

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Enerģētikas institūts

**Jānis Beriņš**

Doktora studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

# **OKEĀNA UN JŪRAS VIĻŅU ENERĢĒTIKAS IESPĒJAS UN ATTĪSTĪBA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

**ANTANS SAUĻUS SAUHATS**

RTU Izdevniecība

Rīga 2019

Beriņš, J. Okeāna un jūras viļņu enerģētikas iespējas un attīstība. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 52 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “RTU P-05” 2019. gada 14. maija lēmumu Nr. 61/19

**ISBN 978-9934-22-289-4 (print)**  
**978-9934-22-290-0 (pdf)**

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 2. jūlijā plkst. 10-00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12 k-1, 306. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. sc. ing.* Inga Zicmane,  
Rīgas Tehniskā universitāte

Režīmu un plānošanas dienesta projektu vadītājs *Dr. sc. ing.* Aleksandrs L̆vovs,  
AS “Augstsprieguma tīkls”, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Argo Rosin,  
Tallinas Tehniskā universitāte, Igaunija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Jānis Beriņš ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi un priekšlikumi, izmantotie informācijas avoti, viens pielikums, 83 attēli, 28 tabulas, kopā 184 lappuses. Informācijas avotos ir 256 nosaukumi.

# SATURS

|        |                                                                                 |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | IEVADS .....                                                                    | 6  |
| 1.1.   | Darba aktualitāte, problēmas nostādne.....                                      | 6  |
| 1.2.   | Darba mērķis un uzdevumi .....                                                  | 7  |
| 1.3.   | Pētījuma līdzekļi un metodes .....                                              | 8  |
| 1.4.   | Darba rezultāti .....                                                           | 8  |
| 1.5.   | Darba zinātniskā novitāte .....                                                 | 9  |
| 1.6.   | Darba praktiskais lietojums .....                                               | 9  |
| 1.7.   | Darba aprobācija .....                                                          | 9  |
| 1.8.   | Konferences.....                                                                | 9  |
| 1.9.   | Publikācijas .....                                                              | 9  |
| 1.10.  | Patenti.....                                                                    | 10 |
| 2.     | VIĻŅU ENERĢIJAS POTENCIĀLA RAKSTUROJOŠIE PARAMETRI .....                        | 11 |
| 2.1.   | Viļņu enerģijas potenciāla pētījumi pasaulē, Baltijā un Latvijā.....            | 11 |
| 2.2.   | Viļņu enerģijas potenciāla aprēķinu metodika pasaulē, Baltijā un Latvijā .....  | 12 |
| 2.3.   | Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu enerģijas potenciāla novērtēšanas metode .... | 13 |
| 2.4.   | Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu potenciāla aprēķins .....                     | 17 |
| 2.4.1. | Viļņu galvenie parametri un viļņu potenciāla aprēķinu rezultāti.....            | 17 |
| 2.4.2. | Aprēķinā lietoto sākuma datu apraksts .....                                     | 18 |
| 2.4.3. | Viļņu enerģijas potenciāla aprēķina rezultāti.....                              | 19 |
| 3.     | ENERĢIJAS PĀRVEIDOŠANAS IEKĀRTAS IZVĒLE .....                                   | 26 |
| 3.1.   | Iekārtu apskats.....                                                            | 26 |
| 3.2.   | Iekārtu klasifikācija .....                                                     | 27 |
| 3.3.   | Pārveidotāja modelis .....                                                      | 28 |
| 3.3.1. | Apskatītās tehnikas analīze .....                                               | 28 |
| 3.3.2. | Izvēlētās tehnikas pamatojums .....                                             | 29 |
| 4.     | LABORATORIJA UN VIĻŅU PĀRVEIDOŠANAS MODEĻU IZMĒĢINĀJUMI ..                      | 31 |
| 4.1.   | Laboratorijas apraksts .....                                                    | 31 |
| 4.1.1. | Viļņu ģenerators.....                                                           | 31 |
| 4.1.2. | Viļņu parametru mērīšanas un datu arhivēšanas aprīkojums.....                   | 32 |
| 4.1.3. | Datorprogrammas .....                                                           | 33 |
| 4.1.4. | Viļņu slāpētājs.....                                                            | 35 |
| 4.2.   | Pilotprojekta īstenošana.....                                                   | 36 |
| 4.2.1. | Pilotprojekta modeļa risinājums .....                                           | 36 |
| 4.2.2. | Pilotprojekta īstenošanas metodes izvēle.....                                   | 36 |
| 4.2.3. | Izmēģinājumi .....                                                              | 37 |
| 4.2.4. | Modelēšanas rezultāti.....                                                      | 37 |
| 5.     | VIĻŅU SPĒKSTACIJU OPTIMIZĀCIJA .....                                            | 40 |
| 5.1.   | JVS optimizācijas uzdevuma nostādne .....                                       | 40 |
| 5.2.   | JVS tehniski ekonomiskais novērtējums Baltijas jūras Latvijas EEZ.....          | 41 |
| 5.3.   | Rezultāti .....                                                                 | 45 |

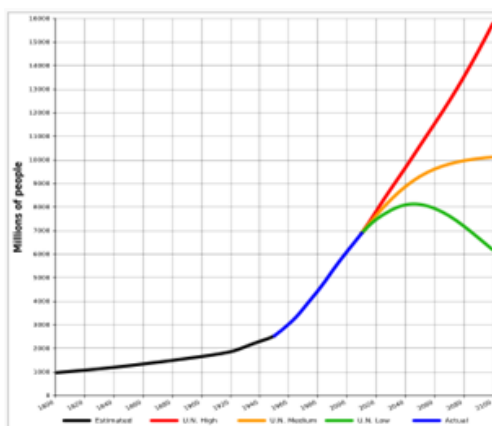
|    |                                     |    |
|----|-------------------------------------|----|
| 6. | DARBS NĀKOTNĒ .....                 | 46 |
| 7. | SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI.....     | 47 |
|    | IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI ..... | 50 |

# 1. IEVADS

## 1.1. Darba aktualitāte, problēmas nostādne

Pētot gāzu burbulišu sastāvu polārajos ledājos, zinātnieki ir konstatējuši, ka CO<sub>2</sub> sastāvs tajos, mainoties ledus dziļumam, periodiski palielinās un samazinās. Analizējot ledus paraugus, ir noskaidrots, ka pasaules vidējai temperatūrai ir tendence sekot ogļskābās gāzes saturam atmosfērā. Lietojot ledāju analīzes metodi, var secināt, ka pēdējo 800 000 gadu laikā CO<sub>2</sub> saturs nekad nav bijis lielāks par 280 daļām uz miljoniem molekulām. Tomēr pēdējā laikā šis rādītājs ir sasniedzis 390 daļas, un tas turpina strauji augt, veidojot klimata izmaiņas. Kopš 20. gadsimta piecdesmitajiem gadiem pasaules temperatūra ir pieaugusi tikai par 0,44 °C (0,8 °F), un novērojumi liecina par būtisku dabas katastrofu līmeņa pieaugumu [1] un ūdens dažādu agregātstāvokļu līdzsvara izmaiņām. To uzskata par globālo sasilšanu jeb klimata pārmaiņām.

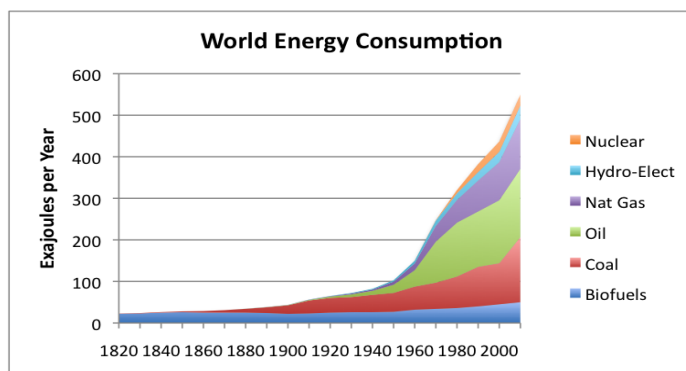
Enerģijas patēriņš pasaulē ir atkarīgs no iedzīvotāju daudzuma un sabiedrības tehniskā attīstības līmeņa. Pastāv trīs ANO prognozes par iedzīvotāju skaita izmaiņām (1.1. att.) [2]. Pasaules iedzīvotāju skaits 200 gadu ilgā laika posmā – no 1800. līdz 2000. gadam – ir pieaudzis aptuveni sešas reizes (1.1. att.) [2].



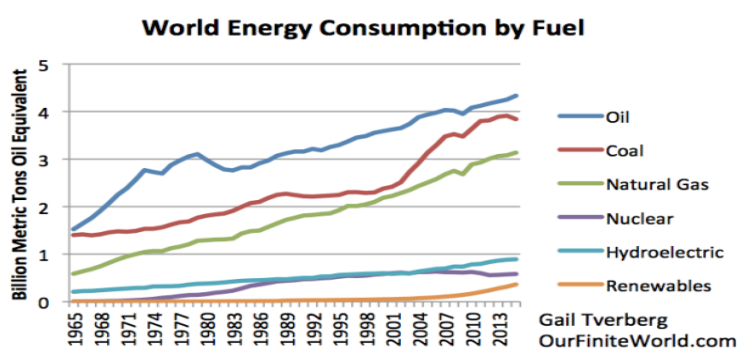
1.1. att. Iedzīvotāju skaita izmaiņu ANO prognozes (miljoni cilvēku) [2].

Kopējais enerģijas patēriņš pasaulē 200 gadu laika posmā – no 1820. līdz 2020. gadam – ir pieaudzis aptuveni 22 reizes, un, salīdzinot ar 1820. gadu, ir nākusi klāt jaunu enerģijas veidu izmantošana (1.2. att.) [3].

Tādējādi, ja ap 1800. gadu vidējais aptuvenais enerģijas patēriņš uz iedzīvotāju ir bijis  $2,5 \times 10^{11}$  J, tad ap 2000. gadu tas jau kļuva  $5,5 \times 10^{12}$  J. Enerģijas patēriņš uz vienu iedzīvotāju varētu palielināties vēl vairāk. Pēc ANO iedzīvotāju skaita prognozēm pasaule nokļūs jaunu enerģijas veidu apgūšanas izaicinājumu priekšā. Diagrammā (1.3. att.) [3] redzams, ka ievērojama daļa no šobrīd izmantojamiem enerģijas veidiem (dabas gāze, nafta, akmeņogles, kodolenerģija) ir dominējoši kopējā patērētās enerģijas avotu klāstā. Tas nozīmē, ka šie avoti būs jāaizstāj ar citiem, lai nodrošinātu pieaugošo sabiedrības pieprasījumu pēc nepieciešamā enerģijas daudzuma. Satraucoša pazīme ir tā, ka faktiski fosilo enerģijas veidu patēriņš turpina pieaugt straujāk nekā atjaunojamo un nukleārās enerģijas veidu izmantošana (1.3. att.) [3].



1.2. att. Strukturēts enerģijas patēriņš pasaulē (EJ gadā) [3].



1.3. att. Pasaules enerģijas patēriņš (naftas ekvivalenta miljardi tonnas) [3].

Nākotnē palielināsies atjaunojamo enerģijas avotu nozīme. Viļņu potenciāls ir viens no šādiem enerģijas veidiem. Ir jāizstrādā jaunas efektīvas pārveidošanas iekārtas, lai viļņi kļūtu par nozīmīgu enerģētikas nozari.

## 1.2. Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis – novērtēt viļņu enerģijas apgūšanas iespējas sabiedrībai nozīmīgā līmenī, balstoties uz nozares attīstības vēsturi un tās perspektīvām. Dot savu ieguldījumu nozīmīgāko uzdevumu risināšanā.

### Darba uzdevumi

1. Novērtēt viļņu enerģijas potenciālu pasaulē un Latvijas EEZ.
2. Definēt viļņu enerģijas pārveidošanas ietekmējošos faktorus.
3. Apzināt, kas notiek Pasaulē viļņu spēkstaciju iekārtu izstrādņu jomā.
4. Saklasificēt apskatītās iekārtas.
5. Izvēlēties kādu no iekārtu veidiem un pamatot šo izvēli.
6. Izstrādāt jaunu iekārtas modeli un izmēģināt to laboratorijas vidē.
7. Definēt izstrādātā modeļa attīstīšanas perspektīvas.
8. Dot tehniski ekonomisko novērtējumu viļņu enerģijas izmantošanai priekšizpētes stadijā uz apskatītā Baltijas jūras Latvijas EEZ potenciāla pamata.

### 1.3. Pētījuma līdzekļi un metodes

Darba pamatošanai, nepieciešamo analīžu, klasifikāciju, aprēķinu veikšanai nepieciešamo vienādojumu iegūšanai izmantoti literatūras avoti. Darbā tika izmantoti SWAN modelēšanas programmu aprēķināto viļņu stundas spektru parametru datubāze. Ar viļņu potenciāla novērtēšanu, ar viļņu stenda eksperimenta rezultātu apstrādi un ar JVS (jūras/okeānu viļņu spēkstacija) tehniski ekonomisko novērtējumu saistīto aprēķinu veikšanai un rezultātu grafisko attēlu iegūšanai tika izmantoti MS *Excel* līdzekļi: rezultātu šķirošana, viendimensiju un divdimensiju histogrammas, loga interpolācija, Furjē ātrā ciparu transformācija. Vizualizācijas rīki tika izmantoti viļņu potenciāla ilgtermiņa darbības virziena attēlošanā ar šim nolūkam izstrādātu viļņu enerģijas virzienu pamatlīniju projekcijas (VEVPP) metodi.

Jaunradāmās iekārtas veids tika izvēlēts, veicot esošu izgudrojumu apskatu, sīkrojot (klasificējot) iekārtas pēc noteiktām pazīmēm un izmēģinājumu rezultātu analīzi, un tās modeļa izmēri tika izvēlēti atbilstoši laboratorijas iespējām. Iekārtas modeļa izmēģināšanai tika lietota eksperimentālā metode. Līdzīga pieeja aprakstīta rakstā “*Coupling Methodology for Studying the Far Field Effects of Wave Energy Converter Arrays over a Varying Bathymetry*” [4], [5], kur gan tiek izmēģinātas citas iekārtas, bet eksperimenta princips saglabājas. Tika izveidota eksperimentālā bāze: viļņu baseins, viļņu uztvērēja stands ar mēraparatūru viļņu parametru fiksēšanai un apstrādei (dators, lāzermērītāji). Absorbētās viļņu enerģijas noteikšanai tika izmantots “melnās kastes” princips. Modelis tika izmēģināts īpašā turbīnas stendā viļņu laboratorijā. Laboratorijas viļņu parametru ( $H$  un  $T$ ) mērījumi tika iegūti un dati fiksēti, veicot automātisku *WEB* kameru attēla ciparu priekšapstrādi, izmantojot īpaši šim procesam radītus rīkus uz *Java* programmas bāzes.

Viļņu turbīnas modeļa efektivitāte tika novērtēta, apstrādājot un analizējot vizuālo informāciju un stenda mērījumu datus.

### 1.4. Darba rezultāti

Promocijas darba rezultāti izpaužas izvirzīto uzdevumu izpildē.

1. Veikta pasaules viļņu enerģijas potenciāla aplēse un Latvijas EEZ viļņu potenciāla aprēķini un novērtējums.
2. Definēti viļņu enerģijas pārveidošanas ietekmējošie faktori.
3. Apskatītas 137 dažādas viļņu spēkstaciju iekārtu tehnoloģiju izstrādnes.
4. Saklasificētas apskatītās iekārtas.
5. Izvēlēts viens iekārtas veids, un dots izvēles pamatojums,
6. Izveidota viļņu laboratorija, un apzināti tās parametri, kas ir jāuzlabo.
7. Izstrādāts jauns iekārtas modelis, izmēģināts laboratorijas vidē un iegūti rezultāti.
8. Definēti izstrādātā modeļa uzlabojamie parametri.
9. Veikts tehniski ekonomiskais novērtējums JVS Baltijas jūras Latvijas EEZ.

## **1.5. Darba zinātniskā novitāte**

1. Pamatota jauna zinātniskās pētnieciskās viļņu laboratorijas struktūra, kas ļauj veikt viļņu pārveidošanas modeļu eksperimentus.
2. Pārbaudītas viļņu laboratorijas iespējas, un pierādītas tās priekšrocības un trūkumi, kā arī apzināts, kā šos trūkumus novērst/mazināt.
3. Radīti divi strādājoši viļņu hidrokinētiskās turbīnas pašregulējošo lāpstiņu mehānismi.
4. Definēts pašregulējošo lāpstiņu pilnveidošanas uzdevums.
5. Izstrādāta jauna viļņu potenciāla aprēķināšanas metode – viļņu enerģijas virzienu pamatlīniju projekcijas (VEVPP) metode.

## **1.6. Darba praktiskais lietojums**

Darba praktiskā nozīme ir:

- 1) precīzākai viļņa potenciāla novērtēšanai lietot jaunradīto VEVPP metodi;
- 2) izmantojot sasniegto viļņu pārveidošanas iekārtas modeļa attīstīšanas jomā, turpināt to attīstīt līdz *TRL 9* līmenim;
- 3) izmantojot sasniegto viļņu laboratorijas jomā, izveidot jaunu laboratoriju ar precīzākiem izmēģinājumu veikšanas rādītājiem.

## **1.7. Darba aprobācija**

Galvenie darba rezultāti ir publicēti un divi no tiem – apspriesti starptautiskās konferencēs. Viļņu pārveidošanas iekārtas modeļa izstrādi un izmēģinājumus, kā arī VEVPP metodes izstrādi finansējis privātuzņēmums.

## **1.8. Konferences**

1. J. Beriņš, J. Beriņš. Wave Energy Factors and Development Perspective in Latvia, 56<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvija, Rīga 2015.gada 14. oktobris. (IEEE, Xplore, SCOPUS).
2. J. Beriņš. Technical Analysis of the Economic Viability of Sea Wave Power Stations, 57<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvija, Rīga, 2016. gada 14. oktobris. (IEEE, Xplore, SCOPUS).

## **1.9. Publikācijas**

Promocijas darba kontekstā publicēti seši raksti par pētāmo tēmu.

1. J. Beriņš, A. Grickus, A. Kalnačs. Wave Energy Conversion-Overview and Perspectives. Pieejams [www.aplacetoinvest.com](http://www.aplacetoinvest.com).
2. J. Beriņš, J. Beriņš. Wave Energy Factors and Development Perspective. In Latvia 56<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvija, 2015. gada 14. oktobris, (IEEE, Xplore, SCOPUS).

3. J. Beriņš. Technical Analysis of the Economic Viability of Sea Wave Power Stations, 57<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, Latvija, Rīga, 2016. gada 14. oktobris. (IEEE, Xplore, SCOPUS).
4. J. Beriņš, J. Beriņš, A. Kalnačs. Viļņu enerģijas potenciāla noteikšana Latvijas EEZ, Latvijas Fizikas un Tehnikas Žurnāls, 2016. gada Nr. 3.
5. J. Beriņš, J. Beriņš. New Hydrokinetic Turbine For Free Surface Gravitational Wave Transformation, Latvijas Fizikas un Tehnikas Žurnāls, 2017, Nr. 4.
6. J. Beriņš, J. Beriņš. Measurements Of Wave Power In Wave Energy Converters Effectiveness Evalution, Latvijas Fizikas un Tehnikas Žurnāls, 2017, Nr. 4.

### **1.10. Patenti**

Par promocijas darba tēmu ir saņemts viens patents. Patents Nr. LV 14059, Viļņu enerģijas pārveidošanas iekārta.

## 2. VIĻŅU ENERĢIJAS POTENCIĀLA RAKSTUROJOŠIE PARAMETRI

### 2.1. Viļņu enerģijas potenciāla pētījumi pasaulē, Baltijā un Latvijā

Saskaņā ar dažiem avotiem [6], [7] viļņu enerģijas potenciāls pasaules jūru (šelfā) krasta tuvumā, ir 29 500 TWh gadā (2.1. tabula) [7].

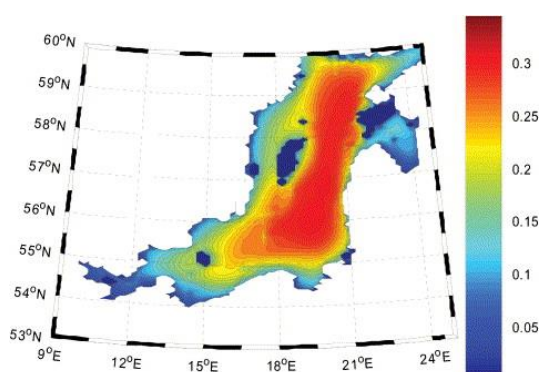
2.1. tabula

Viļņu enerģijas sadalījums pasaulē pa reģioniem [7]

| Pasaules daļa                                 | Viļņu enerģija TWh gadā |
|-----------------------------------------------|-------------------------|
| Rietumeiropa un Ziemeļeiropa                  | 2800                    |
| Vidusjūras zemes un Atlantijas arhipelāgi     | 1300                    |
| Ziemeļamerika un Grenlande                    | 4000                    |
| Centrālamerika                                | 1500                    |
| Dienvidamerika                                | 4600                    |
| Āfrika                                        | 3500                    |
| Āzija                                         | 6200                    |
| Austrālija, Jaunzēlande un Klusā okeāna salas | 5600                    |
| <b>Kopā</b>                                   | <b>29 500</b>           |

H. C. Sørensen un J. Fernández Chozas [8] apraksta pētījumu par Ziemeļjūras viļņu potenciālu un tā izmantošanas perspektīvām. Tajā ir dots salīdzinājums starp Ziemeļjūras un Atlantijas okeāna īpatnējām viļņu jaudām, kas atbilstoši ir 12–17 kW/m un 24–48 kW/m.

U. Henfridsson u. c. publikācijā [9] rezumē daudzsološas zonas Ziemeļjūrā un interesantas vairākas Baltijas jūras daļas [9]. Publikācijā parādīta uzskatāma viļņu enerģijas diagramma Baltijas jūrā (2.1. att.) [9].



2.1. att. Viļņu enerģijas blīvuma karte Baltijas jūrā ( $\text{Wh/m}^2$ ) [9].

Tarmo Soomere un Maris Eelsalu [10] aprakstījuši pētījumu gan par teorētiskās viļņu enerģijas daudzumu, gan tās praktiski pieejamo daļu vidēja dziļuma akvatorijā, ņemot par pamatu Baltijas jūras austrumu krastu. 38 gadu vidējā viļņa jauda ir 1,5 kW/m, bet dažās vietās tā sasniedz 2,55 kW/m, Somu jūras līcī un Rīgas jūras līcī – 0,7 kW/m. Būtiskākais

faktors un zinātnieku secinājums: šajā akvatorijā viļņu enerģijas sadalījums ir nevienmērīgs gada laikā. Darbā dota Baltijas piekrastes vidēja dziļuma viļņu enerģijas vizualizācija (2.2. att.) [10].



2.2. att. Baltijas piekrastes vidēja dziļuma viļņu vidējās jaudas vizualizācija pēc Tarmo Soomere un Maris Eelsalu [10].

Egidijus Kasiulis, Petras Punys un Jens Peter Kofoed [11] pamato uzskatu, ka, pakāpeniski palielinot interesi par viļņu enerģijas izmantošanu un attīstot viļņu enerģijas pārveidotājus, uzmanība varētu tikt pievērsta arī Baltijas jūrai. Viļņu enerģijas plūsma gada viļņu augstumam Lietuvas piekrastē svārstās no 1,6 kW/m augstās intensitātes gadā līdz 0,4 kW/m zemas intensitātes gadā, kas padara piekrastes viļņu enerģijas potenciālu visā Lietuvas piekrastē salīdzināmu ar apstākļiem citās Eiropas daļēji slēgtās jūrās.

J. Greivulis A. Avotiņš un L. Kalniņš [12] ir atspoguļojuši apskatītā reģiona divu viļņu parametru –  $H$  un  $T$ , kā arī vēja ātruma retro analīzi. Pierādījuši, ka ir jāņem vērā viļņu virziens, un uzskata, ka apskatītajā akvatorijā daļā viļņu potenciāls ir pietiekams, lai veidotu jūras enerģijas pārveidotājus.

## 2.2. Viļņu enerģijas potenciāla aprēķinu metodika pasaulē, Baltijā un Latvijā

G. Mork un citi aprēķina globālo viļņa potenciālu, balstoties uz datiem, kas iegūti no globālā viļņu modeļa (validēti un kalibrēti pret satelītu augstuma mērītāja datiem) un mērboju datiem (*WorldWaves* datubāze). Vispirms tika aprēķināts teorētiskais potenciāls, izmantojot visus pieejamos viļņu datus, un otrajā solī tika izslēgtas jomas, kurās jaudas līmenis ir ļoti zems ( $P \leq 5$  kW/m). Trešajā solī tika izvērtētas jūras ledus ietekmētās zonas [6].

T. Soomeres metode aprakstīta [10] kā pētījums, kurā ņemti ieejas dati par 1970.–2007. gadu periodu no punktiem ar attālumu 3 jūras jūdzes (5,5 km). Dati ir uzskaitīti ik pa stundai.

Akvatorija dziļumi, kur datu aprēķini pēc ģeostatisko vēju mērījumiem ar korekcijām ir 7–48 m. Šeit gan jāatzīmē, ka minētā dziļumu intervāla dēļ daļa no mērījumiem neatspoguļo dziļūdens viļņu ainu. Uzskatāmi tas ir redzams viļņu jaudu rezultātos pie Latvijas un Lietuvas Baltijas jūras krastiem (2.2. att.).

U. Henfridsson u. c. [9] analizē iespējamās viļņu spēkstaciju piemērus Baltijas jūrā un Ziemeļjūras Dānijas daļā, izmantojot vēja-viļņu retranslācijas datus, aprēķina viļņu enerģiju pēc klasiskām neregulāru viļņu sakarībām.

Egidijus Kasiulis, Petras Punys un Jens Peter Kofoed [11] viļņu enerģijas potenciālu Lietuvas piekrastē novērtē, izmantojot pieejamos daudzgadu vizuālos novērojumus. Tomēr rakstā nav sīkāk paskaidrots vizuālās mērīšanas algoritms, mērījumu punktu koordinātes un akvatorija dziļumi.

Viļņu potenciālu Latvijas Baltijas jūras daļā ir pētījuši jau iepriekš minētais igauņu akadēmiķis T. Soomere un latviešu zinātnieki J. Greivulis A. Avotiņš un L. Kalniņš [12], apgalvojot, ka savu viļņu augstumu un periodu rezultātu iegūšanai ir izmantojuši Ventspils mērījumu stacijas viļņu augstumu un periodu novērojumus, kas ir tikuši veikti divas reizes diennaktī. Tiesa, rakstā nav precizēts, kādas ir koordinātes mērījumu punktiem, kāds/kādi ir bijis dziļums/dziļumi un kādā veidā ir konstatēti šie parametri. Tajā nav apskatīti viļņu dominējošo virzienu dati.

### **2.3. Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu enerģijas potenciāla novērtēšanas metode**

Lai prognozētu viļņu potenciālu nākotnē, var lietot naivo metodi. Naivā metode balstās uz vēsturisko datu vidējām vērtībām, pieņemot, ka nākotne būs līdzīga pagātnei. Viļņu enerģijas potenciāla raksturošanai izmanto dažādas metodes.

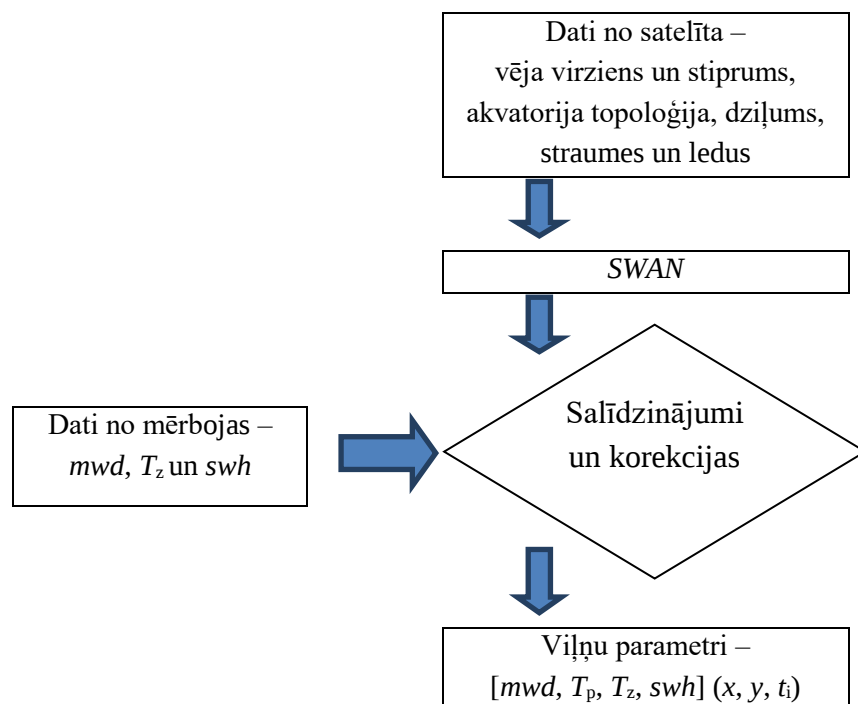
Vienkāršākā no metodēm ir aprēķināt viļņu īpatnējo jaudu un viļņu īpatnējo enerģiju atsevišķos apgabala punktos [13], [14].

Nākamā metode: jūrā tiek novilkta nosacīta viļņu uztvērēju līnija (taisnes nogrieznis vai vairāki nogriežņi ar lēzeniem laužuma leņķiem) [10], un tiek aprēķināta visa enerģijas plūsma caur vertikālu plakni, kas iet caur šo nosacīto uztvērēju līniju vienā virzienā. Katra viļņu virziena enerģijas plūsma un viļņu virziena enerģija laikā uz attāluma vienību samazināsies attiecīgi  $\cos\theta$  reizes, kur  $\theta$  – leņķis, kuru viļņa fronte veido ar nosacīto uztvērēju līniju.

Trešā metode, kur par nosacīto uztvērēju vertikālu virsmu telpā visā enerģijas izdalīšanās dziļumā kalpo visa apgabala robežas. Summāro enerģijas plūsmu gadā (TWh) nosaka vidējā viļņu jauda  $P_{vid}$  (kW/m) jeb viļņa enerģijas plūsma caur šo virsmu – *Electric Power Research Institute (EPRI)* metodoloģija, [15]. Šīm metodēm ir nepilnības [16].

Lai iespējami precīzāk novērtētu Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu potenciālu, izstrādājām jaunu metodi. Šī metode balstās uz ieejas viļņu parametriem ( $sw_h$ ,  $T_z$  un  $mwd$ ), kas iegūti Dānijas Meteoroloģiskā institūtā (DMI) un doti teksta failos ik pa stundai piecu gadu garumā (2010.–2014.). Šos datus DMI aprēķina ar SWAN programmas palīdzību, kas radīta, lai no satelīta datiem (vēja virziens, vēja stiprums un daži citi parametri) aprēķinātu minētos viļņu parametrus. SWAN programma paredz arī minēto rezultātu korekciju, ko ievieš ar tuvākās

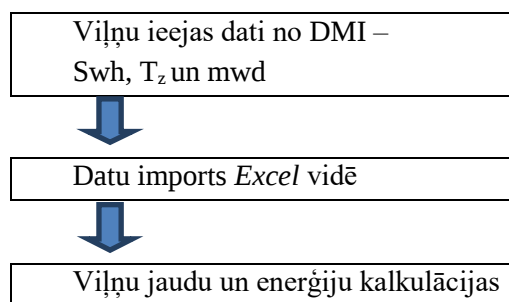
mērbojas viļņu datu mērījumu un virs tās esošo vēja un dažu parametru salīdzināšanu (2.3. att.).



2.3. att. DMI viļņu ieejas datu radīšanas shēma.

No viļņu parametru datiem tiek aprēķinātas jaudas un enerģijas.

Lai mazinātu iepriekš minēto metožu nepilnības viļņu enerģijas novērtējumā, piedāvājam viļņu enerģijas virzienu pamatlīniju projekcijas (VEVPP) metodi [16], kuras sākotnējie aprēķini atbilst klasiskajiem neregulāru viļņu aprēķiniem (2.4. att.).



2.4. att. Sākotnējā viļņu datu apstrāde un aprēķini.

1. No enerģijas spektra, integrējot frekvenču diapazonā  $[0; \infty]$ , aprēķināsim vidējo viļņu enerģijas blīvumu  $J_{\text{vid}}$  laika intervālā 1 m<sup>2</sup> lielā laukumā (2.1. izteiksme) [18]:

$$J_{\text{vid}} = \rho g \int_0^{\infty} S(f) df = \rho g m_0 = \frac{\rho g (H_{m0})^2}{16} = \frac{\rho g (H_s)^2}{16}, \quad (2.1.)$$

kur  $\rho$  – jūras ūdens blīvums (kg/m<sup>3</sup>);

$g$  – brīvās krišanas paātrinājums (m/s<sup>2</sup>);

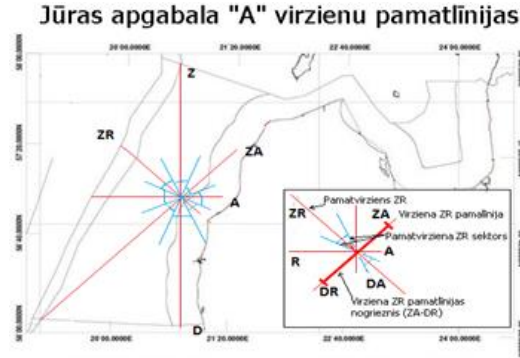
$f$  – viļņu frekvence (Hz);

$S(f)$  – viļņu enerģijas spektra funkcija;

$m_0 - 0$ . spektrālais moments;

$H_{m0} = H_s - \text{raksturīgo viļņu augstums (m)}$ .

2. Baltijas jūras apgabalā "A" perpendikulāri astoņiem tradicionālajiem vēja un viļņu pamatvirzieniem ( $PV_{xx}$ , kur  $xx = (Z; ZA; A; DA; D; DR; R \text{ un } ZR)$ ) nospraužam virzieniem perpendikulāras pamatlīnijas (2.5. att.) [16], [17].



2.5. att. Viļņu pamatvirzieni un jūras apgabala "A" pamatlīniju nogriežņi [17], [19].

Tādējādi, summējot viļņu virzienu enerģijas (2.1) laika intervālā  $\Delta t$  katrā no kontrolpunktiem pa sektoriem, tiek uzskaitīta savstarpēji nedublējošu virzienu viļņu enerģija (2.2. izteiksme).

$$\dot{E}_n(Km, PV_{xx}) = \Delta t \cdot \frac{\rho g^2}{64\pi} \sum_{i=1}^n IF(mwd_i, PV_{xxmin}, PV_{xxmax})(T_{ei}(H_{si})^2), \quad (2.2.)$$

kur  $PV_{xx}$  – kāds no pamatvirzieniem  $xx (Z, ZA, A, DA, D, DR, R, ZR)$ ;

$PV_{xxmin}$  – pamatvirziena  $PV_{xx}$  sektora minimālā robeža;

$PV_{xxmax}$  – pamatvirziena  $PV_{xx}$  sektora maksimālā robeža;

$H_{si}$  – zīmīgais viļņu augstums  $i$ -tajā laika intervālā  $\Delta t$  (m);

$T_{ei}$  – viļņu enerģijas blīvuma spektra vidējais enerģijas periods (s).

Kontrolpunkta  $P_m$  gada viļņu enerģijas potenciālu 1 m platum vilnim  $\dot{E}_g$  aprēķina pēc 2.3. izteiksmes:

$$\dot{E}_{g, m, xx, yy} = \sum_{n=1}^{12} (E_n, m, xx, yy), \quad (2.3.)$$

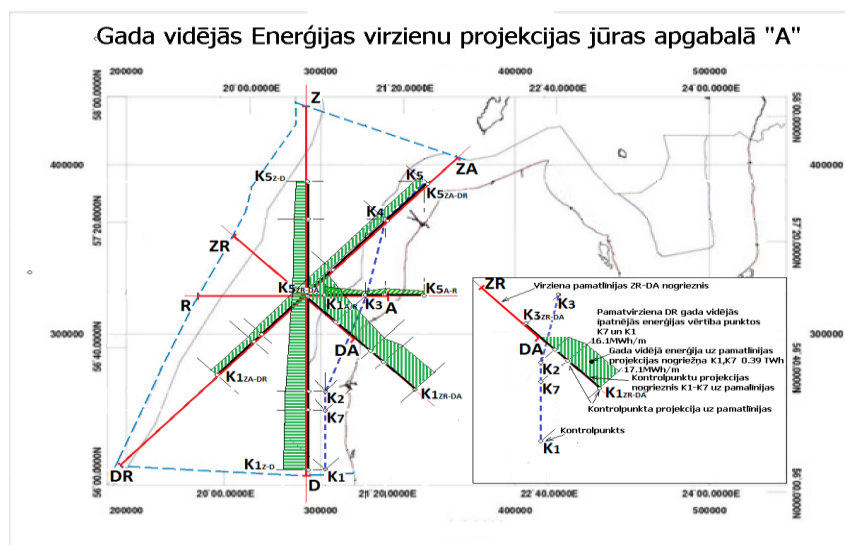
3. Virziena pamatlīnijas kontrolpunktu projekcijai atbilstošo enerģiju aprēķina, integrējot pēc attāluma projekcijas robežās tās īpatnējās enerģijas funkciju. Tādējādi integrēšanas process reducējas uz trapeču metodes [20] izmantošanu (2.4. izteiksme):

$$\begin{aligned} E_{xyy} (K1, K5) &= \sum_{m=1}^{m+1=5} E(\Delta L(m, m+1)_{xx}) = \\ &= \sum_{m=1}^{m+1=5} \frac{\dot{E}_n(Km) + \dot{E}_n(Km+1)}{2} \cdot \Delta L(m, m+1)_{xx}, \end{aligned} \quad (2.4.)$$

kur  $m$  – kontrolpunkta  $P_{m,xx}$  kārtas skaitlis – (1, 2, 3, 4, 5, 7),

$\Delta L(m, m+1)$  – attālumus starp šīm punktu projekcijām uz virziena pamatlīnijas, ņemot vērā pamatlīniju azimutu un kontrolpunktu koordinātes (2.3. tabula).

4. Zinot viļņu enerģijas potenciālu kontroles apgabalā, kurā atrodas kontrolpunkti P1; P2; P3; P4; P5 un P7, kuru iezīmē kontrolpunktu projekcijas uz virziena pamatlīnijām (2.6. att.), un to, ka kontroles apgabals veido ievērojamu, bet ne visu analizējamā apgabala "A" daļu, kā arī pieņemot, ka viļņu enerģijas sadalījums laikā un telpā ir izkliedēts viendabīgi, iespējams novērtēt katra pamatvirziena  $PV_{xx}$  enerģijas apjomu, palielinot proporcionāli virziena pamatlīnijas nogriežņa  $PN_{yy}$  un kontrolpunktu attiecīgo projekcijas nogriežņu summas  $L(P1,P5)_{yy}$  attiecībai.
5. Kopējais viļņu enerģijas potenciāls mēnesī/gadā ir astoņu potenciālu summa.



2.6. att. Viļņu gada vidējās enerģijas virzienu projekcijas Baltijas jūras apgabalā "A" [16], [17].

VEVPP metode ietver aprēķinus, kas saistīti ar rezultāta atkarību no vairāku kontrolpunktu izvietojuma plaknē, tāpēc tās ticamības pārbaudei lietojām vienkāršāku apgabala viļņu enerģijas novērtēšanas metodi, kas izvēlēta kontrolpunkta (P7, gada īpatnējās enerģijas vidējais apjoms tuvs vidējam analizējamā kontrolpunktu grupā) īpatnējo enerģiju īpašā veidā un attiecināta uz visu apgabalu. Tās daudzās laika intervālu  $\Delta t$  komponentes  $\dot{E}_n(\Delta t_n, \theta_n)$  tiek šķīrotas un sasummētas pēc  $mwd$  pa astoņiem pamatvirzieniem  $PV_{xx}$  ( $xx = Z, ZA, A, DA, D, DR, R, ZR$ )  $45^\circ$  sektoriem, iegūstot astoņas vidējās īpatnējās enerģijas  $\dot{E}_{g7,xx}$  komponentes. Katru komponenti reizinām ar vienu no atbilstošajiem četrām pamatlīniju nogriežņu garumiem  $PN_{yy}$ , tādējādi iegūstot aptuvenu apgabala enerģijas astoņu virziena sadalījuma vērtējumu  $E_{g7}(PV_{xx}, PN_{yy})$  ( $yy = Z-D, ZA-DR, A-R, ZR-DA$ ), kura komponentes summējot, iegūstam Latvijas EEZ apgabala gada enerģijas salīdzinošo potenciāla vidējo novērtējumu.

Metode atšķiras no citām ar to, ka tiek izvēlēti bāzes pamatvirzieni  $\pm 22,5^\circ$  un pa šiem sektoriem tiek sasummētas kontrolpunktu īpatnējās jaudas un īpatnējās enerģijas. Tad ap kontrolpunktiem izveido poligonus, kas noklāj interesējošā akvatorija platību, ja nepieciešams, matemātiski modelē papildu kontrolpunktus un summē iegūtos rezultātus.

## 2.4. Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu potenciāla aprēķins

Dabiskos apstākļos, tajā skaitā – Baltijas jūras Latvijas piekrastē, viļņi ir neregulāri. Viļņu augstums, periods un viļņu izplatīšanās virziens ir gadījuma lielumi.

### 2.4.1. Viļņu galvenie parametri un viļņu potenciāla aprēķinu rezultāti

Izvēloties pietiekami īsu laika intervālu un pietiekami mazu jūras virsmas laukumu, piemēram,  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ , varam pieņemt, ka šo parametru izmaiņas var aprakstīt ar varbūtību teorijas līdzekļiem kā stacionāru gadījuma procesu. Šajā gadījumā – enerģijas potenciāla aprēķināšanai vispiemērotākais ir viļņu frekvenču enerģijas blīvuma spektrs  $S(f)$ , [18]. Šo spektru raksturo parametri, kas turpmāk lietoti viļņu potenciāla aprēķinā:

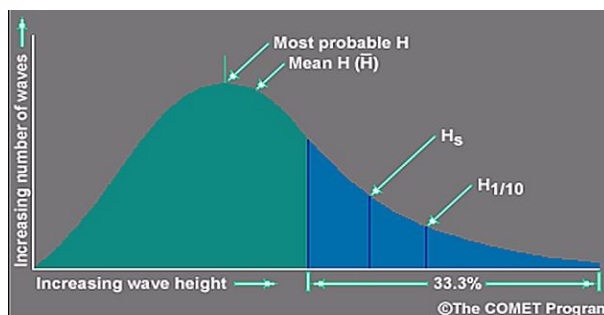
$H_s$  – raksturīgo viļņu augstums, ko nereti apzīmē ar simbolu  $sw_h$  (*significant wave height*);

$T_z$  – viļņu vidējais periods (*zero crossing*) =  $T_e$  (s) atbilstoši datu piegādātāju dotajiem datiem;

$T_p$  – viļņu periods, kuram spektrā atbilst maksimālā enerģija (s);

$\theta_{\text{vid}}$  – viļņu izplatīšanās virziena vidējais leņķis ( $^\circ$ ).

$sw_h$  ir viļņu parametrs metros, kas raksturo neregulāras viļņu ūdens virsmas svārstības (2.7. att.) [19].



2.7. att. Raksturīgo viļņu augstuma definīcijas ilustrācija [19].

Vidējais viļņa periods  $T_z$ , ir viļņu parametrs sekundēs, kas raksturo neregulāru viļņu ūdens virsmas svārstības, kā arī enerģijas blīvuma spektru. Tā kā  $T_z \leq T_e$ , to izteiksmēs izmanto viļņu enerģijas un jaudas novērtēšanai.  $T_e$  ir viļņu enerģijas blīvuma spektra vidējais enerģijas periods, ko ar enerģijas blīvuma spektra 1. un 0. kārtas momentiem saista sakarība [20]:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}. \quad (2.5.)$$

Variātas  $k$ -tais spektrālais moments ir specifisks konstants determinēts palīglielums punktu kopas formas raksturošanai, ko lieto mehānikā un statistikā, kur  $k$  var būt:  $-4, -3, \dots, 0, 1, 2, 3, 4$ .

Galvenais virziens  $mwd$  (*mean wave direction*) – viļņu parametrs grādos, kas raksturo neregulāru viļņu ūdens virsmas svārstību un enerģijas virziena spektru.

## 2.4.2. Aprēķinā lietoto sākuma datu apraksts

Lai izvēlētos kontrolpunktus, tika izvirzīti četri kritēriji [16].

1. Akvatorija apgabals “A” (2.8. att.) – Baltijas jūras austrumu daļa Latvijas (EEZ) ūdeņos ir aptuveni 216 km gara un 95 km plata.
2. Šajā apgabalā valdošie ir DR un R vēji [21].
3. Tika izvēlēti seši kontrolpunkti Baltijas jūras apgabalā “A” pie Latvijas krastiem.
4. Fiksētas kontrolpunktu koordinātes un tur esošie dziļumi (2.3. tabula). Izveidota kontrolpunktu vizualizācija (2.8. att.).

Mūsu rīcībā nav lokālo tehnisko līdzekļu, kas nodrošinātu datus šī spektra parametru koriģēšanai, tāpēc lietosim viļņa enerģijas blīvuma spektra raksturīgos parametrus [16] ( $H_s$  ( $swh$ ),  $T_z$  un  $mwd$  dati) – datu pieraksta ilustratīvs piemērs ir 2.2. tabulā.

2.2. tabula

Viļņu dati

| Gads  | Mēnesis | Datums | Stunda | min | <i>mwd</i> | <i>swh</i> |
|-------|---------|--------|--------|-----|------------|------------|
| 2010. | 1       | 1      | 0      | 0   | 328        | 0,699      |
| 2010. | 1       | 1      | 1      | 0   | 328        | 0,668      |
| 2010. | 1       | 1      | 2      | 0   | 328        | 0,637      |

Dati doti sešiem kontrolpunktiem (1.8. att.). Dati doti 24 stundas dienā, katru dienu mēnesī un katru mēnesi, piecus gadus (2010.–2014.). Pieņemot, ka meteoroloģiskie un hidroloģiskie apstākļi izvēlētajā apgabalā ir pietiekami viendabīgi, aprēķina rezultātus var attiecināt uz tam pieguļošo jūras apgabalu  $\pm 5$  km. DMI dati ir ar soli aptuveni 10 km [22]. *mwd* lielumi ir skatīti ik pa  $1^\circ$  vienībai  $360^\circ$  spektrā.

2.3. tabula

Izvēlēto kontrolpunktu koordinātes un akvatorija dziļumi tajos [16]

| Kontrolpunkts | <i>Lat</i> | <i>Lon</i> | Dziļums, m |
|---------------|------------|------------|------------|
| P1            | 56,100     | 20,833     | 24         |
| P2            | 56,500     | 20,833     | 24         |
| P3            | 57,000     | 21,167     | 24         |
| P4            | 57,400     | 21,333     | 56         |
| P5            | 57,600     | 21,667     | 21         |
| P6            | 57,700     | 24,167     | 31         |
| P7            | 56,400     | 20,810     | 24         |



2.8. att. Ilustratīvs kontrolpunktu izvietojums, kuriem veikti aprēķini [16].

### 2.4.3. Viļņu enerģijas potenciāla aprēķina rezultāti

Tika iegūti rezultāti apgabalā “A” (2.10. att.) – 6,51 TWh gadā [16] (2.4. tabula).

2.4. tabula

Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu enerģijas potenciāla aprēķinu detalizācija

| Aprēķinu nosaukumi                           | Kontrolpunkti |               |               |               |               |               |               |
|----------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                              | P1            | P2            | P3            | P4            | P5            | P6            | P7            |
| $E$ pa mēn. atkarībā no $H_{si}/T_e$ (kWh/m) | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 |
| $E$ pa mēnešiem atkarībā no $H_{si}/T_e$ (%) | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 |
| $E$ sadalījums laikā (kWh/m)                 |               |               |               |               | 2010.12.      |               |               |
| $P$ atkarībā no $H_{si}$ (W/m)               | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 |
| $P$ sadalījums laikā (W/m)                   | 2010/2011     |               |               |               |               |               |               |
| Viļņu sadalījums pa $\lambda$ intervāliem    | 2011          |               |               |               |               |               |               |
| $E$ P5 pa virz. un pa mēnešiem (kWh/m)       |               |               |               |               | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 |
| $E$ P5 pa mēnešiem (kWh/m)                   |               |               |               |               | 2010          |               |               |
| $E$ P5, P6, P7 pa mēnešiem (kWh/m)           |               |               |               |               | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 |
| $E$ P6 pa virzi. un pa mēnešiem (kWh/m)      |               |               |               |               | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 |
| $E$ P7 pa virz. un pa mēnešiem (kWh/m)       |               |               |               |               | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 | 2010–<br>2014 |

Papildus aprēķini – 13 kontrolpunktu īpatnējās viļņu jaudas un enerģijas un enerģiju pamatvirzienu projekcijas pa mēnešiem/gadiem, poligonu līknes apstrāde, teorētiskais potenciāls līnijā P1–P5, poligonu līknes apstrāde potenciāls ar  $\cos\theta$  līnijā P1–P5, poligonu

līknes apstrāde potenciāls ar  $\delta$  leņķu filtru sektoru pamatlīniju P1–P5 projekcijām un apgabala “A” kontrollaukuma bāzes līniju projekciju pārnese uz bāzes līniju nogriežņiem.

Viļņu enerģijai ir sezonālā atkarība (pa mēnešiem) no viļņu augstuma un perioda.

Aprēķinātas viļņu īpatnējās enerģijas kontrolpunktos P1, P2, P3, P4, P5, P6 un P7 pa mēnešiem un gadiem (2.5. tabula). Rezultāti sagrupēti pa vidējo  $T_e$  un  $H_{si}$  intervāliem (2.6. tabula, 2.7. tabula). Ir būtiski, cik ilgi un cik lielas enerģijas viļņi pastāv gada laikā (2.9. att.).

2.5. tabula

Viļņu īpatnējās enerģijas tabulas fragments no kontrolpunkta P1, 2010. gada maijs

| Datums | Stunda | min | $mwd$ | $swh$ | $T_z$ | $E$ , kWh/m |
|--------|--------|-----|-------|-------|-------|-------------|
| 1      | 0      | 0   | 245   | 1,367 | 5,055 | 4,537       |
| 1      | 1      | 0   | 245   | 1,438 | 5,184 | 5,149       |
| 1      | 2      | 0   | 246   | 1,481 | 5,262 | 5,544       |

2.6. tabula

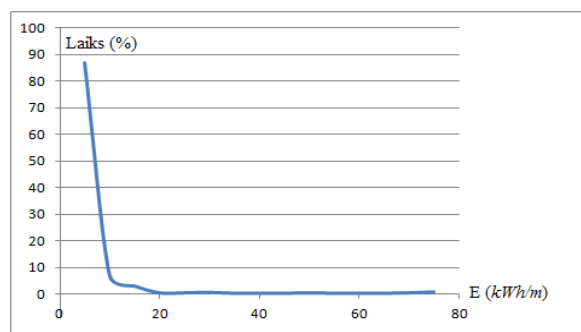
Viļņu īpatnējās enerģijas atkarībā no  $H_{si}$  un  $T_e$  kontrolpunktā P1, 2010. gada maijs

|          | Viļņu enerģija 1 m platam vilnim kontrolpunktā P1 (2010. gada maijs), kWh/m |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | Viļņu vidējais periods $T_e$ stundā                                         |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | kWh/m |
| $H_{si}$ | 2,0                                                                         | 2,5   | 3,0   | 3,5   | 4,0   | 4,5   | 5,0   | 5,5   | 6,0   | 6,5   | 7,0   |       |
| 0,2      | 0,14                                                                        | 0,31  | 0,77  | –     | –     | –     | –     | –     | –     | –     | –     | 1,21  |
| 0,3      | 1,35                                                                        | 5,32  | 4,61  | 1,93  | –     | –     | –     | –     | –     | –     | –     | 13,21 |
| 0,4      | 2,59                                                                        | 12,39 | 4,58  | 3,38  | 1,77  | –     | –     | –     | –     | –     | –     | 24,71 |
| 0,5      | 0,28                                                                        | 7,98  | 4,14  | 7,20  | 6,01  | –     | 1,79  | 1,13  | –     | –     | –     | 28,54 |
| 0,6      | –                                                                           | 5,58  | 4,14  | 5,15  | 6,97  | 1,39  | –     | –     | –     | –     | –     | 23,25 |
| 0,7      | –                                                                           | 1,83  | 14,74 | 9,69  | 5,10  | 1,03  | –     | –     | –     | –     | –     | 32,39 |
| 0,8      | –                                                                           | –     | 11,04 | 18,16 | 11,59 | 24,06 | 1,55  | 1,60  | 1,75  | –     | –     | 69,75 |
| 0,9      | –                                                                           | –     | 10,82 | 22,69 | 15,70 | 25,67 | –     | 4,33  | 3,95  | –     | –     | 83,17 |
| 1,0      | –                                                                           | –     | –     | 11,71 | 18,89 | 20,76 | 8,75  | –     | –     | –     | –     | 60,10 |
| 1,1      | –                                                                           | –     | –     | 13,79 | 21,90 | 24,26 | 8,33  | –     | –     | –     | –     | 68,29 |
| 1,2      | –                                                                           | –     | –     | –     | 12,87 | 15,01 | 19,62 | –     | –     | –     | –     | 47,51 |
| 1,3      | –                                                                           | –     | –     | –     | 6,45  | 21,00 | 23,63 | –     | –     | –     | –     | 51,08 |
| 1,4      | –                                                                           | –     | –     | –     | –     | 16,25 | 14,28 | 4,95  | –     | –     | –     | 35,48 |
| 1,5      | –                                                                           | –     | –     | –     | –     | 13,92 | 37,25 | 22,75 | –     | –     | –     | 73,92 |
| 1,6      | –                                                                           | –     | –     | –     | –     | –     | 12,10 | 6,51  | 14,19 | 7,94  | –     | 40,73 |
| 1,7      | –                                                                           | –     | –     | –     | –     | –     | –     | 14,43 | –     | 8,87  | –     | 23,30 |
| 1,8      | –                                                                           | –     | –     | –     | –     | –     | –     | 8,25  | –     | –     | 20,66 | 28,91 |
| 1,9      | –                                                                           | –     | –     | –     | –     | –     | –     | 9,58  | 10,36 | 23,17 | –     | 43,10 |
| 2,0      | –                                                                           | –     | –     | –     | –     | –     | –     | –     | 11,23 | 11,85 | –     | 23,08 |
| Kopā     |                                                                             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 71,72 |

2.7. tabula

Viļņu īpatnējās enerģijas sadalījums atkarībā no  $H_{si}$  un  $T_e$  kontrolpunktā P1, 2010. gada maijs (%)

|            | Viļņu procentuālais sadalījums pa viļņu augstumiem un vidējiem periodiem $T_e$ |       |       |        |        |        |        |       |       |       |       | Kopā,<br>% |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------------|
|            | Viļņu vidējais periods $T_e$ (s) stundā                                        |       |       |        |        |        |        |       |       |       |       |            |
| $H_{si}$   | 2,0                                                                            | 2,5   | 3,0   | 3,5    | 4,0    | 4,5    | 5,0    | 5,5   | 6,0   | 6,5   | 7,0   |            |
| 0,2        | 0,018                                                                          | 0,040 | 0,100 | —      | —      | —      | —      | —     | —     | —     | —     | 0,16       |
| 0,3        | 0,175                                                                          | 0,689 | 0,598 | 0,250  | —      | —      | —      | —     | —     | —     | —     | 1,71       |
| 0,4        | 0,335                                                                          | 1,606 | 0,594 | 0,438  | 0,229  | —      | —      | —     | —     | —     | —     | 3,20       |
| 0,5        | 0,036                                                                          | 1,033 | 0,537 | 0,933  | 0,779  | —      | 0,232  | 0,147 | —     | —     | —     | 3,70       |
| 0,6        | —                                                                              | 0,723 | 0,537 | 0,668  | 0,904  | 0,181  | —      | —     | —     | —     | —     | 3,01       |
| 0,7        | —                                                                              | 0,238 | 1,910 | 1,256  | 0,660  | 0,133  | —      | —     | —     | —     | —     | 4,20       |
| 0,8        | —                                                                              | —     | 1,430 | 2,354  | 1,502  | 3,118  | 0,201  | 0,208 | 0,226 | —     | —     | 9,04       |
| 0,9        | —                                                                              | —     | 1,403 | 2,940  | 2,034  | 3,326  | —      | 0,561 | 0,512 | —     | —     | 10,78      |
| 1,0        | —                                                                              | —     | —     | 1,518  | 2,447  | 2,690  | 1,133  | —     | —     | —     | —     | 7,79       |
| 1,1        | —                                                                              | —     | —     | 1,787  | 2,838  | 3,144  | 1,080  | —     | —     | —     | —     | 8,85       |
| 1,2        | —                                                                              | —     | —     | —      | 1,668  | 1,945  | 2,543  | —     | —     | —     | —     | 6,16       |
| 1,3        | —                                                                              | —     | —     | —      | 0,836  | 2,721  | 3,063  | —     | —     | —     | —     | 6,62       |
| 1,4        | —                                                                              | —     | —     | —      | —      | 2,105  | 1,851  | 0,642 | —     | —     | —     | 4,60       |
| 1,5        | —                                                                              | —     | —     | —      | —      | 1,804  | 4,827  | 2,948 | —     | —     | —     | 9,58       |
| 1,6        | —                                                                              | —     | —     | —      | —      | —      | 1,567  | 0,843 | 1,839 | 1,028 | —     | 5,28       |
| 1,7        | —                                                                              | —     | —     | —      | —      | —      | —      | 1,869 | —     | 1,150 | —     | 3,02       |
| 1,8        | —                                                                              | —     | —     | —      | —      | —      | —      | 1,069 | —     | —     | 2,677 | 3,75       |
| 1,9        | —                                                                              | —     | —     | —      | —      | —      | —      | 1,241 | 1,342 | 3,002 | —     | 5,59       |
| 2,0        | —                                                                              | —     | —     | —      | —      | —      | —      | —     | 1,455 | 1,536 | —     | 2,99       |
| Kopā,<br>% | 0,564                                                                          | 4,329 | 7,107 | 12,144 | 13,897 | 21,166 | 16,496 | 9,529 | 5,374 | 6,716 | 2,677 | 100,00     |



2.9. att. Viļņu īpatnējās enerģijas sadalījums laikā kontrolpunktā P5, 2010. gada decembris ( $\text{kWh/m}$ ).

2.8. tabula

Viļņu īpatnējās jaudas aprēķina tabulas fragments P1, 2010. gada februāris

| Datums | Stunda | min | $mwd$ | $swh$ | $T_z$ | Jauda, W/m |
|--------|--------|-----|-------|-------|-------|------------|
| 1      | 0      | 0   | 214   | 0,690 | 3,86  | 0,25       |
| 1      | 1      | 0   | 214   | 0,670 | 3,93  | 0,24       |
| 1      | 2      | 0   | 218   | 0,639 | 4,09  | 0,22       |
| 1      | 3      | 0   | 226   | 0,605 | 4,34  | 0,21       |
| 1      | 4      | 0   | 229   | 0,595 | 4,50  | 0,21       |
| 1      | 5      | 0   | 229   | 0,601 | 4,55  | 0,22       |
| 1      | 6      | 0   | 230   | 0,601 | 4,65  | 0,22       |
| 1      | 7      | 0   | 234   | 0,585 | 4,85  | 0,22       |
| 1      | 8      | 0   | 238   | 0,565 | 5,05  | 0,21       |
| 1      | 9      | 0   | 240   | 0,548 | 5,17  | 0,21       |
| 1      | 10     | 0   | 242   | 0,529 | 5,25  | 0,20       |
| 1      | 11     | 0   | 243   | 0,509 | 5,27  | 0,18       |
| 1      | 12     | 0   | 243   | 0,488 | 5,25  | 0,17       |
| 1      | 13     | 0   | 243   | 0,468 | 5,20  | 0,15       |
| 1      | 14     | 0   | 244   | 0,453 | 5,03  | 0,14       |

2.9. tabula

Īpatnējās jaudas aprēķinu rezultāti atkarībā no  $H_{si}$  P1 kontrolpunktā (02.2010.)

| Nr. p. k.                  | $H_{si}$ intervāli, m | $H_{si}$ , m | Vid. $P$ , W/m | Laiks, h | Laiks, % |
|----------------------------|-----------------------|--------------|----------------|----------|----------|
| 2                          | 0,1                   | 0,2          | 0,01           | 68,00    | 10,12    |
| 3                          | 0,2                   | 0,3          | 0,02           | 77,00    | 11,46    |
| 4                          | 0,3                   | 0,4          | 0,04           | 75,00    | 11,16    |
| 5                          | 0,4                   | 0,5          | 0,09           | 106,00   | 15,77    |
| 6                          | 0,5                   | 0,6          | 0,14           | 99,00    | 14,73    |
| 7                          | 0,6                   | 0,7          | 0,20           | 56,00    | 8,33     |
| 8                          | 0,7                   | 0,8          | 0,31           | 27,00    | 4,02     |
| 9                          | 0,8                   | 0,9          | 0,40           | 32,00    | 4,76     |
| 10                         | 0,9                   | 1,0          | 0,51           | 33,00    | 4,91     |
| 11                         | 1,0                   | 1,1          | 0,64           | 21,00    | 3,13     |
| 12                         | 1,1                   | 1,2          | 0,82           | 14,00    | 2,08     |
| 13                         | 1,2                   | 1,3          | 1,04           | 13,00    | 1,93     |
| 14                         | 1,3                   | 1,4          | 1,21           | 15,00    | 2,23     |
| 15                         | 1,4                   | 1,5          | 1,52           | 5,00     | 0,74     |
| 16                         | 1,5                   | 1,6          | 1,61           | 5,00     | 0,74     |
| 17                         | 1,6                   | 1,7          | 1,99           | 10,00    | 1,49     |
| 18                         | 1,7                   | 1,8          | 2,23           | 2,00     | 0,30     |
| 19                         | 1,8                   | 1,9          | 2,70           | 4,00     | 0,60     |
| 20                         | 1,9                   | 2,0          | 3,20           | 5,00     | 0,74     |
| 21                         | 2,0                   | 2,1          | 3,57           | 5,00     | 0,74     |
| Mēn. st. int. vidējā jauda |                       |              | 0,33           | 672,00   | 100,00   |

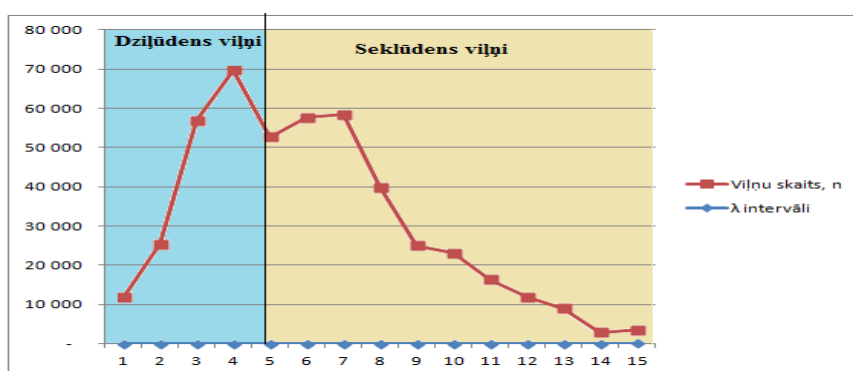
Aprēķinātas īpatnējās viļņu jaudas stundas intervālā kontrolpunktos P1, P2, P3, P4, P5, P6 un P7 W/m (2.8. tabula). Rezultāti sagrupēti pa  $H_{si}$  intervāliem (2.9. tabula).

Lai noskaidrotu, kāds ir viļņu sadalījums pa viļņu garumiem, tika aprēķināti 2011. gada vidējo viļņu garumi kontrolpunktā P1 (2.10. tabula) (2.10. att.)

2.10. tabula

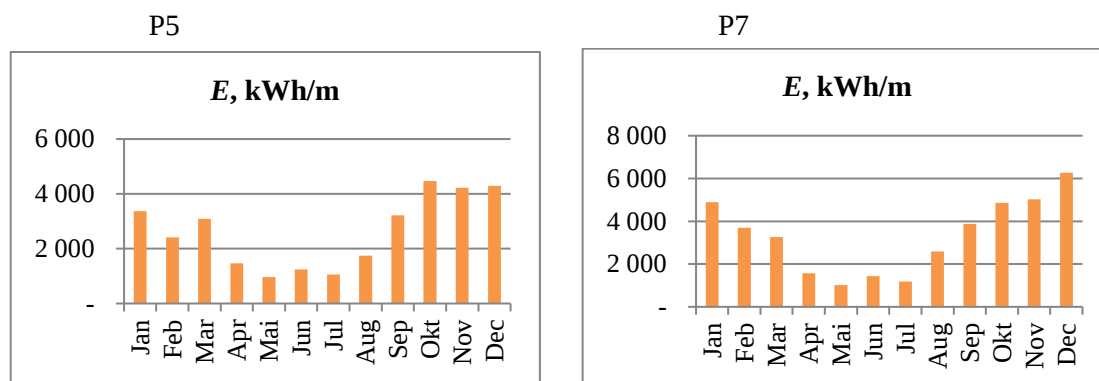
Vidējo viļņu sadalījums pa garumiem kontrolpunktā P1 (dziļums – 24 m) 2011. gadā

| Viļņu tips      | $\lambda$<br>intervāli | Viļņu skaits $n$ |
|-----------------|------------------------|------------------|
| Dziļūdens viļņi | 10                     | 11 756           |
|                 | 20                     | 25 339           |
|                 | 30                     | 56 848           |
|                 | 40                     | 69 666           |
| Seklūdens viļņi | 50                     | 52 639           |
|                 | 60                     | 57 537           |
|                 | 70                     | 58 439           |
|                 | 80                     | 39 799           |
|                 | 90                     | 24 944           |
|                 | 100                    | 23 056           |
|                 | 110                    | 16 235           |
|                 | 120                    | 11 827           |
|                 | 130                    | 8907             |
|                 | 140                    | 2732             |
|                 | 150                    | 3356             |
| Dz. ūd. v.      |                        | 163 609          |
| Sekl. ūd. v.    |                        | 299 471          |



2.10. att. Vidējo viļņu sadalījums pa garumiem kontrolpunktā P1 (dziļums – 24m) 2011. gadā ( $x$  ass vērtības jāreizina ar 10).

Enerģiju sadalījums pa mēnešiem parādīts 2.11. attēlā. Enerģijas pārveidošanai būs svarīgs viļņu potenciāla sadalījums pa mēnešiem (2.11. att.).



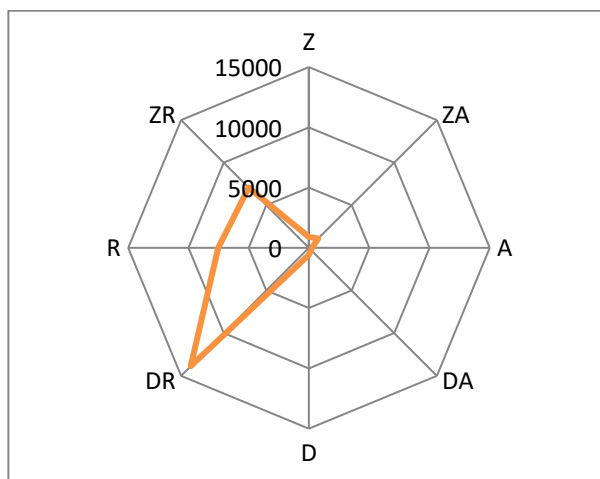
2.11. att. P5 un P7 kontrolpunktu īpatnējo enerģiju (kWh/m) sadalījums pa mēnešiem [17].

Aprēķinātas un sagrupētas pa *mwd* grupām (virziens  $\pm 22,5^\circ$ ) Baltijas jūras Latvijas EEZ enerģijas potenciāls, balstoties uz kontrolpunktu P5 datiem (2.11. tabula; 2.12. att.).

2.11. tabula

*E* aprēķins, izejot no kontrolpunktu P5, P6 un P7 datiem (pēc  $Z_0$  metodes [10])

|                 | ZA          | A           | DA          | D           | DR          | R           | ZR          | Kopā, kWh/m |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>P5</b>       | 1 088,58    | 263,98      | 242,51      | 575,79      | 13 872,39   | 7 527,08    | 7 064,72    | 31 538,34   |
| <b>P6</b>       | 185,04      | 224,14      | 293,47      | 3 361,94    | 4 006,71    | 3 655,91    | 1 808,86    | 13 940,58   |
| <b>P7</b>       | 336,40      | 218,43      | 459,77      | 3 157,73    | 10 209,42   | 16 707,20   | 5 210,83    | 39 692,46   |
| <b>%</b>        | 0,85        | 0,55        | 1,16        | 7,96        | 25,72       | 42,09       | 13,13       | 100,00      |
| <b>Att., km</b> | 100         | 216         | 199         | 95          | 100         | 216         | 199         |             |
| <b>TWh</b>      | <b>0,03</b> | <b>0,05</b> | <b>0,09</b> | <b>0,30</b> | <b>1,02</b> | <b>3,61</b> | <b>1,04</b> | <b>6,46</b> |



2.12. att. Vidējais īpatnējās enerģijas potenciāls kontrolpunktā P5 (dziļums – 21m; 2010.–2014.), (kWh/m).

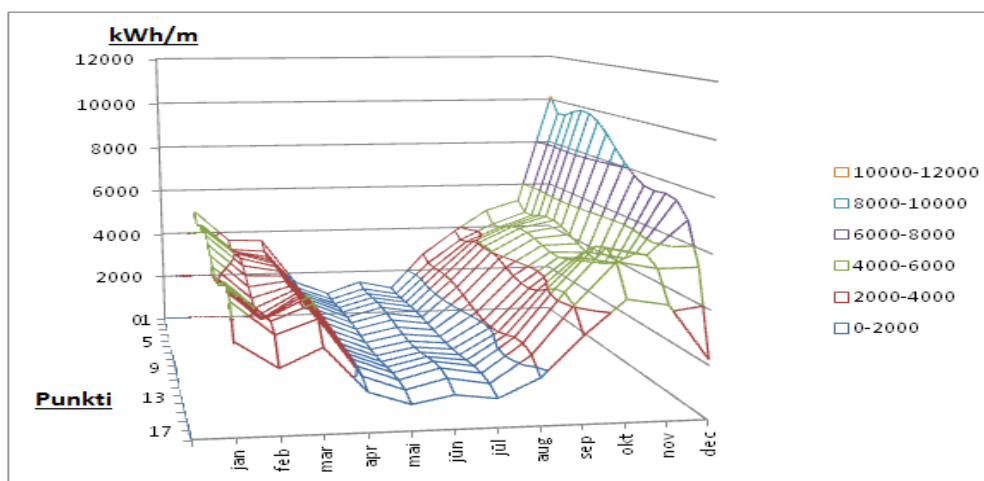
Kontrolpunktu P5, P6 un P7 gada (vidēji 2010.–2014.) īpatnējo enerģiju sadalījums pa virzieniem uz Baltijas jūras Latvijas EEZ grafisks attēls parādīts 2.13. attēlā [17].



2.13. att. Kontrolpunktu P5, P6 un P7 gada (vidēji 2010.–2014.) īpatnējo enerģiju sadalījums pa virzieniem uz Baltijas jūras Latvijas EEZ grafisks attēls (kWh/m) [17].

Aprēķinā veikti arī īpatnējo enerģiju sadalījumi kontrolpunktos P5, P6 un P7 pa virzieniem katru mēnesi 2010.–2014. gadā.

Kontrolpunktos P1; P2; P3; P4; P5 un P7. ir aprēķināti, apkopoti īpatnējo potenciālu dati pa mēnešiem, kā arī, interpolējot šos rezultātus, iegūts īpatnējās enerģijas potenciāla novērtējums punktos P1–P19 (2.14. att.).



2.14. att. Vidējie (2010.–2014.) īpatnējās enerģijas potenciāli vidēji pa mēnešiem punktos P1–P19 (kWh/m) [16].

### 3. ENERĢIJAS PĀRVEIDOŠANAS IEKĀRTAS IZVĒLE

#### 3.1. Iekārtu apskats

Pasaulē pirmā viļņu spēkstacija bija *Akuacadura* (Portugāle). Tur izmantoja trīs *Pelamis* viļņu enerģiju pārveidotājus ar kopējo uzstādīto jaudu 2,25 MW. Spēkstacija sāka ražot elektroenerģiju 2008. gada jūlijā [23]. Viļņu spēkstacija *Islay LIMPET* tika instalēta un savienota ar Nacionālo tīklu 2000. gadā, un tā ir pasaulē pirmā komerciālā viļņu darbināta instalācija. Skotija finansēja 3 MW viļņu spēkstacijā Skotijā 2007. gada 20. februārī [24]. “Bombora viļņu spēks” [25] atrodas *Perth* (Rietumaustrālija), un tā šobrīd izstrādā “*mWave*” [26] elastīgu membrānas pārveidotāju. *CETO* viļņu spēkstacija pie Rietumaustrālijas krastiem darbojas, lai pierādītu komerciālo dzīvotspēju, un pēc iepriekšējas ietekmes uz vidi novērtējuma tā tika attīstīta tālāk [27], [28]. Divas pilnīgi iegremdētas bojas, kas tika piestiprinātas jūras gultnei, pārveido okeāna viļņu enerģiju hidrauliskā spiediena veidā uz sauszemes. Tas piedzen elektrogeneratoru, kā arī ražo saldūdeni [29], [30]. *Ocean Power Technologies (OPT Australasia Pty Ltd.)* 19 MW jaudas viļņu spēkstacija, kas savienota ar tīklu netālu no Viktorijas (Portlandes) [31]. *Oceanlinx* līdz 2013. gada beigām paredzēja izveidot komerciālā mēroga demonstrācijas ierīci *Port MacDonnell* (pie Dienvidaustrālijas krastiem). Šai ierīcei ar nosaukumu *GreenWAVE* elektriskā jauda ir 1 MW [32]. *ReedSPORT*, Oregonā – komerciāla viļņu spēkstacija ASV Rietumu krastā, netālu no *ReedSPORT* (Oregonā). Šī projekta pirmais posms tika paredzēts 10 PB150 *PowerBuoys* jeb 1,5 MW jaudas [33], [34]. Azura viļņu barošanas iekārta ir 45 tonnu viļņu enerģijas pārveidotājs, kas atrodas 30 metru dziļumā *Kaneohe Bay* [35]. *Eugen Rusu* sniedz informāciju par viļņu stāvokļiem un viļņu enerģijas pārveidošanas efektivitāti trīs dažādos piekrastes vides veidos: okeāna piekrastes kontinentālās daļas, salu vidi un jūras vidi. Apskatā ir novērtēti vairāki pārveidotāju veidi, kas aptver lielu diapazonu no esošajām piekrastes un jūras iekārtām [36]. Autors uzskata, ka nākotne pieder pārveidotājiem ar maināmu jaudu. Autori *V. Jayashankar, K. Mala, S. Kedarnath, J. Jayaraj, U. Omezhan, V. Krishna* [37] augsti novērtē oscilējošās kolonnas perspektīvas ražot komerciālu elektroenerģiju. Tiek aprakstītas iekārtas ar vidējo enerģiju 24 kW/m un spēju ražot 100 GWh divos gados. Simulācijas rāda, ka turbīnas efektivitāte var pārsniegt 60 % no (10–100 %) nominālās jaudas. Ir pierādīts, ka apmēram 660 m viļņu garums ar 11 turbīnu ģeneratoriem ir pietiekams, lai atbilstu projektēšanas prasībām, un vidējais vilnis nodrošina efektivitāti aptuveni 36 %. 60 %, protams, ir augsts lietderības koeficients, tomēr iekārta ir ļoti masīva, un tāpēc, domājams – dārga (3.1. att.).

Tiesa, augstais lietderības koeficients ir rēķināts nevis no viļņa jaudas, bet gan no vidējās gaisa plūsmas jaudas.



3.1. att. Indiānas viļņu enerģijas pārveidotājs (OWC) [37].

### 3.2. Iekārtu klasifikācija

Pasaulē aktīvi ir ap 240 dažādu projektu. Iekārtas atšķiras pēc to darbības principiem, pēc kuriem tās var saklasificēt. *ITTC* rakstā [38] tiek sniegta viļņu pārveidošanas iekārtu novērtēšana atkarībā no tā, vai struktūra ir fiksēta vai peldoša.

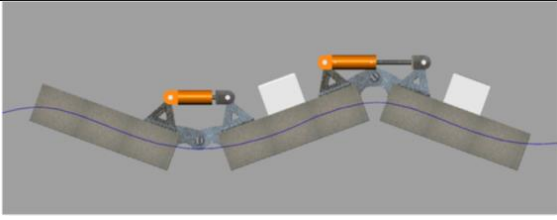
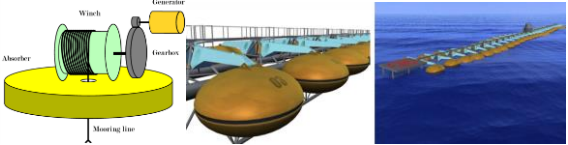
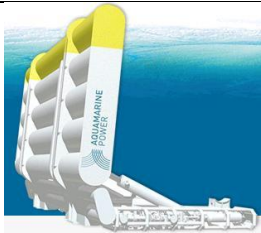
*IRENA* rakstā [39] arī iekārtu klasifikācijas pamatprincips balstās uz to, vai struktūra ir fiksēta vai peldoša, un tad sīkāk izvērstā atkarībā no izvietojšanas vietas.

Piedāvājam iekārtas klasificēt pēc darbības principa un izvietojšanas zonas – seklūdens, vidēja dziļuma un dziļūdens zonām (3.1. tabula).

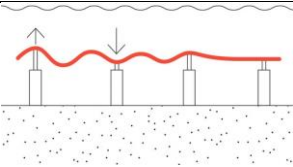
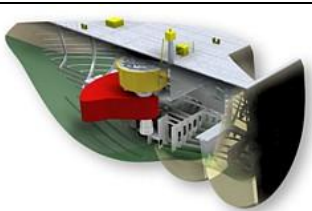
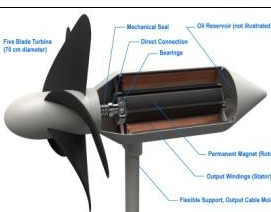
Piedāvājam viļņu pārveidošanas iekārtas novērtēt un salīdzināt pēc mūsu izvirzītajiem kritērijiem un izvietojšanas iespējamības zonas. Pēc darbības principa un izvietojšanas zonas – seklūdens (S), vidēja dziļuma (V) un dziļūdens (Dz) zonām (3.1. tabula).

3.1.tabula

Viļņu pārveidošanas iekārtu klasifikācija

|   | Pārv. tips                                | Ilustrācija                                                                          | S | V | Dz |
|---|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---|---|----|
| 1 | Virsmas slāpētāji [40]                    |  |   | × | ×  |
| 2 | Pludiņa tipa absorbētājs [41]–[43]        |  | × | × | ×  |
| 3 | Svārstošs viļņu plūsmas pārveidotājs [44] |   | × |   |    |

### 3.1. tabulas turpinājums

|    |                                                   |                                                                                      |   |   |   |
|----|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|
| 4  | Gaisa spiediena kamera<br>[45]                    |    | × | × | × |
| 6  | Pārplūdes pārveidotājs<br>[50]                    |    | × | × | × |
| 7  | Zemūdens spiediena starp. uztvērējs<br>[46], [47] |     | × | × |   |
| 8  | Gaisa burbuļa dzinējs [48]                        |   |   | × | × |
| 9  | Rotējoša masa<br>[49]                             |  |   | × | × |
| 10 | Plūsmas turbīna ar horizontālu asi [50]           |   | × | × |   |
| 11 | Plūsmas turbīna ar vertikālu asi [51]             |  | × | × | × |

## 3.3. Pārveidotāja modelis

### 3.3.1. Apskatītās tehnikas analīze

Pēc iekārtu apskata secinām, ka visas iekārtas var strādāt vidēja dziļuma zonā. Kā papildu kritērijus var izvirzīt perspektīvo iekārtu darbībai nepieciešamos:

- 1) iegremdēšanas dziļuma mainīšanas iespēju un/vai šīs iespējas vienkāršumu;
- 2) iekārtas pozicionēšanu pret *mwd* un/vai šīs pozicionēšanas vienkāršumu.

Novērtēsim iekārtas, izejot no šiem diviem izvirzītajiem kritērijiem (3.2. tabula).

Balstoties uz 2.1. tabulā veikto novērtējumu, ir vērts apskatīt 7. pozīciju (zemūdens spiediena starpības pārveidotāju) un 11. pozīciju (plūsmas turbīnu ar vertikālu asi). Lai izvēlētos perspektīvāko no šiem diviem iekārtu veidiem, izvirzīsim papildu kritērijus:

- 1) iespēja fiksēt uztvērēju nepieciešamā dziļumā;
- 2) iespēja pārveidot viļņa enerģiju rotācijas kustībā.

Salīdzināsim divus izvēlētos iekārtu veidus, balstoties uz šiem kritērijiem (3.2. tabula).

3.2.tabula

Viļņu pārveidošanas iekārtu novērtējums pēc to iespējas fiksēt uztvērēju noteiktā dziļumā un iespējas viļņu spēku pārvērst rotācijas kustībā

| Nr. | Pārveidotāja tips                         | Iespēja fiksēt   | Iespēja pārvērst rotācijā |
|-----|-------------------------------------------|------------------|---------------------------|
| 7   | Zemūdens spiediena starpības pārveidotājs | Sarežģīta        | Sarežģīta                 |
| 11  | Turbīna ar vertikālu asi                  | Vieglāk risināma | Elementāra                |

Tādējādi izvēlēta iekārta ir turbīna ar vertikālu asi.

### 3.3.2. Izvēlētais tehnikas pamatojums

Tehnikas izvēles pamatojums balstās uz veikto iekārtu analīzi.

Neraugoties uz to, ka turbīnas diametru arī ierobežo tās aploces vektoriālais ātrums, tomēr šī tipa turbīnām nav nepieciešams pozicionēšanas mehānisms attiecībā pret *mwd*. Tas nozīmē, ka 3.2.attēlā redzamajā blokshēmā 2. pozīcija konkrētajā mehānismā jau ir iestrādāta pašā mehānismā. Šāda tipa turbīnas iespējams kombinēt ar ofšoru vēja parkiem, par ko ir sagatavots patenta pieteikums promocijas darba kontekstā.

Jebkurai no jauna izstrādājamai iekārtai pirms *TRL* 9. stadijas veikšanas ir nepieciešams aplēst svarīgākos parametrus, kas nosaka, kāds ir šīs iekārtas izdevīgums. Definēsim, kādi ir šie parametri.

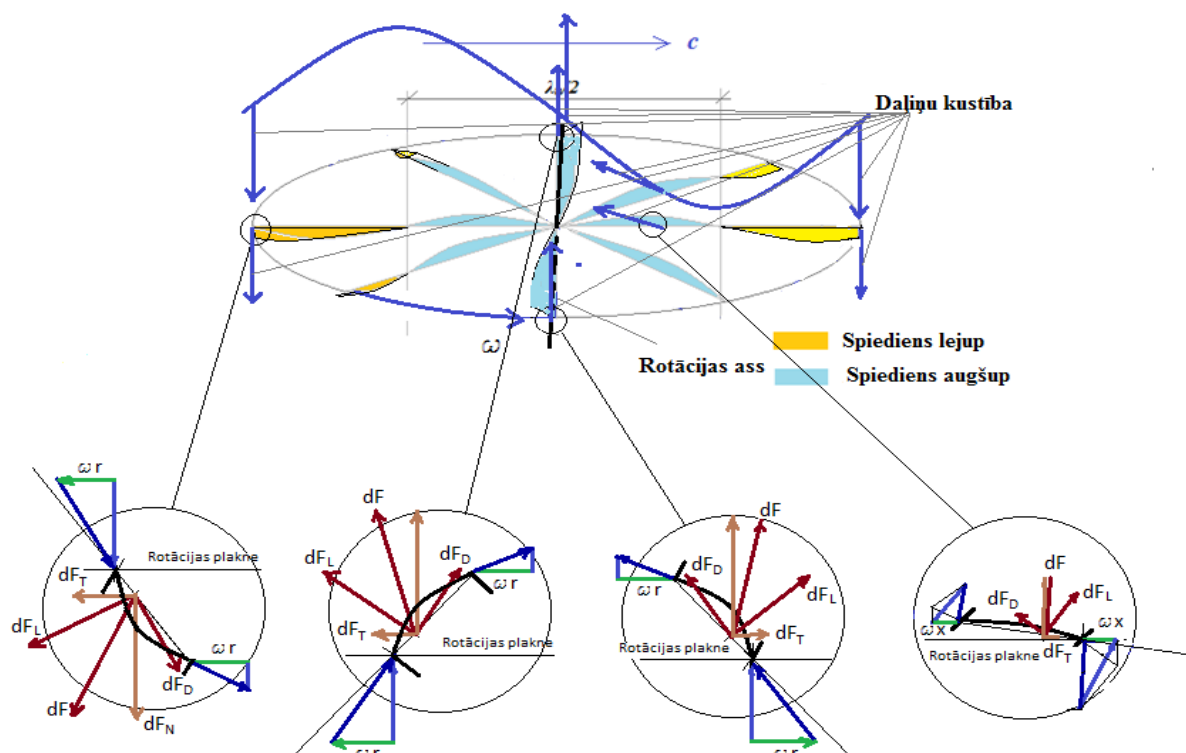
1. Sagaidāmās kapitāla izmaksas (*CAPEX*).
2. Sagaidāmās ekspluatācijas izmaksas (*OPEX*).
3. Iekārtas lietderības koeficienta līkne.

*CAPEX* ir jāsadala divās komponentēs, jo daļa no šī izdevuma posteņa var būt kredīta procenti, kuru likmes ir atkarīgas tikai no finanšu tirgus, bet ne no tehniskā risinājuma. Tiesa, kredīta procentu kopējā summa naudas izteiksmē ir atkarīga no aizņēmuma daļas ieguldījumos. Tāpēc ir svarīga *CAPEX* otra daļa – ieguldījumi. Iespējams, veiksmīgākais ieguldījumu novērtējuma rādītājs ir iekārtas amortizācija, jo tā ir atkarīga no sākotnējā ieguldījuma un nolietošanās laika.

*OPEX* ir atkarīgas no tehnisko apkopju (TA) un remontu (R) izmaksām.

Iekārtas izmantošanas koeficienta līkne būs atkarīga no tā, cik efektīvi tā pārveido viļņos pastāvošos spēkus konkrētajos viļņu potenciāla apstākļos.

Ņemot vērā iepriekš definētos parametrus, izvērtējot iekārtu apskatā minētās iekārtas, izvēlētais viļņu pārveidošanas modelis ir turbīna ar vertikālu rotācijas asi un pašregulējošām lāpstiņām (PL) (3.2. att.).

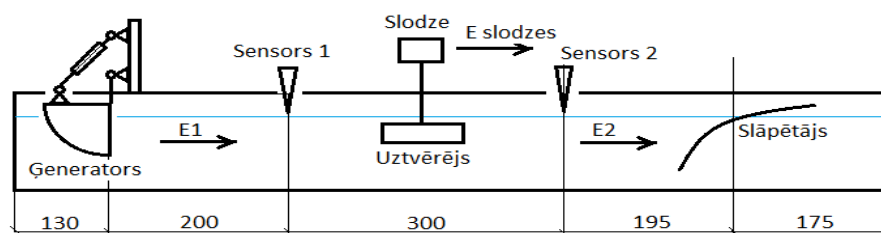


3.2. att. Turbīna ar vertikālu rotācijas asi un PL.

## 4. LABORATORIJA UN VIĻŅU PĀRVEIDOŠANAS MODEĻU IZMĒĢINĀJUMI

### 4.1. Laboratorijas apraksts

Lai varētu izmēģināt viļņu pārvēidošanas iekārtu modeļus, tika izveidota laboratorija ar 1,25 m dziļu, 1 m platu un 10 m garu baseinu. Baseins tika aprīkots ar viļņu ģeneratoru, viļņu pārvēidošanas modeļa instalācijas pieslēgumiem, viļņu parametru mērīšanas un datu arhivēšanas aprīkojumu, kuram izveidotas divas datorprogrammas un viļņu slāpētāju (4.1. att.) [52].



4.1. att. Laboratorijas sastāvdaļu principiālā shēma [52].

Viļņu baseins aprīkots arī ar ūdens pieplūdes, novadīšanas un sānu novērošanas ietaisēm un dažiem rokas mērinstrumentiem un foto/video kameru.

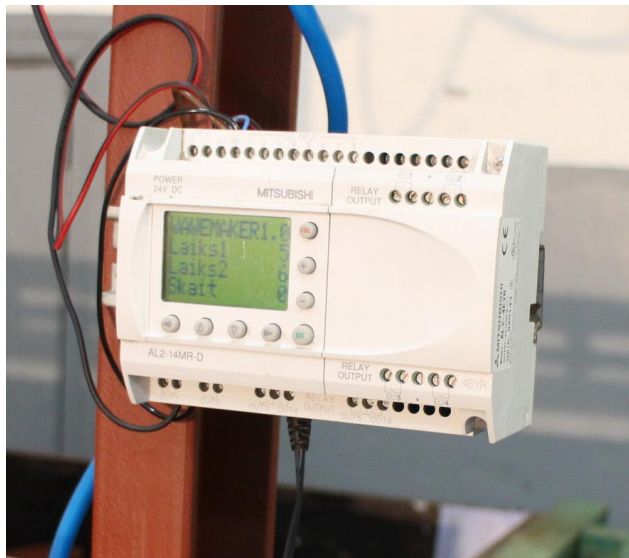
#### 4.1.1. Viļņu ģenerators

Viļņu radīšanai izveidojām ģeneratoru, ar kura palīdzību var regulēt viļņu parametrus  $T$  un  $H$ . Viļņu ģenerators sastāv no rāmī iekārta peldoša svārsta, ko groza ap asi pneimocilindrs (4.2. att.).



4.2. att. Viļņu ģenerators.

Sadalītāja darba režīmus ieregulē ar procesoru (4.3. att.), tādējādi nodrošinot viļņus radošā svārsta gājiena frekvenci un attālumu.

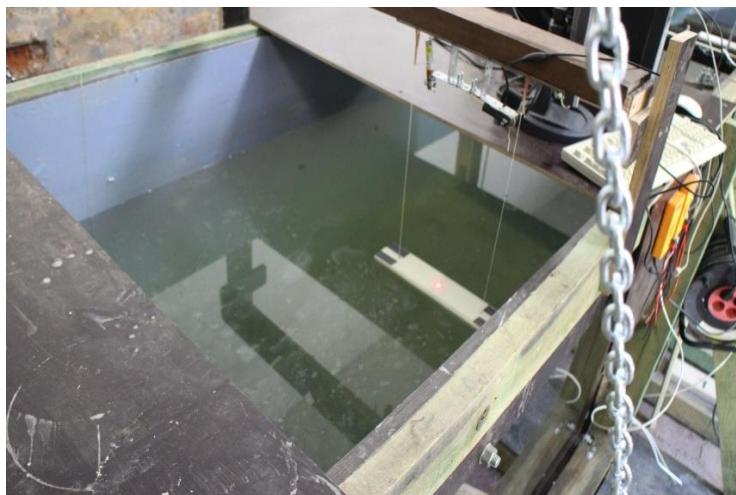


4.3. att. Procesors.

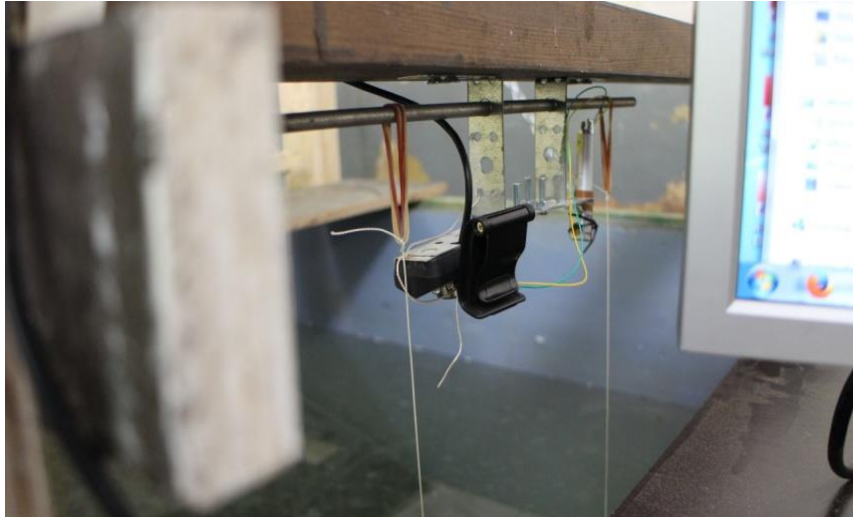
#### 4.1.2. Viļņu parametru mērīšanas un datu arhivēšanas aprīkojums

Viļņu parametru mērīšanas un arhivēšanas aprīkojums sastāv no:

- 1) diviem putuplasta pludiņiem, kas kopē ūdens virsmas svārstības (4.4. att.);
- 2) diviem lāzera sensoriem, kas uztver pludiņu svārstības un nodod signālus tālāk procesoram (4.5. att.);
- 3) datu analizatora, kurā tiek saņemti un apstrādāti signāli un arhivēti dati (4.6. att.);
- 4) datu uztveršanas/apstrādes procesorā tika instalētas divas datorprogrammas signālu saņemšanai, apstrādāšanai un datu arhivēšanai.



4.4. att. Pludiņš.



4.5. att. Lāzera sensors.

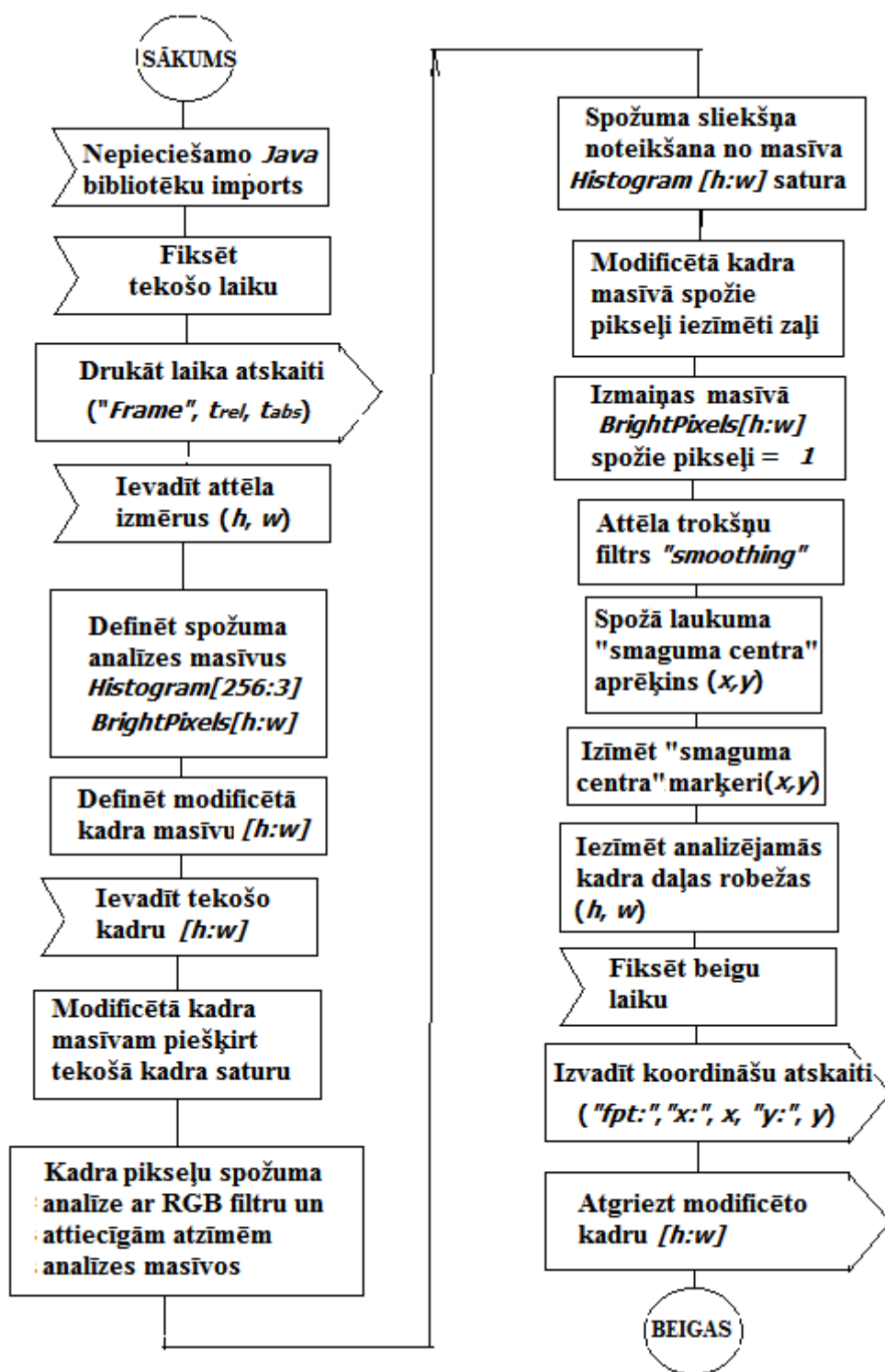


4.6. att. Datu analizators.

### 4.1.3. Datorprogrammas

#### 4.1.3.1. Lāzera stara koordināšu noteikšanas attēla apstrādes programma

Tika izveidots *WEB* kameras attēla apstrādes algoritms un sastādīta programma mērījuma lāzera stara koordināšu noteikšanai leņķa mērvienībās to fiksēšanai un reģistrēšanai datora absolūtajā laikā. Programmēšanas valoda *Jawa*. Programmas teksts ir datu apstrādes algoritma formāls pieraksts. Programmas struktūrshēma un valoda ir parādīta 4.7. attēlā.

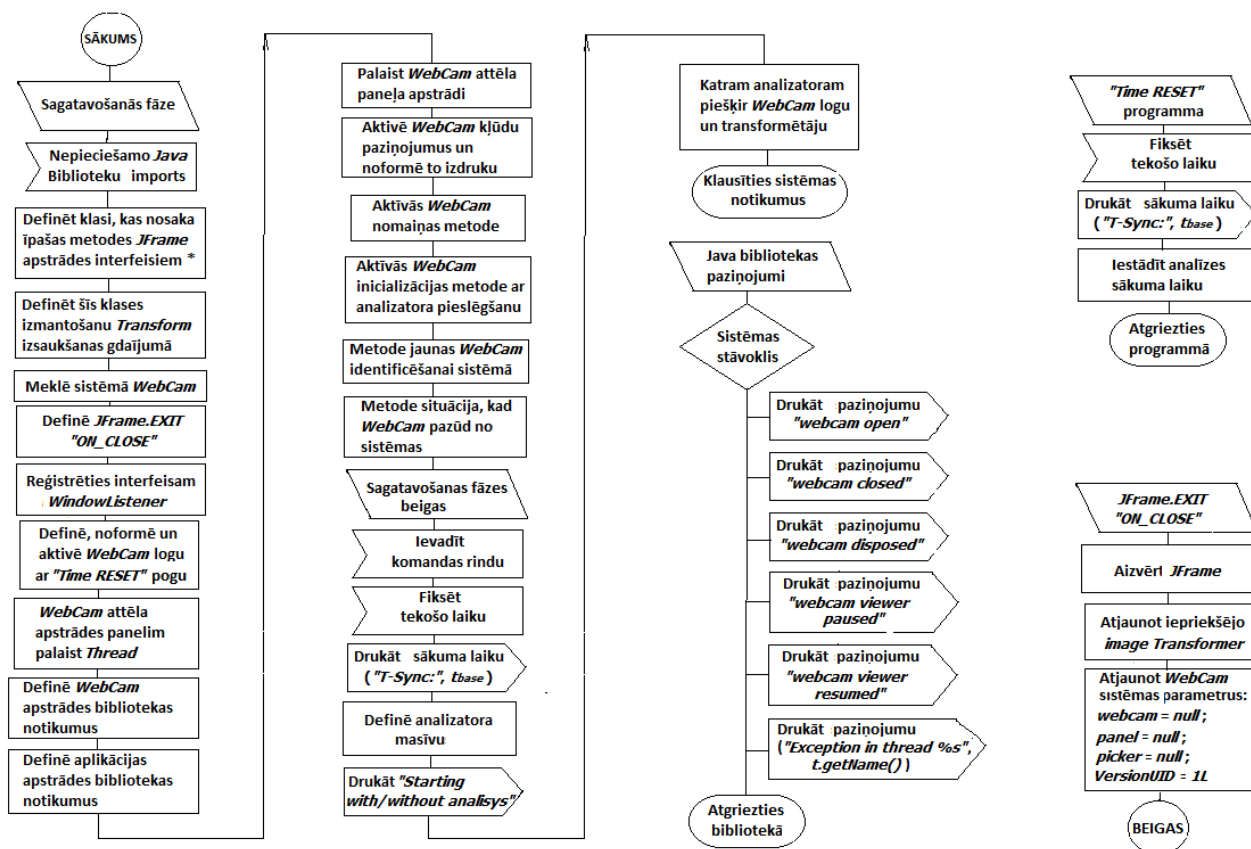


4.7. att. Lāzera stara koordināšu noteikšanas attēla apstrādes programmas struktūrshēmas un valodas apraksts.

#### 4.1.3.2. WEB kameras attēla datu fiksēšanas programma

Tika izveidota WEB kameras attēla datu fiksēšanas programma, tās teksts apraksts programmas algoritmu. Struktūrshēmas un valodas apraksts parādīts 4.8. attēlā. Ar programmas kompilatora palīdzību programmas teksts pārvērsts funkcionējošā programmas

kodā vai programmā, ar kuras palīdzību tika vākti un apstrādāti mērījumu dati starprezultātu iegūšanai



\* Apstrādes interfeisi:  
 Runnable,  
 WebcamListener,  
 WindowListener,  
 UncaughtExceptionHandler,  
 ItemListener,  
 WebcamDiscoveryListener,  
 ActionListener

4.8. att. WEB kameras attēla datu fiksēšanas programmas struktūrshēmas un valodas apraksts.

#### 4.1.4. Viļņu slāpētājs

Viļņu slāpētājs tika izgatavots no rāmja ar sietu, kura slīpumu var regulēt ar rokas vinčas palīdzību. Uz sieta aptuveni 10 cm biezā slānī uzbērtas 2–4 cm frakcijas dolomīta šķembas (4.9. att.).

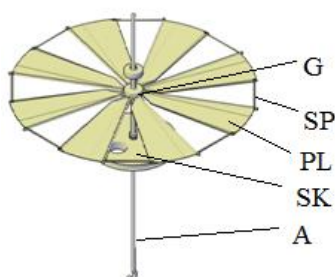


4.9. att. Viļņu slāpētājs.

## 4.2. Pilotprojekta īstenošana

### 4.2.1. Pilotprojekta modeļa risinājums

Tika izstrādātas aksiālas pašregulējošu lāpstiņu hidrokinētiskas turbīnas (*APRLHK* turbīna) attēls (4.10. att.).



4.10. att. *APRLHK* turbīnas uzbūve (G – gultnis, SP – spriegotājspriekuma, PL – pašregulējošā lāpstiņa, SK – skriemelis, A – ass).

Uz vertikālas nekustīgās ass A (4.10. att.) ar gultņu palīdzību tika nostiprināts un savstarpēji savienots skriemelis *SK* *APRLHK* turbīnas mehāniskai slogošanai un turbīnas rats ar PL, uz kurām iedarbojas viļņu spēks.

### 4.2.2. Pilotprojekta īstenošanas metodes izvēle

Pilotprojekta īstenošanai tika izvēlēta eksperimentālā metode. Laboratorijas eksperimentus ar modeļa turbīnu izmanto, lai pētītu turbīnas darbību un noskaidrotu tās parametrus.

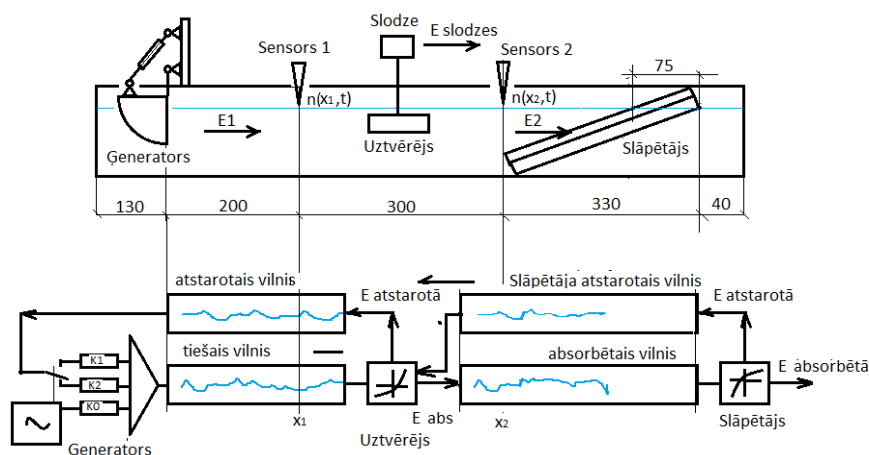
Līdz šim bija zināmas hidrokinētiskās turbīnas darbināšanai mainīga virziena plūsmās ar PL, kurās nepieciešamo kustību nodrošināšanai kā PL vienas enģu grupas atbalstam lietoja gredzenu, kas veidoja turbīnas ārējo diametru. Šāda veida turbīnām bija trūkums – atbalsta gredzens veidoja būtisku papildu pretestību un palielināja arī turbīnas masu.

Pilotprojektā tika izstrādāta *APRLHK* turbīna ar buras veida PL. Tai nav nepieciešams gredzens.

Eksperimenta veikšanai tika izveidoti viļņu pārveidotāju modeļi un laboratorija, kur iespējams radīt viļņus ar maināmiem parametriem.

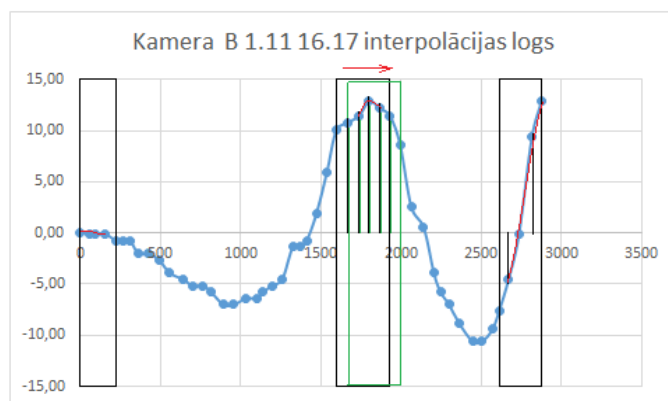
### 4.2.3. Izmēģinājumi

Darbā ir aprakstīts, kā tika ievērota izmēģinājumu procedūra, kādi instrumenti tika lietoti, kā notika mērīšana, kalibrēšana, mērījumu apstrāde, rezultātu analīze, kā notika viļņu parametru mērījumu iegūšanas darbi, iegūto datu reģistrēšana un arhivēšana. Tika aprakstīti novērojumi, izstrādāta un lietota viļņu procesu analīzes shēma (4.11. att.) [52].



4.11. att. Viļņu procesa analīzes shēma [52].

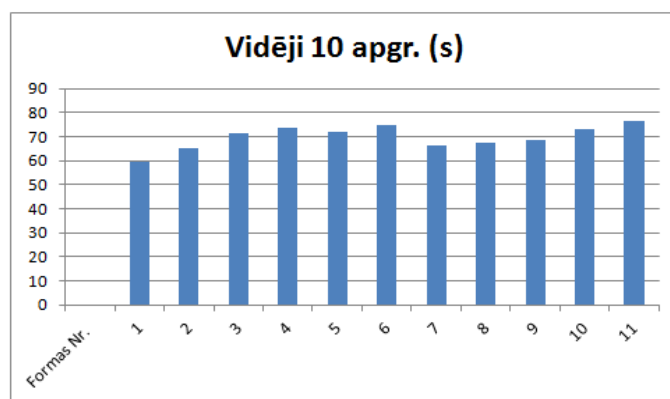
Mērījumu apstrādē tika lietota loga interpolācija. Interpolācijas logs nobīdīts par vienu soli ( $i + 1$ ), un atkārtoti polinomu koeficientu aprēķini, kamēr viss interpolācijas segments ir tādējādi apstrādāts (4.12. att.).



4.12. att. Interpolācijas segmentā slīdošais interpolācijas logs.

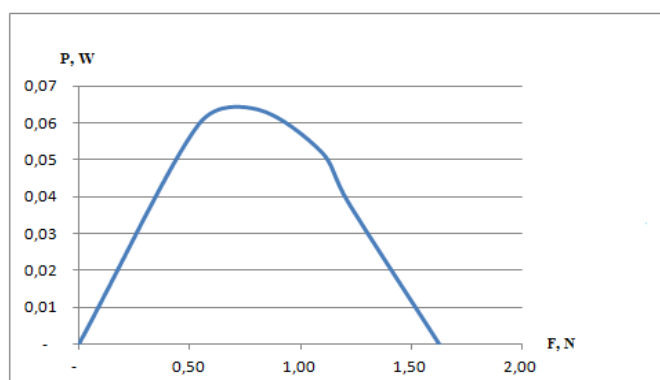
### 4.2.4. Modelēšanas rezultāti

Veicot *APRLHK* turbīnas izmēģinājumus ar dažāda tipa PL, tika iegūti arī dažādi rezultāti (4.1. tabula; 4.13. att.).



4.13. att. *APRLHK* turbīnu izmēģinājuma rezultāti (s), veicot 10.

Uz ieejas datu pamata tika aprēķināta šobrīd veiksmīgākās *APRLHK* turbīnas jaudas pie dažādiem tās apgriezieniem (4.14. att.).



4.14. att. Turbīnas jaudas  $P$  (W) aprēķina rezultāti pie dažādām slodzēm.

Ar izveidoto mērīšanas sistēmu tika nomērīti viļņu parametri pie sensoriem A un B, un no šiem parametriem aprēķināta viļņu jaudas un absorbētās jaudas (4.4. tabula).

Tika veikti turbīnas ar lāpstiņu profilu Nr. B-1 jaudas un turbīnas izmantošanas koeficienta aprēķini (4.1. tabula).

4.1. tabula

Turbīnas ar lāpstiņu profilu Nr. B-1 jaudas un izmantošanas koeficienta aprēķinu rezultāti

| $w$ , rps | $F$ , N | $r$ , m | $v$ , m/s | $P$ , W | $P_{(AK)}$ , W | $\eta_T$ , % |
|-----------|---------|---------|-----------|---------|----------------|--------------|
| —         | 1,63    | 0,15    | —         | —       | 0,736          | —            |
| 0,03      | 1,22    | 0,15    | 0,03      | 0,04    | 0,736          | 5,43         |
| 0,05      | 1,10    | 0,15    | 0,05      | 0,05    | 0,736          | 6,79         |
| 0,08      | 0,81    | 0,15    | 0,08      | 0,06    | 0,736          | 8,15         |
| 0,12      | 0,54    | 0,15    | 0,11      | 0,06    | 0,736          | 8,15         |
| 0,17      | —       | 0,15    | 0,16      | —       | 0,736          | —            |

4.1. tabulā minētie apzīmējumi:

$w$  – turbīnas leņķiskais ātrums (rps);

$F$  – turbīnas bremzēšanas slodzes spēks (N);

$r$  – bremzēšanas slodzes pielikšanas plecs (m);

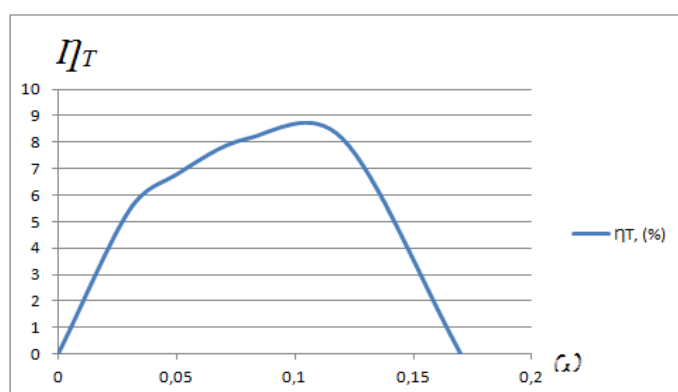
$v$  – vektoriālais aploces ātrums (m/s);

$P$  – bremzēšanas jauda (W);

$P_{(AK)}$  – koriģētā viļņa jauda pirms slogotas turbīnas (W);

$\eta_T$  – turbīnas izmantošanas koeficients (%).

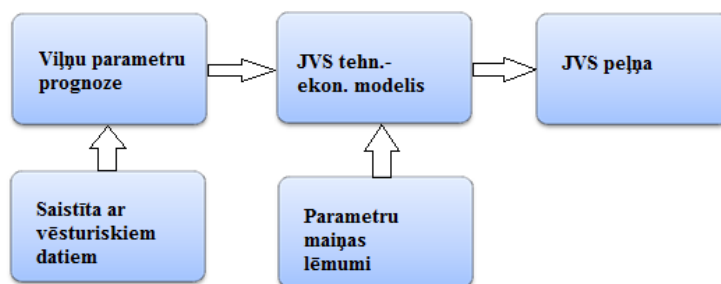
Tagad varam izveidot turbīnas ar lāpstiņas formu Nr. B-1 turbīnas izmantošanas koeficienta  $\eta_T$  raksturliķni atkarībā no apgriezienu sakaita (4.15. att.).



4.15. att. Turbīnas izmantošanas koeficienta  $\eta_T$  raksturliķne atkarībā no apgriezienu skaita.

## 5. VIĻŅU SPĒKSTACIJU OPTIMIZĀCIJA

Attīstot JVS, ir nepieciešamība pēc tehnoloģijas, ar kuras palīdzību varētu ērti apzināt spēkstaciju izbūves ekonomiskās konsekvences, pastāvot esošajiem ietekmes faktoriem – viļņu enerģijas potenciāls, JVS darbības efektivitāte, elektroenerģijas cenas, pieslēgums sadales tīkliem (ST), JVS iekārtu efektivitāte, pārējās izmaksas, dotācijas, juridiskais aspekts u. c. Sakarā ar to, ka JVS ietekmes faktoru ir pietiekami daudz, turklāt tie daudzos gadījumos ir mainīgi, tos ir nepieciešams optimizēt ar mērķi prognozēt peļņu (5.1. att.).



5.1. att. JVS optimizācijas principiālā shēma.

JVS optimizācijas instruments varētu būt speciāli izstrādāta datorprogramma, kuras lietošana kļūtu mērķtiecīga pēc JVS pirmsprojektēšanas izpēti datu iegūšanas. Pirmsprojektēšanas dati, kas attiecas uz šīs datorprogrammas lietošanu, ietvertu vismaz ietekmes faktoru apzināšanu un JVS skici projektu. Klasificēsim šo datorprogrammu kā JVS optimizācijas datorprogrammu (OD) un definēsim tās mērķi – lielākā produkcija naudas izteiksmē.

### 5.1. JVS optimizācijas uzdevuma nostādne

Lai veiktu JVS optimizāciju, ir jāveic priekšizpēti darbi – jāizvēlas būvniecības vieta, jāveic viļņu enerģijas potenciāla aprēķini, jāizvēlas tehnoloģijas veids un kapacitāte, pieslēguma shēma elektrotīklam, jānovērtē nepieciešamie kapitālizdevumi, saražotās enerģijas apjoms, ieņēmumi no tā pārdošanas un izmaksas ražošanai. Spēkstaciju plānošana tiek veikta peļņas palielināšanas kontekstā. Lai to veiktu, izmanto vairākus ekonomiskus kritērijus, piemēram, neto pašreizējā vērtību (NPV), iekšējo peļņas likmi (IRR), atmaksāšanās laiku, enerģijas vidējās izmaksas *LCOE* [53], [54]. Pastāvot vairākiem vai daudziem mainīgiem, variantu skaits var būt ļoti liels, un tas apgrūtina piemērotākā risinājuma izvēli. Praksē projekta ietekmes faktorus papildina vismaz, bet ne tikai enerģijas virzienu diagramma, sarunu rezultāti ar investoriem, aprīkojuma piegādātājiem un būvniekiem. Daži no sākumā neietvertajiem parametriem kļūst zināmi, un parādās nepieciešamība pārskatīt priekšizpēti.

Šajā nodaļā izmanto tikai NPV un *LCOE* ar darbā aprakstītajiem algoritmiem.

Optimizācijas uzdevumiem ir stohastisks raksturs, kurus raksturo funkcijas:

$$E(NPV(T_{\text{darb.}})) D_{\text{max}};$$

$$E(LCOE(T_{\text{darb.}})) D_{\text{min}}.$$

Stohastisko uzdevumu būtība ir sarežģīta, jo tajā ir nepieciešama ieejas procesu statistisko datu izmantošana (t. sk., bet ne tikai, korelācijas). Atzīmēsim, ka jāveido ilgtermiņa prognozes, kas rada grūtības. Tās (ilgtermiņa prognozes) jāveic/jāsastāda saskaņā ar atbilstošu plānošanu vai pienācīgu jebkura projekta novērtēšanu.

Novērtējot spēkstacijas ekonomisko efektivitāti, tiek izmantota scenāriju pieeja un gadījuma lielumi ar laika vidējām vērtībām [54]. Ir pazīstama JVS efektivitātes novērtēšanai piemērota metode, kuras pamatā ir gada sadalījums gadalaikos (ziema, pavasaris, rudens un vasara) un raksturīgo dienu (darba vai svētku) izvēle katrai sezonai. Šajā gadījumā tiek izmantotas katras dienas vidējās vērtības, un ieņēmumus aprēķina katrai sezonai, pamatojoties uz dienu skaitu. Cita metode ir balstīta uz gada sadalījumu pa mēnešiem un atbilstošo vidējo vērtību [53], [54] izmantošanu naudas plūsmas aprēķināšanai. Šo metodoloģiju trūkums ir tas, ka nav iespējams apsvērt faktisko JVS elektroenerģijas ražošanu un reālās cenu pārmaiņas tirgus apstākļos, kas rodas katru stundu.

## 5.2. JVS tehniski ekonomiskais novērtējums Baltijas jūras Latvijas EEZ

Ņemot par pamatu šī darba 1. nodaļā aprakstīto Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu potenciāla aprēķina datus [16], izvēlēsimies 200 km garas (kas sastāv no vairākiem posmiem ar atšķirīgiem ieejas parametriem) JVS perspektīvas. Par aprēķinu pamatu ņemsim standarta aprēķinu metodi neto pašreizējai vērtībai (NPV) un izmantosim 5.1. izteiksmi, saražotās elektroenerģijas aprēķinos lietosim viļņu potenciāla aprēķinu ieejas datus tādus, kādi tie ir bijuši vēsturiski 2011. gadā, izmantojot naivo prognozēšanas metodi.

JVS izmantošanas koeficients ietver vairāku koeficientu reizinājumu no viļņu enerģijas pārveidošanas līdz elektroenerģijas pieslēgumam ST.

Šajā aprēķinā apskatīsim/analizēsim tikai to procesu, kurā viļņu enerģija tiek pārveidota elektroenerģijā.

Viļņa enerģijas pārveidošana notiek ar turbīnas izmantošanas koeficientu  $\eta_T$ , ko raksturo 5.1. izteiksme:

$$\eta_T = \eta_V \eta_H \eta_P \eta_F \eta_L \eta_M \eta_E, \quad (5.1.)$$

kur  $\eta_V$  – kinētiskās enerģijas sadalījuma koeficients tilpumā;

$\eta_H$  – horizontālās plūsmas atdalīšanas koeficients (0,5);

$\eta_P$  – plūsmas izmantošanas koeficients, ar kuru novērtē tās plūsmas izmantošanu, kas izplūst caur turbīnu (*Beitz/Glauerts* 0,5926);

$\eta_F$  – formas koeficients ( $\pi/4$ );

$\eta_L$  – turbīnas hidrauliskais lietderības koeficients;

$\eta_M$  – mehāniskais lietderības koeficients (gultnis, blīvslēgs  $\approx 0,95$ )

$\eta_E$  – elektro ģeneratora lietderības koeficients.

Izmantojot Morozova vienādojumu [55], izteiksim sakarību starp šī darba 4.2.1. apakšnodaļā minētajiem zināmās *APRLHK* turbīnas T1 modeļa un ģeometriski līdzīgas turbīnas T2 ar diametru  $D_2$  izmantošanas koeficientiem (5.1. tabula):

$$\eta_{L2} = \left(1 - (1 - \eta_{L1})^5 \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}\right), \quad (5.2.)$$

kur  $\eta_{L2}$  – ģeometriski līdzīgas turbīnas lietderības koeficients;

$\eta_{L1}$  – zināmās turbīnas lietderības koeficients;

$D_1$  – zināmās turbīnas diametrs (0,9 m);

$D_2$  – ģeometriski līdzīgās turbīnas diametrs.

Sastādot  $\eta_{T1}$  un  $\eta_{T2}$  izteiksmes atbilstoši 5.1. izteiksmei, izdalot abu šo vienādojumu puses vienu ar otru, iegūstam 5.3. vienādojumu:

$$\frac{\eta_{T1}}{\eta_{T2}} = \frac{\eta_{L1}}{\eta_{L2}} \quad (5.3.)$$

No 5.3. izteiksim zināmās turbīnas  $\eta_{L1}$ :

$$\eta_{L1} = \frac{\eta_{T1}}{\eta_V \eta_H \eta_P \eta_F \eta_L \eta_M \eta_E}, \quad (5.4.)$$

kur vienādojuma labās puses visas vērtības ir zināmas. Tādējādi, zinot  $\eta_{L2}$ ,  $\eta_{L1}$  un  $\eta_{T1}$ , no 5.1. izteiksmes izvedam un aprēķinam ģeometriski līdzīgās turbīnas izmantošanas koeficientu  $\eta_{T2}$ .

Balstoties uz darba 1. nodaļā aprakstītajiem Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu potenciāla datiem kontrolpunktos P1, P2, P3, P4, P5 un P7 pie turbīnas ar  $D = 9$  m un  $\eta_{T2} = 0,25$ , veiksīm ekonomiskos aprēķinus.

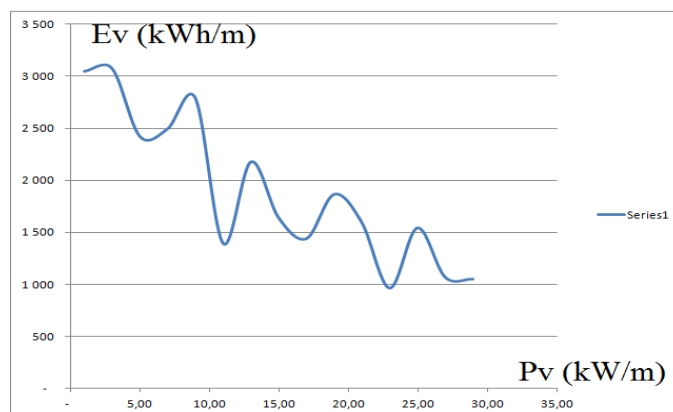
Lai noskaidrotu vislielāko enerģijas varbūtību, sareizināsim atbilstošo viļņu jaudu ar laiku, kurā šie viļņi pastāv, un sarindosim enerģijas vērtības pieaugošā secībā. Aptuveni 70 % viļņu enerģijas ir diapazonā līdz 39 kW/m (5.1. tabula).

5.1. tabula

Ienākošās viļņu enerģijas  $E_v$  atkarība no viļņu vidējās jaudas  $P_v$  kontrolpunktā P1

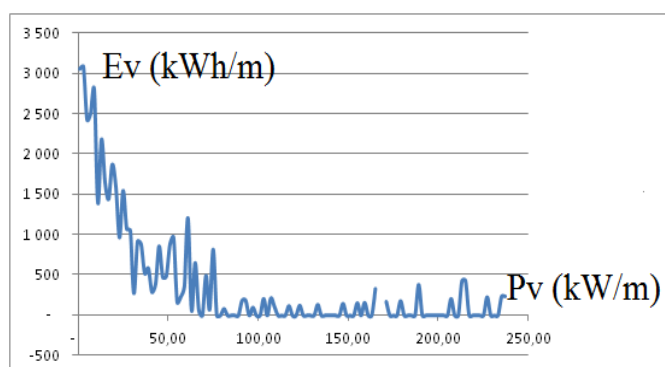
| $E_v$ (kWh/m) | Vidējā jauda $P_v$ (kW/m) | % no kopējās enerģijas $E_v$ |
|---------------|---------------------------|------------------------------|
| 522           | 37                        |                              |
| 585           | 39                        |                              |
| 883           | 35                        |                              |
| 914           | 33                        |                              |
| 966           | 23                        |                              |
| 1052          | 29                        |                              |
| 1070          | 27                        |                              |
| 1396          | 11                        |                              |
| 1442          | 17                        |                              |
| 1545          | 25                        |                              |
| 1595          | 21                        |                              |
| 1643          | 15                        |                              |
| 1869          | 19                        |                              |
| 3052          | 1                         |                              |
| 3079          | 3                         |                              |
| <b>31 508</b> |                           | <b>70,05</b>                 |

Tehniski JVS turbīnas jaudas diapazons ir ierobežots, un pārējā viļņu enerģija gada laikā atrodas viļņu jaudas diapazonā, kas ir tālu no 39 kW/m. Šajā intervālā JVS turpinās darbu iegremdētā pozīcijā. Izvēlēsimies maksimālo JVS turbīnas uztveramo jaudu pie *jvl* pozīcijā kā 39 kW/m. Šajā diapazonā īpatnējās viļņu enerģijas  $E_v$  (kWh/m) daudzuma atkarība no īpatnējās viļņu jaudas  $P_v$  (kW/m) parādīta 5.2. attēlā.



5.2. att. Īpatnējās viļņu enerģijas  $E_v$  (kWh/m) atkarība no īpatnējās vidējās viļņu jaudas  $P_v$  (kW/m).

Pilns kontrolpunkta P1 gada viļņu īpatnējās enerģijas  $E_v$  (kWh/m) spektrs parādīts 5.3. attēlā.



5.3. att. Kontrolpunkta P1 pilns viļņu īpatnējās enerģijas  $E_v$  (kWh/m) sadalījums atkarībā no viļņu īpatnējās jaudas  $P_v$  (kW/m).

Balstoties uz darba 1. nodaļā aprakstītajiem Baltijas jūras Latvijas EEZ viļņu potenciāla datiem kontrolpunktos P1, P2, P3, P4, P5 un P7 pie turbīnas ar  $D = 9$  m un  $\eta_{T2} = 0,25$ , veiksīm ekonomiskos aprēķinus iespējamai JVS, ko raksturo attālumi atkarībā no ieejas datiem un esošās navigācijas situācijas.

1. Ar P1 raksturlielumiem JVS garums ir 19,4 km.
2. Ar P7 raksturlielumiem JVS garums ir 24,85 km.
3. Ar P2 raksturlielumiem JVS garums ir 55,60 km.
4. Ar P3 raksturlielumiem JVS garums ir 61,73 km.
5. Ar P4 raksturlielumiem JVS garums ir 25,18 km.
6. Ar P5 raksturlielumiem JVS garums ir 13,65 km.

Ieguldījumu prognozes parādītas 5.2. tabulā. Aprēķinos tika lietotas elektroenerģijas cenu prognozes, kuru epizode parādīta 5.3. tabulā.

5.2. tabula

JVS ieguldījumu prognozes uz 1 turbīnu

| Pozīcija                                    | Ieguldījumi,<br>EUR |
|---------------------------------------------|---------------------|
| <b>Turbīnas cena</b>                        | 7000,00             |
| <b>Turbīnas uzstādīšana</b>                 | 10 000,00           |
| <b>Turbīnas infrastruktūra</b>              | 9000,00             |
| <b>Turbīnas infrastruktūras instalācija</b> | 12 000,00           |
| <b>Kopā 1 turbīna</b>                       | 38 000,00           |

5.3. tabula

Elektroenerģijas vairumtirdzniecības cenu prognožu epizode EUR/kWh

| Gadi   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 0,0152 | 0,0060 | 0,0173 | 0,0268 | 0,0412 | 0,0225 | 0,0059 | 0,0338 | 0,0072 | 0,0170 |
| 0,0249 | 0,0212 | 0,0164 | 0,0167 | 0,0066 | 0,0203 | 0,0206 | 0,0101 | 0,0101 | 0,0336 |
| 0,0070 | 0,0086 | 0,0029 | 0,0137 | 0,0239 | 0,0232 | 0,0224 | 0,0209 | 0,0009 | 0,0092 |
| 0,0171 | 0,0109 | 0,0086 | 0,0027 | 0,0115 | 0,0172 | 0,0301 | 0,0214 | 0,0095 | 0,0213 |
| 0,0131 | 0,0026 | 0,0140 | 0,0151 | 0,0147 | 0,0364 | 0,0208 | 0,0016 | 0,0227 | 0,0247 |
| 0,0026 | 0,0138 | 0,0191 | 0,0220 | 0,0194 | 0,0206 | 0,0144 | 0,0024 | 0,0097 | 0,0349 |
| 0,0144 | 0,0312 | 0,0169 | 0,0377 | 0,0208 | 0,0214 | 0,0478 | 0,0267 | 0,0343 | 0,0478 |

Procentu likme, diskonta likme un plānošanas perioda ilgums parādīts 5.4. tabulā.

5.4. tabula

Procentu likme, diskonta likme un plānošanas perioda ilgums

| Pozīcija                  | Vērtība |
|---------------------------|---------|
| <b>Procentu likme</b>     | 2,60 %  |
| <b>Diskonta likme</b>     | 2,00 %  |
| <b>Plānošanas periods</b> | 25 gadi |

### 5.3. Rezultāti

Aprēķina rezultāti parādīti 5.5. tabulā.

5.5. tabula

Baltijas jūras Latvijas EEZ modelētā JVS tehniski ekonomiskā aprēķina rezultāti

|                           | P1    | P2     | P3     | P4     | P5    | P7     | Kopā   |
|---------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| $P_{Vmax}$ , kW/m         | 39    | 33     | 34     | 37     | 30    | 34     |        |
| $P_{Tmax}$ , kW           | 88    | 75     | 76     | 84     | 67    | 77     |        |
| JVS garums, km            | 19,40 | 55,60  | 61,73  | 25,18  | 13,65 | 24,85  | 200,41 |
| $E_{EL}$ , TWh            | 0,19  | 0,52   | 0,55   | 0,26   | 0,11  | 0,23   | 1,86   |
| Turbīnu skaits            | 2155  | 6178   | 6859   | 2798   | 1517  | 2761   | 22 268 |
| Investīcijas, EUR         | 81,89 | 234,76 | 260,64 | 106,32 | 57,65 | 104,92 | 846,18 |
| LCOE ar kredītu, EUR/kWh  | 0,100 | 0,099  | 0,102  | 0,096  | 0,105 | 0,100  | 0,100  |
| LCOE bez kredīta, EUR/kWh | 0,092 | 0,091  | 0,093  | 0,089  | 0,096 | 0,092  | 0,092  |

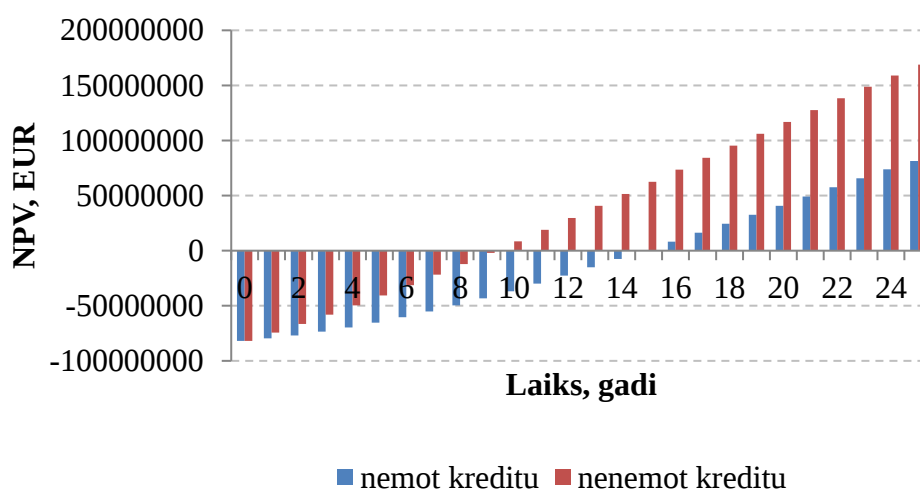
Tabulā minēti apzīmējumi:

$P_{Vmax}$  – ienākošo viļņu maksimālā uztveramā jauda, kW/m;

$P_{Tmax}$  – maksimālā turbīnas elektriskā jauda, kW;

$E_{EL}$  – saražotā elektroenerģija gadā, TWh.

Tehniskā projektā turbīnu maksimālās elektriskās jaudas tiks standartizētas, un tāpēc tās atšķirsies no teorētiski aprēķinātajām. NPV prognoze JVS P1 posmam parādīta 5.4. attēlā.



5.4. att. NPV prognoze JVS P1 posmam.

Līdzīgas NPV prognozes tika aprēķinātas arī pārējiem JVS posmiem.

## 6. DARBS NĀKOTNĒ

Jāpilnveido viļņu enerģijas pārveidošanas pētniecības laboratorija, pagarinot baseinu līdz 30 m, padziļinot to līdz 1,5 m, paplašinot līdz 1,5 m, pagarinot viļņu slāpētāja zonu vismaz līdz 7 m un uzlabojot viļņu ģeneratoru ar mērķi samazināt refleksiju no viļņu slāpētāja un viļņu ģeneratora, kā arī “mīkstinot” viļņu ģeneratora izstūmtā ūdens efektu.

Jāizgatavo *APRLHK* turbīna ar tādām PL, kas nodrošinātu turbīnas asij perpendikulāras reaktīvās plūsmas virzienu. Jāsamazina griezes momenta atšķirības starp turbīnas dažādām PL. Jāpilnveido PL hidrodinamiskās īpašības, sīkāk jāizpēta, kā dažādās viļņa fāzēs tā uztvers viļņa  $E_k$ , kā optimālāk izlīdzināt griezes momentus starp turbīnas dažādām lāpstiņām un uz vienu un to pašu lāpstiņu, kā izvēlēties lāpstiņu materiālus, lai to svars harmonētu ar izturību. Eksperimentāli jāapstiprina *APRLHK* lietderības koeficienta atkarība no tās diametra un viļņa garuma.

Jāizveido dažādu modeļu simulācijas vide.

Jāizstrādā turbīnu iegremdēšanas dziļuma maiņas mehānisms spēkstaciju droša darba turpināšanai virs projektēto viļņu parametru diapazona.

Jāizskata alternatīva iespēja izveidot uztvērēju, kas pārvietojas paralēli viļņiem (z asij).

Jāiegādājas, ja nepieciešams, jāpilnveido, JVS optimizācijas datorprogramma kā komerciāls pirmsprojektēšanas/biznesa plāna instruments, kurā bez šajā darbā respektētajiem faktoriem tiktu izvērtēti:

- 1) skiču projekta tāmes pozīcijas;
- 2) iespēja ievadīt 10 gadu datus apskatāmajam akvatorijam ar nepieciešamo kontrolpunktu skaitu tīklam ar standartam atbilstošu (ja nepieciešams, maināmu) “acs” izmēru;
- 3) viļņu potenciāla blīvuma identificēšana optimālā pārveidotāja izmēra noteikšanai un ģeneratora jaudas aprēķinam;
- 4) zudumi tīklos no pārveidotāja līdz pieslēgumam;
- 5) uzkrājamās/pārdodamās enerģijas profili;
- 6) viļņu virzienu maiņas fenomens;
- 7) izdevumi (R, TA, apdrošināšana, administrēšana, citi izdevumi, neplānoti izdevumi u. c.);
- 8) pārveidotāja izmantošanas koeficienta līknes;
- 9) kinētiskās enerģijas izmantošanas koeficients atkarībā no pārveidotāja iegremdēšanas līmeņa pozīcijas.

## 7. SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

1. Pēdējās dekādēs ogļskābās gāzes koncentrācija atmosfērā ir palielinājusies līdz tādām līmenim, kāds nav bijis pēdējo 800 000 gadu laikā. Tas rada klimata izmaiņas dabas anomāliju un katastrofu veidā. Aizvietojošos fosilos enerģijas avotus ar atjaunojamiem, šo problēmu varētu mazināt.
2. Pasaulē vienlaikus pastāv dažādas attieksmes pret tām pieejamiem viļņu enerģijas potenciāliem – citviet jau rada vidi šī enerģijas veida apguvei, citur šādu iespēju novērtē zemāk.
3. Katras valsts tās rīcībā esošā viļņu potenciāla izmantošanu nosaka ne tikai, bet arī šo valstu valdību pieņemtie lēmumi. Savukārt lēmumu pieņemšanu nosaka galvenokārt atbilstošo valdību un parlamentu izpratne par viļņu potenciālu un to izmantošanas nozīmīgumu.
4. Lietojot dažādas viļņu potenciāla aprēķinu metodes, tiek iegūti rezultāti ar atšķirību vismaz desmit reizes.
5. JVS pirmsprojektēšanas stadijā ir jālieto precīzākas metodes.
6. Viļņu enerģijas potenciāla būtiskākie raksturlielumi ir  $H$ ,  $T$ , viļņa garums  $\lambda$ ,  $mwd$ ,  $h$ , t. sk. paisuma/bēguma dinamika un viļņa jaudu sadalījums laikā.
7. Novērtējot viļņu potenciālu, ir svarīgi apzināties, kā apskatāmais akvatorijs iedalās zonās (dziļūdens, piekrastes un seklūdens) un kāds ir enerģijas blīvums šajās zonās. Ignorējot šo sadalījumu, aprēķinātajos viļņu potenciāla rezultātos var rasties būtiskas atšķirības. Viļņu potenciāla apgūšanā svarīgs rādītājs ir enerģijas sadalījums laikā.
8. Aprēķina piemērs Baltijas jūras Latvijas EEZ [16] liecina, ka:
  - 8.1. Rīgas jūras līcī viļņu enerģijas daudzums uz 1 m viļņa platuma ir aptuveni trīs reizes mazāks nekā atbilstošais rādītājs Baltijas jūras Latvijas EEZ. Uzskatāms, ka galvenie cēloņi ir viļņu veidošanās attālumu un ledus apstākļu atšķirībās;
  - 8.2. no Dienvidrietumu–Rietumu un Ziemeļrietumu pamatvirzieniem nāk vismaz 90 % viļņu enerģijas Baltijas jūras Latvijas EEZ daļā;
  - 8.3. sarežģītais enerģijas virzienu sadalījums norāda, ka potenciālo JVS izvietojums būs atkarīgs no to uztvērēju darbības leņķa diapazona;
  - 8.4. rēķinot Baltijas jūras apgabala “A” viļņu enerģijas potenciālu ar VEVPP metodi, rezultāts ir 6,51 TWh gadā. Lietojot salīdzinošo novērtējumu, kas iegūts ar vienkāršotu aprēķinu metodi  $Z_0$ , kas ir balstīta uz atšķirīgu kontrolpunktu izvietojuma principu, tas ir vidēji 6,46 TWh gadā (–0,77 %), iegūtie rezultāti ir tuvi, un tas nozīmē, ka veiktais viļņu enerģijas aprēķins ir ticams. Viļņu enerģijas virzienu projekcijas metode, salīdzinot ar tradicionālajām metodēm, vienmērīgāk un pilnīgāk uzskaita dažādu virzienu enerģiju apgabalā;
  - 8.5. VEVPP kalpo uztvērēja līnijas vai cita JVS izvietojuma precīzākai noteikšanai apgabalā un tai sekojošai potenciāli uztveramās enerģijas precīzākai novērtēšanai.

9. JVS iekārtu optimālam izvietojumam ir nepieciešami ieejas dati par viļņu potenciāla kopainas sastādīšanu. Šie dati ir koordinātes, dziļumi, paisuma/bēguma reģistri,  $H$ ,  $sw_h$  un  $T$ , kas piesaistīti konkrētiem laikiem.
10. Optimālākai JVS projektēšanai ir nepieciešami dati par to, kā mainās viļņu potenciāls tā mijiedarbībā ar iekārtām. Šādus datus var iegūt, modelējot JVS ar konkrētām iekārtām.
11. Viļņu virzieni vienmēr būs ietekmes faktors jebkuras JVS izveidē.
12. Viļņu enerģijas nevienmērība izraisīs nepieciešamību pārveidoto enerģiju pārdot un/vai uzkrāt.
13. Pastāv iespēja viļņu enerģiju kombinēt ar kādiem no vasaras periodā pieejamām enerģiju veidiem, piemēram, saules enerģiju.
14. Pasaulē ir interese par viļņu tehniku. Šobrīd nav atzītas tehnikas, kas dod vispusējas priekšrocības. Tehnikas izvēles metodoloģijas nav.
15. Turbīna ar vertikālu asi un pašregulējošām lāpstiņām varētu būt perspektīva viļņu enerģijas pārveidošanas iekārta.
16. Atšķirības dažādu akvatoriju un viena un tā paša akvatorija viļņu jaudu raksturlielumos, kā arī enerģijas cenu mainīšanās, rosina izskatīt iespējas radīt tādas pārveidošanas iekārtas, ar kurām varētu viegli paplašināt vai samazināt JVS.
17. Ir vērts klasificēt viļņu pārveidošanas iekārtas pēc to izmantošanas iespējām seklūdenī, vidēja dziļuma un dziļūdenī.
18. Pastāv iespēja izveidot tādu viļņu enerģijas uztvērēju, kas bez speciālas detaļas vai mezgla izpilda atsevišķas JVS iekārtas blokshēmas funkcijas, piemēram, iekārtas pozicionēšanu ap  $z$  asi (*APRLHK* turbīna).
19. Ir vērts klasificēt viļņu pārveidošanas iekārtas atkarībā no iespējām tās pasargāt no pārmērīgi lielas jaudas viļņiem.
20. Viļņu laboratorijai ir jāmeklē risinājumi, lai samazinātu refleksiju no viļņu ģenerators un abiem baseina galiem. To varētu panākt, ievietojot vismaz 7 m garus šķembu slāpētājus abos baseina galos un izmainot viļņu ģenerators konstrukciju. Refleksijas mazināšana dotu iespēju iegūt precīzākus mērījumus.
21. Viļņa enerģijas uztveršanu sarežģī tā daļiņu kustību trajektorijas un vilnim raksturīgās īpašības – refrakcija, difrakcija, refleksija un pārklāšanās. To sarežģī arī nevienmērīgais viļņu spektrs.
22. Viļņu enerģijas pārveidošanās procesā lietojot *APRLHK* turbīnu, tās efektivitātes paaugstināšanai ir jānodrošina tā, lai viena un tā pati turbīnas PL vienlaikus darbotos viļņa fāzēs, kurās pastāv dažāda virziena plūsmas. Tas, cik precīzi turbīnas lāpstiņa ieņems stāvokli, lai uztveru viļņa spēku, ir atkarīgs vismaz, bet ne tikai no:
  - 22.1. kāda ir lāpstiņas kustības brīvība ap tās nesošo asi, kā arī, cik viegli tā ap to pagriežas;
  - 22.2. cik lokana ir pati lāpstiņa;
  - 22.3. cik un kā nostiepta ir lāpstiņas garākā brīvā mala.
23. Lai mazinātu vienlaikus pretēji strādājošu viļņa spēku iedarbību uz turbīnas lāpstiņu, ir nepieciešami jauni tehniski risinājumi.

24. Turbīna strādā efektīvāk, ja:
  - 24.1. tās ass nekustas vertikālā dimensijā;
  - 24.2. lāpstiņu materiāla tilpummasai ir vienāda ar turbīnas darba vides tilpummasu;
  - 24.3. lāpstiņas brīvā mala neveido maisveida formu, tas ir, neveido kabatas, kas traucē ūdens plūsmai.
25. Pastāv iespēja izveidot tādu viļņu enerģijas uztvērēju, kas bez speciālas detaļas vai mezgla izpilda atsevišķas JVS iekāstas blokshēmas funkcijas, piemēram, iekārtas pozicionēšanu ap z asi (*APRLHK* turbīna).
26. Viļņa enerģijas uztveršanu sarežģī tā daļiņu kustību trajektorijas un vilnim raksturīgās īpašības – refrakcija, difrakcija, refleksija un pārklāšanās. To sarežģī arī nevienmērīgais viļņu spektrs.
27. Izstrādājot JVS darba iekārtas ir jārēķinās vismaz, bet ne tikai ar ūdens blīvumu un temperatūru, kā arī ar šo rādītāju izmaiņām.
28. JVS iekārtām ir jābūt pietiekami pasargātām no sālsūdens agresīvās vides un virknes mainīgām slodzēm.
29. JVS iekārtu elektroģeneratoriem būs virkne specifisku prasību.
30. Izmēģinātā *APRLHK* turbīnas modelis vilnī rada aptuveni 31 % lielu viļņa jaudas zudumu. Daļa no šī zuduma ir viļņa refrakcijas dēļ, daļa – nelietderīgu griezes momentu starpības dēļ starp atsevišķiem turbīnas zariem, un tikai daļa ir lietderīga enerģijas pārveidošana.
31. Apstiprinot darbā veiktos aprēķinus ar atbilstošiem *APRLHK* turbīnas *TRL 9* izmēģinājumu rezultātiem un skiču projekta tāmēm, var izrādīties, ka Baltijas jūras Latvijas EEZ esošais viļņu potenciāls ir nozīmīgs atjaunojamās enerģijas avots apjomā ap 1,86 TWh elektroenerģijas gadā. Tomēr ir jārēķinās ar viļņu enerģijas nevienmērību laikā, kas nozīmē, ka šī enerģija būs arī jāpārdod vai jāuzkrāj.
32. JVS optimizācijai ir jāizmanto speciāla OD, ar kuru ir iespējams apstrādāt šīm spēkstacijām specifiski raksturīgos ietekmes faktorus.
33. Pirms OD lietošanas ir jāveic JVS pirmsprojektēšanas darbi:
  - 33.1. jāiegūst ieejas dati par izvēlēto akvatorija viļņu potenciālu;
  - 33.2. jāiegūst OD komplementāra akvatorija karte ar atļauto JTP redakciju un dziļumu reģistriem;
  - 33.3. jāiegūst enerģijas izmantošanas koeficientu reģistri visai elektroenerģijas ķēdei, sākot no ģenerētās elektroenerģijas un beidzot ar pārdodamo elektroenerģiju uzskaites punktā;
  - 33.4. jāiegūst JVS uz skiču projekta balstīts biznesa plāns ar visām paredzamajām izmaksām.
34. JVS provizorisks tehniski ekonomiskais aprēķins Baltijas jūras Latvijas EEZ apstākļos izceļ viļņu potenciāla nevienmērības problēmas aktualitāti.

## IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] James Balog and team. Documentary “Chasing Ice”. [chasingice.com](http://chasingice.com)
- [2] “World Population Prospects – Population Division – United Nations” . [esa.un.org](http://esa.un.org). Retrieved 2016-09-15
- [3] Vaclav Smil. BP historical data. <https://ourfiniteworld.com/2012/03/12/world-energy-consumption-since-1820-in-charts/>
- [4] Department of Civil Engineering, Ghent University, Technologierpark 904, B-9052 Zwijnaarde, Belgium; philip.balitsky@ugent.be (P.B.); vasiliki.stratigaki@UGent.be (V.S.); peter.troch@ugent.be (P.T.)\* Correspondence: gael.veraofernandez@ugent.be; Tel.: +32-9-264-5489; Fax: +32-9-264-5837
- [5] Gael Verao Fernandez, Philip Balitsky, Vasiliki Stratigaki and Peter Troch. Coupling Methodology for Studying the Far Field Effects of Wave Energy Converter Arrays over a Varying Bathymetry. 2018.
- [6] G. Mork et al. (2010) Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. “Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”, Cambridge University Press
- [7] H.C. Sørensen 1,2 and J. Fernández Chozas 1,3 The Potential for Wave Energy in the North Sea file:///E:/Users/JanisB/Downloads/icoe2010\_h.c.soerensen1.pdf
- [8] H.C. Sørensen 1,2 and J. Fernández Chozas 1,3 “The Potential for Wave Energy in the North Sea”. 3rd International Conference on Ocean Energy, 6 October 2010, Bilbao 1.
- [9] Urban Henfridsson<sup>a</sup> Viktoria Neimane<sup>a</sup> Kerstin Strand<sup>a</sup> Robert Kapper<sup>a</sup> Hans Bernhoff<sup>b</sup> Oskar Danielsson<sup>b</sup> Mats Leijon<sup>b</sup> Jan Sundberg<sup>b</sup> Karin Thorburn<sup>b</sup> Ellerth Ericsson<sup>c</sup> Karl Bergman<sup>c</sup>. “Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak”.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148106002795>
- [10] T. Soomere, M. Eelsalu. On the wave energy potential along the eastern Baltic sea coast; Renewable Energy: An International Journal. 2014.
- [11] Egidijus Kasiulis Petras Punysa Jens Peter Kofoed b „Assessment of theoretical near-shore wave power potential along the Lithuanian coast of the Baltic Sea”; Journal of Water. Security, 2015, Vol. 1, jws2015b001. 2015.
- [12] Avotiņš A., Greivulis J., Kalniņš L. “Baltijas jūras potenciāls viļņa enerģijas pārveidošanai”. *Enerģētika un elektrotehnika*. Nr.23, 2008, 213.– 224.lpp. ISSN 1407-7345.
- [13] J. Beriņš, J. Beriņš. “Wave Energy Factors and Development Perspective in Latvia” “56-th Int. Scient. Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University” (RTUCON), 14 October 2015, (pp. 25–30) Riga.
- [14] Avotiņš A., Greivulis J., Kalniņš L. “Baltijas jūras potenciāls viļņa enerģijas pārveidošanai”. *Enerģētika un elektrotehnika*. Nr. 23, 2008, 213.–224. lpp. ISSN 1407-7345.
- [15] P. Jakobson. Mapping and Assessment of the United States Ocean Wave Energy Electric Power Resursh Institute, TECHNICAL REPORT. 2011, pp. 176.

- [16] J. Beriņš, J. Beriņš, A. Kalnačs. „Viļņu enerģijas potenciāla noteikšana Latvijas EEZ”. “Latvijas fizikas un tehnikas žurnāls.” 2016. gada Nr. 3.
- [17] MK noteikumi. Nr. 779 „Noteikumi par bāzes līniju punktu koordinātēm”. (17.08.2010.).
- [18] Leo H Holthuijsen, Joan Pau Sierra. „Overview of Ocean Wave Statistics. Ch.4. Spectral analysis” July 2008.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6034/06.pdf?sequence=7>
- [19] DMI Ocean and Ice services, DMI WAM model  
<http://ocean.dmi.dk/models/wam.uk.php>;
- [20] National Data Buoy Center. <http://www.ndbc.noaa.gov/measdes.shtml>
- [21] M. Soomere T., Keevallik S., Anistropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper., 35 Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 2001, 7, 1, pp. 35–49.
- [22] DMI Ocean and Ice services, DMI WAM model.  
<http://ocean.dmi.dk/models/wam.uk.php>
- [23] Power Technology 2008. “Pelamis, World’s First Commercial Wave Energy Project, Agucadoura”. <https://www.power-technology.com/projects/pelamis/>
- [24] Fyall, Jenny. "600ft 'sea snake' to harness power of Scotland". The Scotsman. Edinburgh. pp. 10–11. Retrieved 2010-05-19. (May 19, 2010).
- [25] Bombora Wave Power (Bombora Wave Power Pty Ltd). <https://www.bomborawave.com/>
- [26] Bombora Wave Power (Bombora Wave Power Pty Ltd)  
<https://www.bomborawave.com/mwave>
- [27] “Renewable Power from the Ocean's Waves” . CETO Wave Power. Retrieved November 9, 2010.
- [28] Keith Orchison. “Wave of the future needs investment” . The Australian. Retrieved November 9, 2010.
- [29] “WA wave energy project turned on to power naval base at Garden Island” . ABC News Online. Australian Broadcasting Corporation. 18 February 2015. Retrieved 20-th February 2015.
- [30] Downing Louise “Carnegie Connects First Wave Power Machine to Grid in Australia” . Bloomberg. (February 19, 2015).
- [31] PENNINGTON, N.J. and BALTIMORE. “Ocean Power Technologies in Wave Power Project”. *Lockheed Martin*. July 11, 2012.
- [32] “Oceanlinx 1MW Commercial Wave Energy Demonstrator”. *ARENA*. Retrieved 27 November 2013.
- [33] “America’s Premiere Wave Power Farm Sets Sail, Reedsport Wave Farm”. *Inhabitat*. 2012. <https://inhabitat.com/oregon-wave-power/>
- [34] US catching up with Europe – Forbes, October 3, 2012.
- [35] Graham, Karen. “First wave-produced power in U.S. goes online in Hawaii” Digital Journal. 19 September 2016. Web Accessed 22-th September 2016.
- [36] Eugen Rusu. “Evolution of the Wave Energy Conversation Efficiency in Various Costal Environments”, *Energies* 2014, 7.
- [37] V. Jayashankar, K. Mala, S. Kedarnath, J. Jayaraj, U. Omezhilan, V. Krishna. “Design of a 100 GWh Wave Energy Plant”. World Renewable Energy Congress 2011.

- [38] ITTC. "Wave Energy Converter Model test experiments". 04. 2014.
- [39] IRENA. "Wave Energy technology Brief". June 2014.
- [40] [http://www.aeea.us/AEEASite/Electricity\\_Option.html](http://www.aeea.us/AEEASite/Electricity_Option.html) (13.12.2017.)
- [41] Bolt Sea Power. (Fred. Olsen & Co).  
<http://www.boltwavepower.com/?nid=349850&lcid=1033> (26.12.2017.)
- [42] <http://www.seewec.org/results/Publishable%20final%20activity%20report.pdf>  
(26.12.2017.)
- [43] Ecomerit Technologies. <http://www.ecomerittech.com/centipod.php> (02.1.2018.)
- [44] Ocean news & Technology. <https://www.oceannews.com/news/milestones/aquamarine-power-announces-plans-to-downsize-business> ( 19.01.2018.)
- [45] Andrew Curtis. OE Buoe.  
[https://books.google.lv/books?id=NMW6BQAAQBAJ&pg=PA95&lpg=PA95&dq=OEBuoy&source=bl&ots=77NpCEyJNM&sig=bIX8sg-mnuzk8DCihWKkyl1kjrA&hl=lv&sa=X&ei=\\_WUeVZ2RBMHiaJ-FgcAN&ved=0CEUQ6AEwBTgK#v=onepage&q=OEBuoy&f=false](https://books.google.lv/books?id=NMW6BQAAQBAJ&pg=PA95&lpg=PA95&dq=OEBuoy&source=bl&ots=77NpCEyJNM&sig=bIX8sg-mnuzk8DCihWKkyl1kjrA&hl=lv&sa=X&ei=_WUeVZ2RBMHiaJ-FgcAN&ved=0CEUQ6AEwBTgK#v=onepage&q=OEBuoy&f=false) ( 01.01.2018.)
- [46] Weptos. <http://www.weptos.com/> (08.01.2018.)
- [47] National Science Foundation.  
[https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD\\_ID=1648834&HistoricalAwards=false](https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=1648834&HistoricalAwards=false) (02.1.2018.)
- [48] Waveenergyprize. <http://www.waveenergyprize.org/> (02.1.2018.)
- [49] AWS (AWS Ocean Energy Ltd.). <http://www.awsocan.com/flexible-wave-power.html>  
(10.01.2018.)
- [50] Wello. <https://wello.eu/the-penguin/technology/>
- [51] Tsumoru Shintake. „A Sustainable Future Powered by Sea”. <https://www.oist.jp/news-center/news/2017/9/20/sustainable-future-powered-sea> ( 01.01.2018.)
- [52] J. Beriņš, J. Beriņš. "Measurements Of Wave Power In Wave Energy Converters Effectiveness Evalution", Latvijas fizikas un tehnikas žurnāls, 2017, Nr. 4.
- [53] "US catching up with Europe" – *Forbes*. October 3, 2012.
- [54] "Reedsport project delayed due to early onset of winter weather" – *OregonLive* Oct 2012.
- [55] Z. Radziņš, V. Zars. "Hidrauliskās mašīnas un mehānismi". Latvijas Valsts izdevniecība, 1964. gads, 510. lpp.