstrate that the simulation model data closely coincides with WPP experimental measurements. Statistical analysis of simulation and experimental data shows the data coincidence with  $R^2 = 0.842$  (Fig. 2.8.).

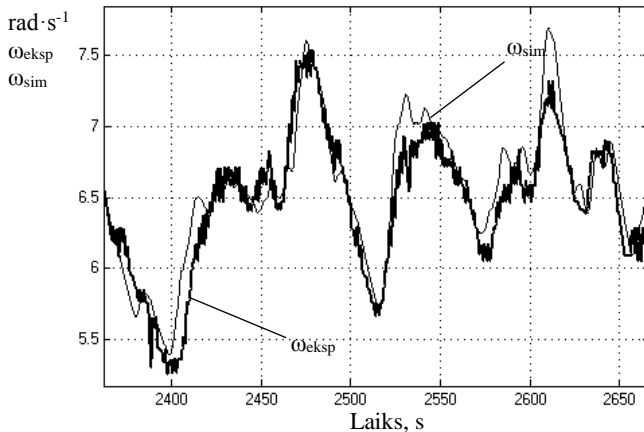


Fig. 2.8. “Flyfox-20kW” validation results

Because of the experimental study, simulation model of WPP rotor and aerodynamic forces is developed and approved in MATLAB *Simulink* environment. Development of the model is carried out for both the aerodynamic forces estimate and rotor inertia transition function and loading algorithm. The developed simulation model is further employed in VAWPP simulation model for blade pitch approximation.

## 2.4. Development of Mechanical Transmission Simulation Model

WPP aerodynamic energy mechanic transmission system consists of wind turbine slow-speed shaft, multiplier and highspeed shaft (Fig. 2.9.). Analysis of solutions proposed in scientific studies gives a review of design without use of a multiplier in WPP, substituting it for a permanent magnet synchronous multipole generator. Permanent magnet multipole generators can be constructed in various designs, reaching the required slow speed (Komass T., 2013a).

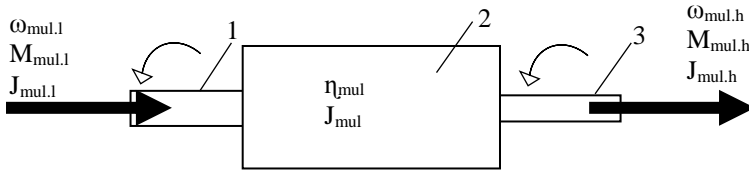


Fig. 2.9. **Diagram of mechanical transmission energy flow**

1 – slow-speed shaft; 2 – multiplier; 3 – highspeed shaft;  $\omega_{mul,l}$  – low-speed shaft rotation speed,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $M_{mul,l}$  – low-speed shaft torque, Nm;  $J_{mul,l}$  – low-speed shaft inertia moment,  $\text{kg m}^2$ ;  $\eta_{mul}$  – multiplier efficiency factor;  $J_{mul}$  – multiplier total inertia moment,  $\text{kg m}^2$ ;  $\omega_{mul,h}$  – highspeed shaft rotation speed,  $\text{rad s}^{-1}$ ;  $M_{mul,h}$  – highspeed shaft torque, Nm;  $J_{mul,h}$  – highspeed shaft inertia moment,  $\text{kg m}^2$ .

When developing the multiplier subsystem model in MATLAB *Simulink* environment, the parameter input was used via the subsystem parameter window. The efficiency factor search table receives torque, rotation speed and gear ratio as the input signals. Highspeed shaft torque and rotation speed are calculated at the multiplier subsystem output (Fig. 2.10.).

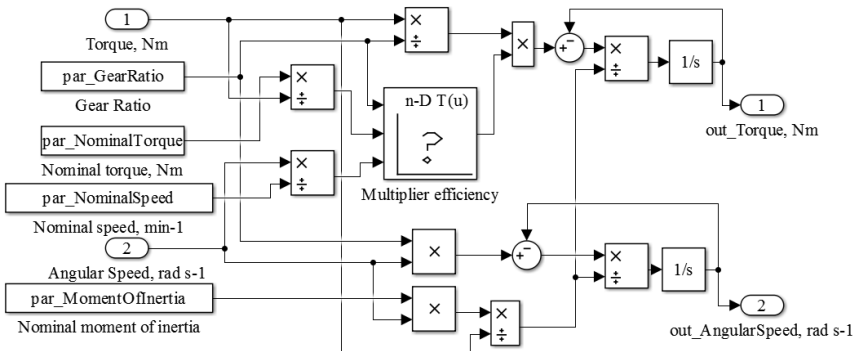


Fig. 2.10. **Internal structure of multiplier subsystem**

## 2.5. Development of PMSG Simulation Model

To attain the promotion work objectives, simulation is made of the generator's electromechanical properties, voltage source and current source function (Fig. 2.12.). Voltage of PMSG (permanent magnet synchronous generator) is a linear function of rotation frequency  $U_g = f(f_g)$  (Komass T., 2013b):

$$\left(\frac{J_g \cdot \omega_{g,n}}{M_{g,n}}\right) \frac{dU_g}{dt} + U_g = \frac{U_{nost}}{\omega_{nost}} \cdot \omega_g, \quad (2.4)$$

- where  $T_m$  – electromagnetic time constant, s;  
 $\omega_g$  – generator rotation angular frequency, rad s<sup>-1</sup>;  
 $U$  – generator output voltage, V;  
 $\omega_{g,n}$  – PMSG rotation nominal angular frequency, rad s<sup>-1</sup>;  
 $J_g$  – PMSG inertia moment, kg m<sup>2</sup>;  
 $M_{g,n}$  – PMSG nominal torque, Nm.

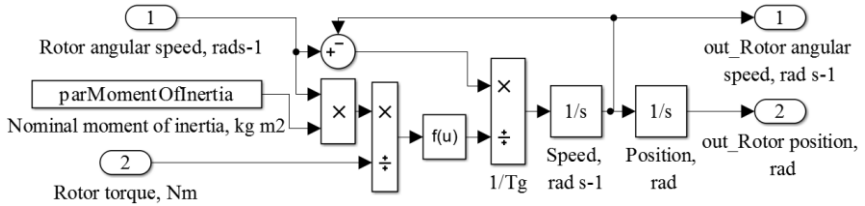


Fig. 2.12. PMSG mechanical transition processes simulation subsystem

PMSG simulation model constructed and validated as a result of the studies can be used in general VAWPP simulation model. Depending on specificity of the studies, the model is easily modifiable for specific needs of the studies, thus making the model applicable and usable in nonstandard studies.

## 3. DEVELOPMENT OF BLADE AERODYNAMIC PITCH CONTROL SYSTEM AND SIMULATION MODEL

Latest studies, aerodynamic calculations and outcomes of modelling evidence that the correction of wind turbine blade pitch allows to increase the turbine efficiency factor (Komass T., 2015c). VAWPP with fixed blade pitch has the wind energy efficiency about 14% lower than turbines with controllable blade pitch.

The studies have proved that in HAWPP design a preference is given to active automatic wind rotor blade pitch control with independent electric servomechanisms for each blade. Turbines with power < 5 kW require electromechanical centralized blade pitch control. VAWPP blade aerodynamic pitch control system until now has not been applied in any of existing commercial products (Komass T., 2016).



### 3.1. Development and Analysis of Blade Pitch Active Control System Design Solution

Servomotors 6 are used as electric drive. Servomechanism with gearbox has advantages: mechanical vibration absorption in gearbox 5; possibility to use a motor with lower torque; radial and axial load absorption in gearbox; stability of servosystem (Komass T., 2016) (Fig. 3.1.).

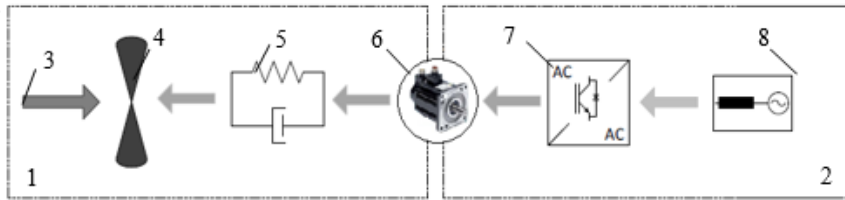


Fig. 3.1. **Blade pitch control system with gearbox**

1 – mechanical stage of blade pitch control system; 2 – electronic stage of blade pitch control system; 3 – air flow; 4 – blade structure; 5 – gearbox; 6 – servomotor; 7 – servo regulator; 8 – power supply.

Design without gearbox uses servomotors 5 with hollow middle part where through the blade rotation shaft can be moved. Such design of servomotor is convenient and adapted for such technological solutions (Komass T., 2016) (Fig. 3.2.).

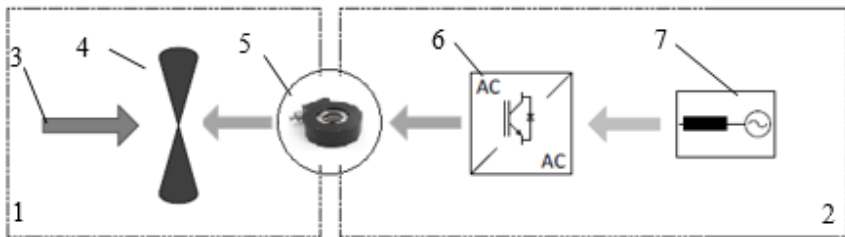
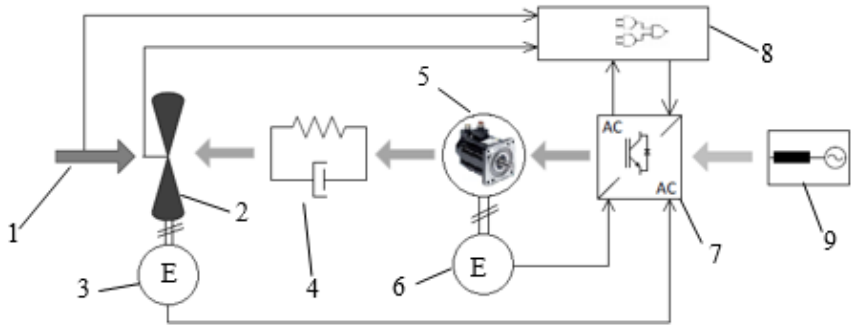


Fig. 3.2. **Blade pitch control system design solution without gearbox**

1 – mechanical stage of blade pitch control system; 2 – electronic stage of blade pitch control system; 3 – wind flow and its perturbation on blade surface; 4 – blade structure; 5 – servomotor; 6 – servo regulator; 7 – power supply.

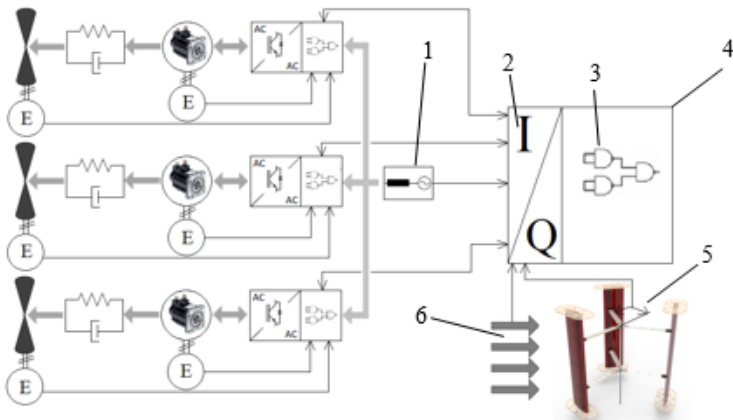
One blade pitch control system includes servomotor 7, drive regulator 7, mechanical transmission 4 and blade rotation angle measuring devices 3 and 6. Servomotor is controlled by servo regulator consisting of power and logic control interface. Central control system 8 measures wind speed and direction, rotor rotation angle, blade actual rotation angle (Fig. 3.3.).



**Fig. 3.3. Block diagram of blade pitch drive control system**

1 – wind flow perturbation on blade mechanical structure; 2 – blade mechanical structure; 3 – blade pitch electromechanical measuring device; 4 – gearbox; 5 – servomotor; 6 – servomotor rotation angle electromagnetic measuring device; 7 – servo regulator; 8 – central controller; 9 – power supply.

VAWPP with three actively controlled blades, each of which works as an autonomous element. Blade control system uses the central controller that performs data readout 2 and processing 3, estimating the preset pitch for each blade (Komass T., 2016) (Fig. 3.5.). Power supply is provided by the central power source.



**Fig. 3.5. Block diagram of blade pitch drive control system**

1 – centralized power supply; 2 – central controller input/output interface; 3 - central controller logic program interface; 4 – central controller; 5 – wind rotor rotation angle measuring device; 6 - wind measuring device.

### 3.2. Servo Regulator Control Algorithm Analysis and Development in Simulation Model

Servo regulators, regardless of manufacturer, are provided with a unified servomotor control program structure consisting of 3 series-connected circuits: current control circuit 5, speed control circuit 4, position control circuit 3 (Fig. 3.10). Some manufacturers use in the regulators also the feedforward control circuits in some of necessary control units.

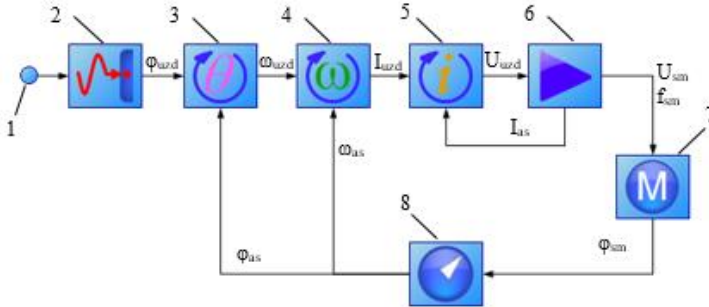


Fig. 3.6. Basic structure of servomotor regulator control circuit

1 – position setting; 2 – signal processing module; 3 – position control circuit; 4 – speed control circuit; 5 – current control circuit; 6 – IGBT regulation; 7 – servomotor; 8 – servo motor position sensor;  $\varphi_{uzd}$  – rotation angle setting, °;  $\varphi_{as}$  – rotation angle feedback, °;  $\omega_{uzd}$  – rotation speed setting;  $\omega_{as}$  – rotation speed feedback;  $I_{uzd}$  – current setting, A;  $I_{as}$  – servomotor current measurements, A;  $U_{uzd}$  – IGBT voltage setting, V;  $U_{sm}$  – servomotor control voltage, V;  $f_{sm}$  – servomotor voltage frequency,  $s^{-1}$ ;  $\varphi_{sm}$  – servomotor rotation angle, °.

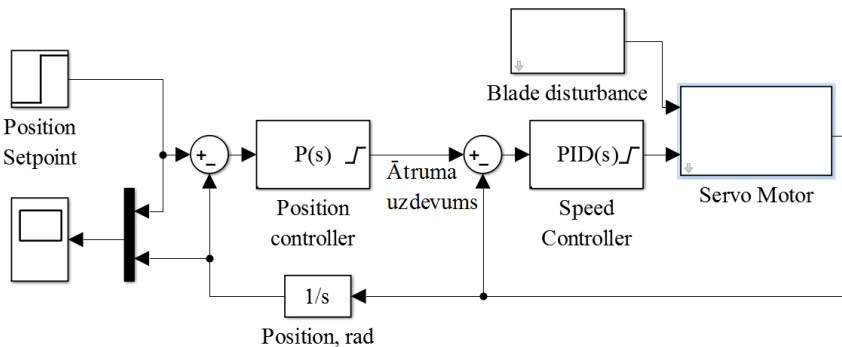


Fig. 3.7. Simulation model of servomotor and regulator

Outcomes of simulation demonstrate that simulation model on Fig. 3.7. regulates the preset position setting and can be parameterized for the required regulation object. Outcomes of simulation show that speed and position control circuits should be adjusted by input of precise parameters of the regulation object in order the simulation model would have adequate inertia moments (Komass T., 2016) (Fig. 3.8.).

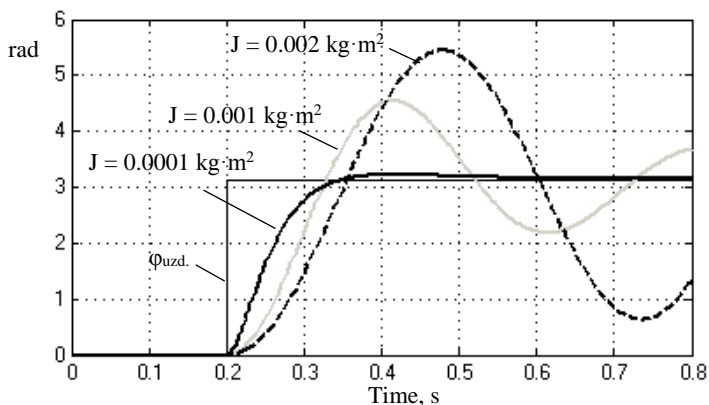


Fig. 3.8. **Execution of position setting at various inertias of object**  
 $\varphi_{uzd}$  – position setting signal, °;  $J$  – load inertia moment,  $\text{kg m}^2$ .

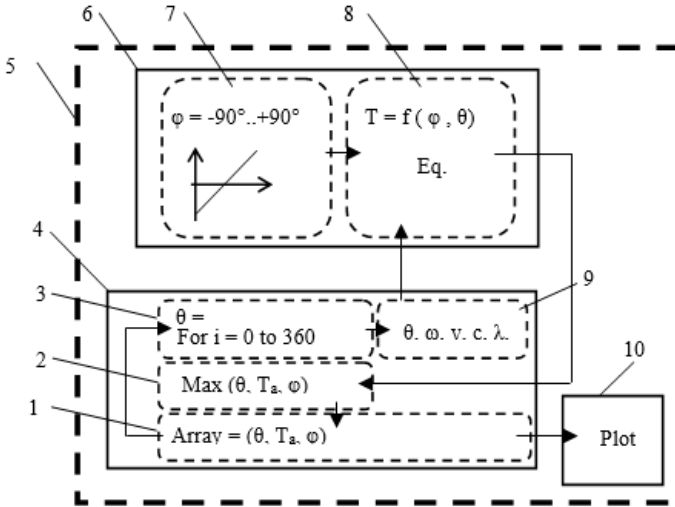
Control circuits of servo regulators are parameterized in a definite sequence (Komass T., 2015c). The simulation model also should retain this sequence thus ensuring an adequate outcome. First of all the current control circuit is parameterized, then the speed control circuit. At last, the position execution circuit is parameterized. Inadequate parameter setting in any of lower circuits can affect the output results of superior control circuits. If parameters are changed in any of lower circuits, then parameters should be simultaneously checked in all superior circuits.

### 3.3. Blade Optimal Aerodynamic Pitch Estimate

Blade aerodynamic pitch control system is aimed to obtain a higher VAWPP efficiency factor. It means that at a definite rotor turn each blade has its own optimal aerodynamic pitch. The reviewed studies have no indications of what are the optimal aerodynamic pitch as a function of rotor rotation angle and rotor highspeed ratio.

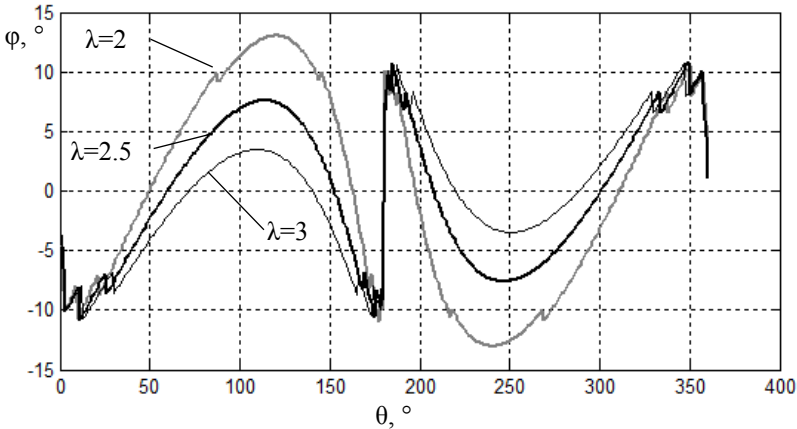
A special estimate program was developed in *MATLAB Editor* environment. Upon entry of necessary input parameters, the program cycle calls the simulation model. During each simulation call, the blade pitch from  $-90^\circ$  to  $+90^\circ$  is simulated with  $0.1^\circ$  step. Simulation estimate from *Editor* program by simulation of 360 rotor turns with  $0.1^\circ$  step. After one cycle estimate, the highest

reached aerodynamic torque is found in the data array at definite blade pitches (Fig. 3.9.) (Komass T., 2015c).



**Fig. 3.9. Aerodynamic pitch analysis program structure**

1 – outcomes of aerodynamic pitches; 2 – optimal pitch search algorithm; 3 – rotor rotation angle setting algorithm; 4 – data estimate and simulation results processing module; 5 – aerodynamic pitch estimate program; 6 – blade torque estimate simulation model; 7 – blade pitch modelling; 8 – blade torque estimate by input data; aggregate input parameters of blade torque estimates; 10 – data graphic procession.



**Fig. 3.10. Characteristic curves of improved blade pitch correction  $\phi$  in dependence to turbine tip speed ratio**

When testing the calculation model, the following turbine settings were chosen: turbine highspeed ratio  $\lambda = 2.0, 2.5, 3.0$ ; turbine blade chord  $c = 1$  m; ambient air temperature =  $20^{\circ}\text{C}$ ; wind speed  $v = 10$  m·s<sup>-1</sup>; blade length  $l = 10$  m; rotor rotation angle  $\theta = 0^{\circ} \dots 360^{\circ}$ ; wind flow direction angle  $\phi = 0^{\circ}$ ; blade pitch  $\varphi = -90^{\circ} \dots +90^{\circ}$ . The program output results evidence that the pitch characteristic curves depend on the rotor highspeed ratio (Fig. 3.10.). Output results of the simulation system prove that the study objective is attained, obtaining the optimal blade pitches a function of the turbine rotor rotation angle  $\varphi = f(\theta)$ . The obtained outcomes reflect the internal correlation between wind turbine parameters (Komass T., 2015c).

### 3.4. Development of Blade Pitch Control Simulation Model

WPP has modular blade pitch control system where each module is responsible for its blade. The system structure includes three individual blade control modules where each module includes its own control servomotor with blade. The entire system is provided with a single common pitch setting calculation unit. Central control system unit tracks all central processes and the output signal is estimated and formed in dependence to the rotor rotation angle, wind flow direction and turbine working position (Fig. 3.11.).

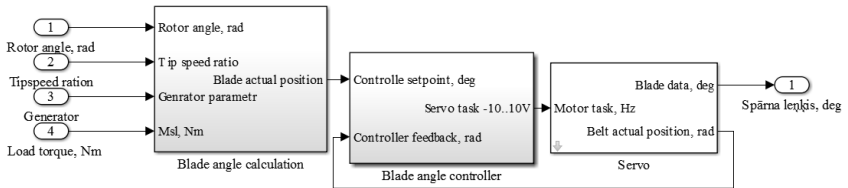
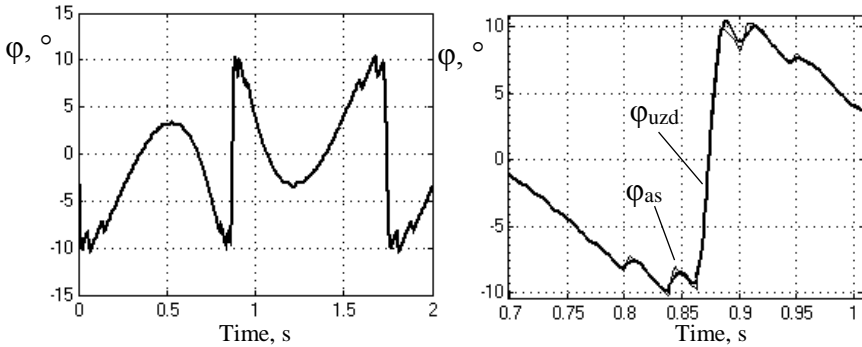


Fig. 3.11. Blade pitch control system simulation model

Use of the constructed blade pitch control simulation model allows to carry out the simulation testing in order to find out how the system could follow the specific characteristic curves of the setting with the use of servomotor. Characteristic curve of rotation angle setting is obtained from the results of blade aerodynamic pitch calculations.

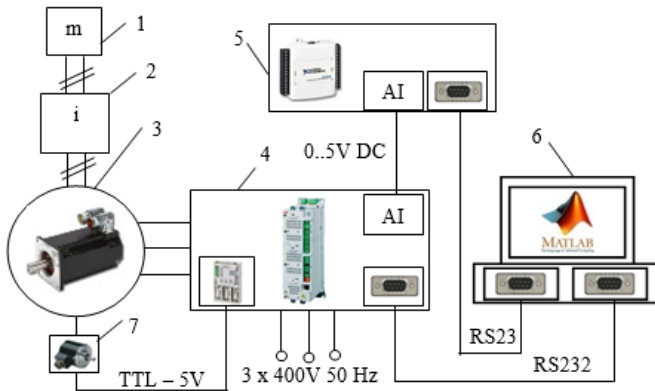
The results of simulation, which are registered in the blade pitch control system simulation model, demonstrate that the pitch setting is fulfilled with a high precision. Use of the feedforward control setting calculation improves the output simulation results. Analysis of preset and executed pitch data evidences that the determination coefficient  $R^2 = 0.9687$  with standard deviation  $1.199^{\circ}$ . At equal conditions and use of feedforward rotor position calculation  $R^2 = 0.9993$  with standard deviation  $0.168^{\circ}$  (Fig. 3.12.).



**Fig. 3.12. Simulation results of blade pitch correction servomechanism setting execution**

$\varphi_{uzd}$  – blade pitch setting, °;  $\varphi_{as}$  – blade pitch feedback, °.

To carry out testing of the simulation model, a stand was made for performance of experimental measurements and validation of the simulation model (Fig. 3.13.). The stand basic structure includes servomotor 3 with variable load mass 1. Servomotor is controlled by means of servo regulator 4 upon receipt of analogue signals from signal converter 5. Rotation angle setting is simulated in realtime using MATLAB *Simulink* 6 simulation model with blade pitches (Fig. 3.13.).



**Fig. 3.13. Block diagram of servo system experimental stand**

1 – load or blade prototype; 2 – gearbox; 3 – permanent magnet synchronous servomotor; 4 – servo regulator ACSM1; 5 – signal switchboard and converter; 6 – computer with MATLAB software; 7 – motor rotation angle resolver-type measuring device.

Experimental results demonstrate that servomotor working without gearbox allows to execute the preset rotation angle setting more precisely upon required system setting change rate (Fig. 3.14.).

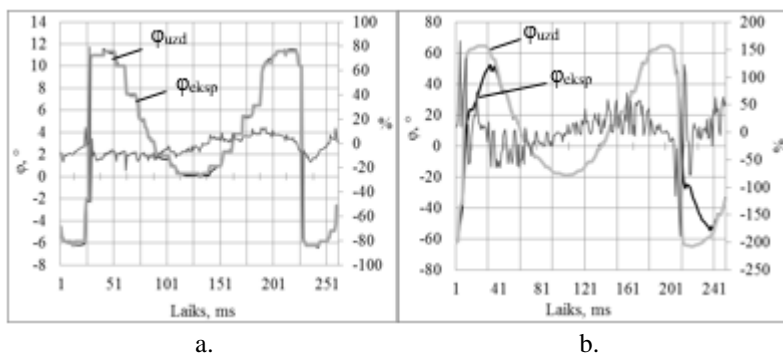


Fig. 3.14. **Experimental results of servosystem**

a – servo without gearbox; b – servo with gearbox.

External perturbances of the blade pitch control system are the blade mass inertia moment and torque that are formed as a result of the air flow effect on the blade rotation axis. The objective of the study is find out how big torque is formed on the blade rotation axis. The study used the experimental measurement stand shown on Fig. 3.13.

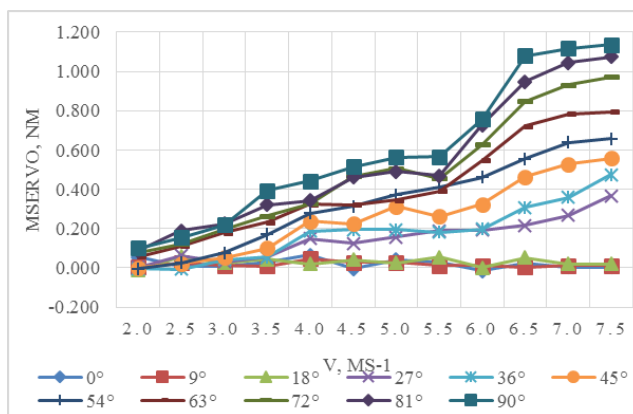


Fig. 3.15. **NACA0018 blade aerodynamic resistance force in dependence to blade relative blowing angle**

Experimental results demonstrate that at the blade blowing angles within the range  $-20^{\circ}$  to  $+20^{\circ}$  against its angle control rotation axis no additional



aerodynamic resistance forces appear. The aerodynamic resistance force starts acting upon the blade when the relative blowing angle exceeds 20°. Depending on value of the aerodynamic resistance force, it is necessary to provide for an additional power reserve of servomotor (Fig. 3.15.). Use of experimental results allows to determine for the required blade size the actual aerodynamic resistance torque on the controllable rotation axis.

## 4. ECONOMIC FEASIBILITY OF BLADE PITCH CONTROL SYSTEM

Already for many years VAWPP is an integral component of wind energy production. The task of increasing VAWPP efficiency factor is very important. Until now, no manufacturer has yet made VAWPP with the blade pitch control system; therefore, it is difficult to determine its precise costs, incomes and profit. Taking into consideration the simulation data and results therein obtained, it is possible to predict whether equipping of VAWPP with blade pitch control would be beneficial economically and whether it would be repaid during service period of this system.

### 4.1. Analysis of Servomotor Power Choice

Blade control system servomotor power is of importance for reaching the required control precision and calculating the possible costs of the servomotor and servo regulator. Servomotor power for blade pitch control is estimated and the choice is carried out in accordance with the following criteria: blade inertia moment, VAWPP blade length, VAWPP blade material, VAWPP rotor diameter, VAWPP operation highspeed ratio, blade centrifugal force, airflow perturbances (Table 4.1.).

**Table 4.1. Analysis of blade pitch control servomechanism power**

		Indicators	VAWPP rotor radius, m			
			1	2	3	4
		Chord length, m	0.20	0.40	0.60	0.80
		Blade length, m	2	4	6	8
		Blade mass, kg	1.52	12.13	40.93	97.02
		Blade inertia moment, kg·m <sup>2</sup>	0.002	0.060	0.456	1.912
m·s <sup>-1</sup>	12	Servosystem power, kW	0.067	0.252	0.568	1.004
		Consumed energy per 24h, kWh	4.824	18.144	40.896	72.288
	6	Servosystem power, kW	0.008	0.032	0.071	0.126
		Consumed energy per 24h, kWh	0.576	2.304	5.112	9.072
	5	Servosystem power, kW	0.005	0.005	0.005	0.005
		Consumed energy per 24h, kWh	0.360	0.360	0.360	0.360
	4	Servosystem power, kW	0.002	0.009	0.021	0.037
		Consumed energy per 24h, kWh	0.144	0.648	1.512	2.664

Electric energy consumed by the blade pitch control servomechanism will vary with the total number of working hours, and also the potential difference between energy produced by VAWPP and consumed by the blade control system will vary in dependence to the wind speed.

## 4.2. Analysis of Payback Period

Six VAWPPs are chosen for the calculations, which are available on the market and which could use the blade pitch control system. Such VAWPP has 3 blades and its profile is approximate to that of NACA0012 or NACA0018.

In Latvian territories where average wind speed is  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , VAWPP produced electric energy amount grows in dependence to VAWPP nominal power. Continuous operation at higher wind speeds makes VAWPPs much more efficient and increases people's wish to acquire them. When VAWPP works in the mode of a lower highspeed ratio, the efficiency factor improvement noticeably reduces the equipment payback period (Fig. 4.1.).

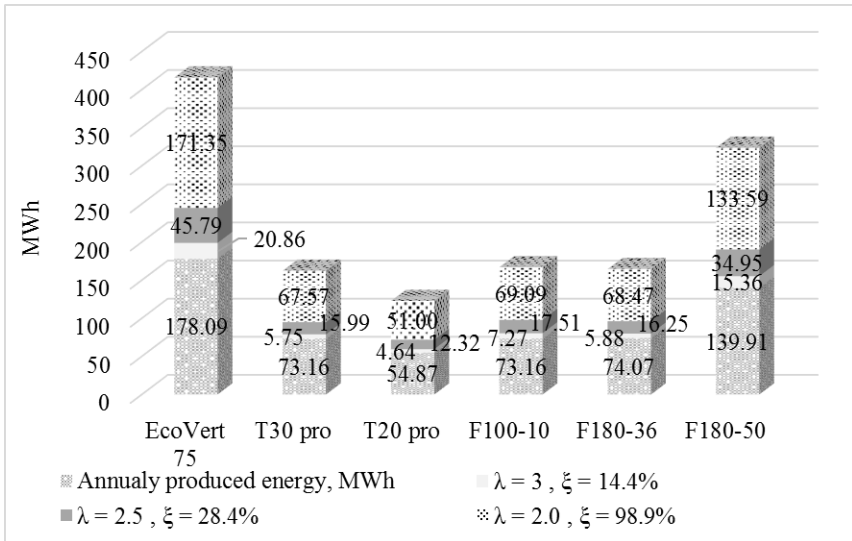


Fig. 4.1. Electric energy yield with use of blade pitch control system at wind speed  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Payback period of the blade pitch control system varies in dependence to the following factors: average wind speed at the site of installation, WPP nominal power, WPP rotor operation highspeed rate. Depending on these abovementioned factors, the system payback period may vary within 3 and 12 years.

## CONCLUSIONS

1. The proposed hypothesis is confirmed, that the energy efficiency of the vertical axis wind power plant can be increased by the use of the blade pitch control system, which by means of the adaptive control program can perform an active blade pitch control at a nonstationary wind speed and aerodynamic load caused by it as well as at a nonstationary VAWPP rotor rotation speed.
2. The performed experimental and simulation studies evidence that VAWPP energy efficiency can be improved by a continuous control of rotor blade pitch in accordance with the wind speed, rotor rotation angle and rotation speed with the use of the adaptive servosystem.
3. The studies demonstrate that the use of VAWPP simulation model allows to improve VAWPP technologies testing in the design and development mode, thus reducing the development time in experimental mode of the equipment. Use of the simulation models allows to find the required parameters of the control system regulators in the blade pitch control system, ensuring the system basic settings.
4. Aerodynamic force vector calculation method has an advantage of providing the possibility to cyclically recalculate in the control system the blade pitch setting in dependence to the variable wind speed, rotor rotation angle, rotation speed and blade geometrical parameters.
5. Studies carried out by means of the simulation model on VAWPP rotor inertia impact on the amount of generated electric energy evidence that the reduction in the rotor inertial mass can improve the total amount of energy generated by VAWPP.
6. The simulation model demonstrates that VAWPP with nominal electric power 20 kW at rotor inertia reduced from 5000 kg·m<sup>2</sup> to 2000 kg·m<sup>2</sup> and 24h operation at average wind speed 5 m·s<sup>-1</sup> can additionally generate 4.2 kWh electric energy.
7. Using the developed simulation model for calculation of the blade aerodynamic torque, the study performed in MATLAB *Simulink* environment on VAWPP blowing angle impact on the generated electric energy demonstrates that, regardless of VAWPP rotation speed and highspeed ratio, with the use of the blade profile NACA0018 the most efficient relative blowing angle  $\beta = 16^\circ$ .
8. In order to improve the execution of the blade pitch servomotor setting with the use of the developed simulation model, the correction number function was obtained as an estimate of the feedforward rotor rotation angle. The results of simulation show that when VAWPP works at wind speed 6 m·s<sup>-1</sup>, without the signal feedforward the determination coefficient of the blade pitch setting execution is  $R^2 = 0.9687$ . Upon use of the feedforward rotor position estimate, execution of the setting has improved:  $R^2 = 0.9993$ .

9. Experimental studies prove that for a symmetric blade profile, where the rotation axis is position at 25% of the chord length from the blade front end, the aerodynamic load force on the blade rotation axis, regardless of the wind speed, does not exist if the relative blowing angle is within the limits  $-20^\circ$  to  $20^\circ$ . It means that the servomechanism is not exposed to the additional aerodynamic load torque.
10. The results of simulation demonstrate that in VAWPP with rotor diameter 10 m and highspeed ratio 3 at nominal wind speed  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a new blade pitch setting is set every 2.5 ms. In order the model of the blade pitch control system would adequately simulate such fast transition process, its servomotor model should include both electrical and mechanical time constant.
11. In order to improve the operation speed of blade pitch control, it is necessary to choose a gearless servomechanism. Stand studies show a high determination coefficient ( $R^2 = 0.85 \dots 0.99$ ) of gearless servomechanism setting execution while, in contrast, servomechanism with a gearbox has considerably lower determination coefficient of the setting execution in connection with a reduced operation speed ( $R^2 = 0.026 \dots 0.228$  working with a load,  $R^2 = 0.6286 \dots 0.943$  working without load).
12. VAWPP blade inertia moment closely depends on the blade chord and blade design. Dependence of the blade inertia moment on the blade length is linear. Dependence of the blade inertia moment on the blade mass can be determined by the experimentally established empiric function  $J_{sp} = 0.0017 \cdot m_{sp}^{1.98}$ .
13. Dependence of the servomotor power required for blade pitch control on the blade inertia moment is determined by the empiric equation  $P_{ss} = 0.7343 \cdot J_{sp}^{0.3813}$  with the determination coefficient  $R^2 = 0.9975$ .
14. The development of VAWPP blade pitch servosystem would require average 5,260.00 EUR for a plant of power below 20 kW and 9,820.00 EUR for a plant of power above 20 kW. Analyzing the possible additional electric energy generated by VAWPP and the invested costs of installation, it should be taken into consideration also the additional expenses for regular service works of average amount 124 EUR per year. On such conditions, less than 5-year payback period of VAWPP blade pitch control system is possible at moderate winds exceeding  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , or VAWPP will need a lowspeed rotor with the highspeed ratio  $\lambda \leq 2.0$ .

## INFORMĀCIJAS AVOTI / REFERENCES

1. Latvijas Republikas tiesību akti (2016) *Enerģētikas attīstības pamatnostādnes 2016.-2020. gadam* [tiešsaiste] [skatīts 26.07.2016.]. Pieejams: <http://likumi.lv/doc.php?id=280236>
2. Latvijas Vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas 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](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)
3. Qasim A.Y., Usubamatov R., Zain Z.M., Quad G.A. (2012) The Parameters Effect on Power Coefficient Vertical Axis Wind Turbine. *IJUM Engineering Journal*, Vol. 13, No. 1, p. 59-66.
4. Gardiner G. (2011) *HAWTs vs. VAWTs* [online] [cited 26.07.2016]. Available: <http://www.compositesworld.com/articles/hawts-vs-vawts>
5. Komass T. (2013a) Load Effect on the Dynamic Parameters of the Wind Station. **In:** *19<sup>th</sup> International scientific conference „Research for rural development 2013”*: Proceedings, 2013. Latvia, Jelgava.
6. Komass T. (2013b) Vertical Axes Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator Simulation in MATLAB – SIMULINK. **In:** *13th International scientific conference „Engineering for rural development”*: Proceedings, 2013. Latvia, Jelgava.
7. Komass T., Sniders A. (2013c) Design and Verification of the Vertical Axis Wind Turbine Simulation Model. **In:** *14th International scientific conference „Engineering for rural development”*: Proceeding, 2014. Latvia, Jelgava.
8. Komass T. (2015a) 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.
9. Komass T. (2015b) 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.
10. Komass T. (2015c) 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.
11. 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.
12. Komass T., Zhivets A., (2014) *Controlling Vertical Axis Rotor-Type Wind Turbine*. World Intellectual Property Organisation Nr.WO2014/162312 A1, 09.10.2014.