



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**“MERELAINETE ENERGIA MUUNDURI ARENDAMINE
LÄÄNEMERE TINGIMUSTE JAOKS.
VÄIKETOOTJATE SÜNERGIA VÄIKESAARE NÄITEL ”**

**"DEVELOPING A WAVE ENERGY CONVERTER
FOR THE BALTIC SEA WATER AREA. SMALL ENERGY PRODUCERS SYNERGY ON
SMALL ISLAND GRID EXAMPLE"**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Nikon Vidjajev

Üliõpilaskood: 176691AAVM

Juhendaja: Prof. Arvi Hamburg

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Nikon Vidjajev	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> “MERELAINETE ENERGIA MUUNDURI ARENDAMINE LÄÄNEMERE TINGIMUSTE JAOKS. VÄIKETOOTJATE SÜNERGIA VÄIKESAARE NÄITEL ”	
<i>Kuupäev:</i> 03.01.2020	68 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> prof. Arvi Hamburg	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Victor Alari, Indrek Roasto	
<i>Sisu kirjeldus:</i>	
Käesolev lõputöö keskendub ühe laineenergia muunduri arendamise protsessile, eeldusega et seadme töökeskkonnaks on Läänemeri. Lõputöö esimeses peatükis antakse ülevaade merelainete energia elektri muundamise tehnoloogiast, keskkonnast, seadme disaini koostamisest ning põhjendatakse süsteemi komponentide valikut. Lõputöö teises peatükis katsetatakse muunduri prototüüpi Kuressaares, TalTech Mereakadeemia Väikelaevade Kompetentsikeskuse lainebasseinis, mille käigus koguti andmed edasiseks analüüsiks. Lõputöö kolmandas peatükis antakse ülevaade simulatsiooni tulemustest, hinnatakse merelainest elektri genereerimist reaalolukorra kohta. Simulatsiooni jaoks valiti välja saar, kus ühendus Eesti elektrivõrguga puudub ning saare infrastruktuuri jaoks genereerivad elektrit diisलगенераатор ja päikesepaneelid. Koostatakse saare tarbimis- ja tootmisprofiilid ning lisatakse merelainetest elektrit genereeriva seadme matemaatiline mudel. Kokkuvõttes kajastatakse töös läbiviidud analüüside tulemusi ja tuuakse välja edasiseks arendustööks vajalikke tegevusi ja eesmärgid. Lõputöö eesmärgid on saavutatud: said kaardistatud seadme arendamise sammud ja Kuressaare väikelaevade kompetentsikeskuse abil läbiviidud merelainete energia füüsiline ülekandmine tarbijale (lampidele). Koostati matemaatiline mudel simuleerimaks prototüübi tööd koos päikesepaneelidega ja diisलगенерааторiga väikesaare elektrivõrgus. Tulemused näitasid, et merelainete energiamuunduri ja päikesepaneelide koostootmine analüüsitud saare võrgus, vähendab oluliselt fossiilsete kütuste kasutamist. Lõputöö raames koostatud matemaatilise mudeli algoritmi on võimalik laialdaselt rakendada teiste laineenergia muundurite katsetamiseks ja töös näidatud kujul taastuvate allikate koostootmise edukuse hinnates mis loob lisandväärtust käesolevale lõputööle.	
<i>Märksõnad:</i> laine, meri, merelaine, WEC, merelainemuundur, taastuenergia, elekter	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Nikon Vidjajev	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> "DEVELOPING A WAVE ENERGY CONVERTER FOR BALTIC SEA WATERS. SMALL ENERGY PRODUCERS SYNERGY ON SMALL ISLAND GRID EXAMPLE "	
<i>Date:</i> 03.01.2020	68 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Professor Arvi Hamburg	
<i>Consultant(s):</i> Victor Alari, Indrek Roasto	
<i>Abstract:</i> This thesis focuses on the process of developing a sea wave energy converter, supposing that the resulting operating environment is the Baltic Sea. The first part of the thesis gives an overview of sea wave conversion technology, the environment, and presents the chosen design and the reasoning behind the component choices. The second part of the thesis concerns the testing of a prototype converter in Kuressaare, at the wave tank of TalTech's Maritime Academy's Small Craft Competence Centre, through which data was collected for further analysis. The third part of the thesis provides an overview of the results of the simulation, the realistic state of sea wave energy generation is evaluated. For this purpose, an island with no connection to the Estonian electricity grid was selected, where power for the island's infrastructure is produced by the combination of a diesel generator and solar panels. Initially, consumption and production profiles are calculated and a mathematical model of a unit generating power from sea waves is added. In the summary, the results of the analyzes carried out in this work are reflected upon and future actions and objectives are included for further development. The objectives of the thesis were achieved: the device's development stages were mapped and the physical transmission of wave energy to the consumer (lightbulbs) was achieved with the assistance of the Kuressaare small craft competence center. The mathematical prototype was simulated in synergy with solar panels and a diesel generator within a small island's power grid. The results showed that the addition of a sea wave energy converter to the grid significantly reduces the use of fossil fuels. The mathematical model's algorithm developed in the course of this thesis is suited for a wider use to evaluate the prototypes of other wave energy converters and the success of synergy of different renewable energy sources as demonstrated in this work, which provides an additional value from this thesis.	
<i>Keywords:</i> Sea energy, Waves, Baltic Sea, Energy, WEC, Energy converter, electricity.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	“Merelainete energia muunduri arendamine Läänemere tingimuste jaoks. Väiketootjate sünergia väikesaare näitel.”
Lõputöö teema inglise keeles:	"Developing a wave energy converter for the baltic sea water area. Small energy producers synergy on small island grid example"
Üliõpilane:	Nikon Vidjajev 176691AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	prof. Arvi Hamburg
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	26. jaanuar 2019
Lõputöö esitamise tähtaeg:	03.01.2019 15:00

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tänapäeval taastuvate energiaallikate olemasolu ja areng on maailmas aktuaalne teema. Nii tööstuses kui ka energeetikas on suund mitmete taastuvenergeetika tehnoloogiate rakendamiseks energiavarustuses. Ka Eestis arendatakse ja toetatakse biomassist koostootmise, hüdroenergia, päikesepaneelide ja tuuleenergeetika arengut. EL-i energia- ja kliimapoliitika 2030 järgi peaks aastal 2030 moodustama taastuvenergia osakaal energia lõpptarbimisest 45%. Merelainete energia kasutamine elektri genereerimiseks on seni jäänud Eestis piisava tähelepanuta ja puuduvad piisavad teadmised selle rakendamiseks energiavarustuses. Tuulegeneraatorid, hüdroelektrijaamad ja biokütused on Eestis leidnud laialdast kasutust energiavarustuses. Viimastel aastatel on tänu hindade odavnemisele ja toetusmehhanismidele suurenenud ka fotoelektriliste paneelide kasutusele võtmine elektrivarustuses. Senini ei ole Eestis ühtegi kommertskasutuses olevat laineenergiat kasutavat elektrijaama. Läänemere merelaine võib tulevikus muutuda

ressurssiks mis kindlustab Eesti energiasüsteemi iseseisvust. Seetõttu vajab merelainetuse kasutamine energiavarustuses uurimist ja pikemas perspektiivis võiks seda vaadelda kui kolmandat sammast taastuvate energiaallikate kasutamise arengul Eestis. See väide oli magistritööle eelneva bakalaureuse lõputöö teemaks, milles vaadeldi Eesti territoriaalmerd ja kaardistati kohad, kus merelainetusenergia kasutamine elektri genereerimiseks võiks toimuda. Valiti elektri genereerimiseks sobilik juhtimisstrateegia ja vaadeldi ohtusid, mis võivad takistada elektrienergia genereerimist. Magistritööga minnakse teooriast praktikale ja püütakse eelneva lõputöö kogemuse põhjal merelainetusmuunduri arendamisel minna edasi ja teha esimesed sammud prototüübi ja selle tööd juhtiva programmi matemaatilise mudeli arendamisel. Kuna Läänemeri erineb ookeanidest, oma mage vee ja väikse sügavuse poolest, on olemas võimalus erinevused välja tuua ja laineenergia muunduri töös eelistena ära kasutada.

Käesolev töö annab panuse Eesti pikaajalise energiamajanduse arengukavas 2030+ (ENMAK) kajastatud eesmärkide täitmiseks, kuna käesolev töö sisaldab viisi, kuidas saab taastuvate energiaallikate kasutust energiavarustuses suurendada.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on merelainete energia elektri muundava seadme ehk muunduri arendamine, seadme tootlikkuse määramine ja tootlikkuse andmetest lähtuvalt koostootmise modelleerimine päikesepaneelidega koostöös võrguühendusega tingimustes.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

3.1. Millised on tehnoloogilise lahenduse eeldused, mis on vajalikud, et süsteem sobiks kasutamiseks Läänemeres ja genereeriks elektrit merelainetuse abil?

3.2. Milline võiks olla sobivaim merelainetusest elektrit genereeriva muunduri arendamisetapid Läänemere jaoks?

3.3. Kuidas ja mis instrumentide abil saab simuleerida merelainetusmuunduriga elektri genereerimist Läänemeres?

3.4. Kuidas toimib elektri genereerimine koosmõjus merelainete muunduri ja teiste olemasolevate taastuvatest energiaallikatest elektrit genereerivate seadmetega (nt päikeseelektrijaamaga) võrguühendusega tingimustes ehk nn „off-grid“ tingimustes?

Teostuse skitseering:

1) Merelainete energia muunduri ülevaade, keskkonna ülevaade, lahenduse koostamine ja arendamisetappide kaardistamine.

2) Koostatud muunduri prototüübi katsetamine Kuressaares, TTÜ Väikelaevade Kompetentsikeskuse lainebasseinis, andmete kogumine ja analüüs.

3) Merelainetusmuunduri prototüübi ja selle tööd juhtiva matemaatilise mudeli simuleerimine Eesti territoriaalmeres, valitud asukoha raames elektri tootlikkuse hindamine.

4) Saare Viirelaid energiasüsteemi uurimine. Saare elektri genereerimise (diisligeneraator + päikesepaneelid) ja tarbimise bilansi koostamine ja simuleeritud merelainetuse muunduri lisamine süsteemi.

5) Järelduste ja soovitude koostamine.

4. Lähteandmed

Töö raames tehti koostööd järgmiste osapoolte vahel: Lainergy OÜ, Viirelaiul asuva infrastruktuuri omanikud, ScaleupX, TalTech EMERA, TalTech Inseneriteaduskond, TalTech Meresüsteemide instituut, EAS SA, TalTech Väikelaevade kompetentsikeskus.

5. Uurimismeetodid

Töös käsitletakse WEC (merelainetus energia muundur, *ing. wave energy converter*) põhimõttelisi tööprintsippe, luuakse seadme disain ja prototüüp, mis genereerib elektrit merelainetusest ja katsetatakse prototüüpi vastavas basseinis. Kaardistatakse edasise arendamise vajadusi ja modelleritakse lahendust matemaatilise mudeli abil ja teostatakse võrdlus teiste taastuvate energiaallikatega.

Metoodika põhineb mõõtmistel, katsetel, vaatlustel, kirjanduse analüüsil ja modelleerimisel.

Andmete analüüsiks kasutati PVGIS, PWRview, Microsoft Excel ja MatLabi programme.

6. Graafiline osa

Töö graafiline osa kujuneb merekaartidest, seadme joonistest, testimisel tehtud fotodest ja erinevate seoste visualiseerumisest.

7. Töö struktuur

Töö peatükid kujunevad töö käigus.

Töö plaan on järgmine:

- 1) Muunduri prototüübi teoreetiline taust, keskkonnapõhine arendus ja koostisosade valik;
- 2) Muunduri prototüübi katsetamine Kuressaares, TalTech Väikelaevade Kompetentsikeskuse lainebasseinis;

3) Muunduri prototüübi energia genereerimise mõju hindamine energiavarustussüsteemile koostöös teiste taastuvenergiast elektrit genereerivate seadmetega võrguvälistes tingimustes (st süsteem on autonoomses võrgus);

4) Järeldused. Labori testide võrdlus reaalloludesse paigaldamisega.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Töö kirjanduse allikad kujunevad töö käigus.

Töös kasutati raamatuid, teadusartikleid, aruandeid, arengukavasid, seadusakte ja intervjuusid konsultantidega (nt Victor Alari ja Indrek Roasto). Olulisematest allikatest võib välja tuua:

- 1) Energiamaajanduse arengukava aastani 2030;
- 2) P. Wellens, „Wave Energy. Study to determine the optimal performance of a floating wave energy converter,“ Delft, 2004;
- 3) K. Budal ja J. Falnes, „Optimum operation of improved wave-power converter,“ *Marine Science Communications*, 1977.

9. Lõputöö konsultandid

Vanemteadur Victor Alari– Merelainete teooria

Vanemteadur Indrek Roasto – Muunduritestid – elektrotehniline osa

10. Töö etapid ja ajakava

Töö etapid ja ajakava on järgmine:

1. Kirjandus läbitöötamine (01.03.2019);
2. Teoreetilise osa kirjutamine;
3. Arvutuste/mõõtmiste/modelleerimise teostatud (27.07.2019);
4. Uuringu tulemuste kirjeldamine;
5. Järelduste kirjutamine;
6. Kokkuvõtte koostamine;
7. Töö esimene versioon valmis (15.11.2019);
8. Juhendajale läbilugemiseks saatmine (15.11.2019);
9. Paranduste sisseviimine;
10. Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (15.12.2019);
11. Töö lõplik versioon valmis (30.12.2019);
12. Töö lõplik versioon esitatud (02.01.2020).

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
EESSÕNA.....	10
SISSEJUHATUS	12
1. MERELAINE MUUNDURI PROTOTÜÜPI ARENDAMISE EELDUSED.....	14
1.1 Uurimisharu ülevaade.....	14
1.2 Merelaine elektrienergiaks muunduri (WEC) loomise olulised faktorid.....	17
1.3 Seadme keskkonna-põhine disain.	19
2. MERELAINETE MUUNDURI TESTIMINE KATSEBASSEINIS.....	23
2.1 Seadme testimiseks ettevalmistamine	23
2.2 Süsteemi parandamine	24
2.3 Katsestendi kirjeldus	25
2.3.1 Mehhaanikaosa	25
2.3.2 Elektriosa	27
2.3.3 Generaatori elektrilised parameetrid	28
2.4 Metoodika.....	29
2.5 Katsetulemused ja analüüs	30
3. MERELAINETUS MUUNDURI MODELLEERIMINE.....	36
3.1 Modelleerimiseks kasutatud seadme ülevaade.	36
3.2 Modelleerimiseks kasutatud asukoha ülevaade.....	37
3.3 Väljundvõimsuse analüüs	38
3.3.1 Eeldused ja mudeli piirangud.	38
3.3.2 Keskmise väljundvõimsus erinevate mereseisundite vältel	39

3.3.3 Aastane energia tootmise analüüs.....	41
4. PÄIKESEENERGIA ELEKTRIIAAM VÄIKESAAREL VÕRGUVÄLISTES TINGIMUSTES.	44
4.1 Viirelaiu tarbimisgraafiku uurimine ja modelleerimine	44
4.1 Merelainete elektrienergiaks muunduri ja päikeseelektrijaama sünergia.	52
KOKKUVÕTE	61
SUMMARY	63
KASUTATUD KIRJANDUS.....	65
LISAD	69
Lisa 1 Teooria kasutatud lainete, energia ja võimsuse kirjeldamisel.....	69
Lisa 2 Teooria kasutatud merelainete muunduri ujuvkeha modelleerimisel.	75
Lisa 3 Teooria kasutatud merelainete muunduri ujuvkeha modelleerimisel.	84

EESSÕNA

Lõputöö teema “Merelainete energia muunduri arendamine Läänemere tingimuste jaoks” on seotud autori huviga innovaatiliste tehnoloogiate ja taastuveneergetika vastu. Selle tööga soovib autor jätkata merelainete energeetika valdkonna uurimist, mida alustati bakalaureuse lõputööga. Lõppeesmärk on ehitada merelainetest energiat muundav elektri jaam ja alustada elektri genereerimist.

Magistritöö uurimismetoodika põhineb mõõtmistel, katsetel, vaatlustel, küsitlustel, kirjanduse analüüsil, modelleerimisel. Lõputöö käsitleb merelainete energia muundamise tööpõhimõtet, mis on sobilik kasutuseks Läänemere tingimustes.

Töö autor soovib tänada juhendajat Arvi Hamburg’i ja konsultante Victor Alari’t ja Indrek Roasto’t.

Autor soovib avaldada erilised tänusõnad TalTech Mereakadeemia Väikelaevade Kompetentsikeskuse juhatajale Anni Hartikainen’ile ja tema meeskonnale, kes aitasid merelainetusmuunduri testimist ellu viia.

Nikon Vidjajev, Tallinn, Õismäe tee 20/57

SISSEJUHATUS

Tänapäeval maailma energeetikas levivad tendentsid, mille eesmärgid on seotud olemasolevate loodusvarade säilitamisega ja keskkonna kaitsmisega. Taastuvenergeetika kasvav kasutamine on lahutamatu osa nende eesmärkide täitmisel. Eestis ja teistes Euroopa riikides toetatakse taastuvaenergeetika kasvu. [1] 2003. aasta lõpus oli Euroopa Liidus taastuvatest allikatest toodetud energia osakaal summaarses lõpptarbimises 8,5 % ja 2016. aastal 17,0 % [2].

Eesti Vabariik pole jäänud kõrvalseisjaks. Riigi regioonide ja linnade tasemel, võetakse aktiivselt vastu otsuseid, mis on suunatud innovatsiooni ja taastuvateenergeetika tehnoloogiate arendamisele. Eestis võib hea näitena välja tuua taastuenergia toetust. Toetust makstakse vastavalt taastuenergia lahenduse poolt genereeritud/võrku edastatud energia hulgale. Toetuse makstakse kaksteist aastat pärast seda, kui võrguettevõtte on seadme tunnistanud nõuetele vastavaks. Enim makstakse toetust tuuleparkide, biokütusest koostootmisjaamade, hüdroelektrijaamade ja päikeseelektrijaamade omanikele. Toetuse suurus on 5,37 s/kWh ehk 0,0537 eurot taastuvast energiaallikast genereeritud kilovatt-tunni elektri kohta. [3]

Eestis toodeti 2017. aastal taastuvatest energiaallikatest 1620 GWh elektrit, mis on 14% rohkem võrreldes 2016. ja moodustas 16,7 % elektri kogutarbimisest. Biomassist ning jäätmetest toodeti 875 GWh elektrit. Tuuleenergiast toodeti 669 GWh, mis moodustas 41,3% taastuvelektri kogutoodangust. Hüdroelektrijaamades toodeti 2017 aastal kokku 29 GWh hüdroelektrit. Biogaasil töötavad koostootmisjaamad andsid võrku 42 GWh elektrit. [4] [5]

Võib näha, et statistikas merelainetuse abil genereeritud elekter ei kajastu. Käesoleva töö eesmärgiks on aidata kaasa merelainetuse laialdasemaks kasutamiseks Eestis. Selleks on töö käigus koostatud merelainetusenergia muunduri prototüüp ja matemaatiline mudel. Eesmärk on uurida merelainetusenergia muunduri rakendamist Läänemeres elektri genereerimiseks.

Esimeses osas vaadeldakse Läänemere merelainetuse energeetilist ressursi, määratakse seadme arendamise etapid, selgitatakse asukoht seadme paigaldamiseks ja koostatakse keskkonnapõhine seadme disain.

Teises osas kirjeldatakse seadme arendamist ja ehitamist, teostatakse testimine reaololude lähedases keskkonnas, milleks on lainete generaatoriga varustatud basseini.

Kolmandas osas vaadeldakse isoleeritud (autonoomset) võrku, väikesaart, kus puudub ühendust nii jaotus- kui põhivõrguga ja elektri genereerimine toimub fossiilset kütust tarbiva generaatoriga koostöös taastuenergia lahendusega. Koostatakse tootmis- ja tarbimisprofiil ning modelleeritakse matemaatilise mudeli abil merelainetuse muundurit. Hinnatakse laineenergia tootmisprofiili lisandumise mõju väikesaare elektribilansile.

Kokkuvõttes tuuakse välja katsete ja matemaatilise modelleerimise tulemused ning kohad, mis vajavad täiendavat tähelepanu. Luuakse vajalikud optimeerimisülesanded, mida tuleb Läänemere keskkonna jaoks merelainetusgeneraatori arendamisel jälgida. Tuuakse välja päikese- ja merelaineenergia elektriks koosmuundamise kasumlikkust võrguvälise tarbija näitel.

1. MERELAINEMUUNDURI PROTOTÜÜBI ARENDAMISE EELDUSED

1.1 Uurimisharu ülevaade

Analüüsid maailma energiatarbimise trende, tõuseb taastuvate energiaallikate genereeritud elektri osakaal aastaks 2023 viiendiku võrra, jõudes 12,4%-ni. Kõige suuremat taastuvate energiaallikate kasvu ennustatakse elektrisektoris, kus taastuvad allikad peaksid aastaks 2023 katma ligi 30% elektritarbimisest, mis on 6 % võrra suurem võrreldes aastaga 2017. Prognoositakse, et energia genereerimine taastuvates energiaallikatest moodustab 70% maailma energiatootmise juurdekasvust. Kõige kiiremini kasvab päikeseenergia muundamine, millele järgneb primaarallikana tuul, bioenergia ja hüdroenergia. Hüdroenergia on siiaeni olnud suuremaks taastuvenergiaallikaks, mis katab elektritarbimisest 16%, millele järgneb tuul (6%), päikeseenergia (4%) ja bioenergia (3%). [6]

Selleks, et liikuda maailma arengutega koos, tagada elektriallikate valikuvõimalust ja riigitasemel energeetilist sõltumatust, peab arendama nende laiemat kättesaadavust. Üheks võimaluseks, millele on pühendatud ka käesolev töö, on merelainetusenergia kasutamine elektri genereerimise allikana Eesti territoriaalmeres. Aastal 2017 toodeti Eestis 13,3 TWh elektrit, mis on 7,5% suurem võrreldes aastaga 2016. Põlevkivi (elektri genereerimise allikana) kasutavate ettevõtete toodang moodustas sellest hinnanguliselt 10 TWh. Suuremad nendest on siiaeni olnud Eesti Energiale kuuluvad elektrijaamad, mis annavad 80-85% Eestis toodetavast elektrienergiast. [7]

Eestis riik on panustanud põlevkivi uurimisse ning kaevandamisesse. Alates 20 saj. algusest on Eesti maapõuest kaevandatud üle miljardi tonni põlevkivi. Hinnanguliselt on kaevandatud ligikaudu 50% põlevkivi varudest. Praegu jääb alles sama palju ilma piiranguteta kaevandatavat põlevkivi, maapõues olev kogus on hinnanguliselt 4,8 miljardi tonni. Suurem osa piiranguid on seotud negatiivsete keskkonna- ja elusolenditele suunatud mõjudega. Jäädes sama kaevandamis mahu juurde, võib prognoosida, et olemasolev põlevkivi varu ammendub 50 aasta jooksul. Kui jätkub põlevkivi tootmise automatiseerimine ja selle abil saab kaevandada ebasobivates geoloogilistes tingimustes, siis pikeneb ka põlevkivi kaevandamisaeg hinnanguliselt 20 aasta võrra. [7]

Uute energiaallikate väljaarendamine on vajalik selleks, et tagada riigi energeetilise süsteemi jätkusuutlikkus ka pärast põlevkiviressursi ammendumist ja vähendada kasvuhooonegaase. Merelainete energeetilise ressursi elektriks muundamine on üks võimalik uus energiaallikas. Uue energiaallika kasutusele võtmine aitab katta energianõudlust ning tagab ka tulevaste põlvkondade energiavajaduse.

Laineressursi energiaallikana vastuvõtmine äratav ühiskonnas huvi ka teiste taastuvate energiaallikate, nagu hüdroenergia, tuuleenergia, päikeseenergia, geotermalne energia, bioenergia ja loodete (tõus ja mõõnade) energia vastu (*tidal energy* - *ing. k.*). Taastuvenergia ehk nn roheline energia populariseerimine (nagu energiaallikate tutvustus läbi haridussüsteemi, arendustööde ja taastuvate energiaallikate arvu kasvu subsideerimine [4]) ja energia säästmise meetodite (nt. ressursitõhususe meetmed [8]) rakendamine pannustavad säästva energeetika arengusse. Rohelised lahendused, aitavad aeglustada planeedi Maa globaalset soojenemist (näiteks Pariisi kokkulepe [9]) ja on arengumaades ja arenenud riikides prioriteetsed. [10]

Veekogudes tekkinud lained on tänapäeval üks kõige energiamahukam taastuvenergiaallikas, sest selle kontsentreering võrreldes päikese ja tuulega on mõõtühiku kohta suurem, kuna vedelik on parem koht kineetilise energia salvestamiseks. Merelainete energia on liikuva veehulga (veehulga massi) energia ärakasutamine. Seetõttu on laineenergia seotud väga madala saastetasemega ja nullilähedase süsinikdioksiidi vabanemisega ning kõrvalmõjud (nt laeva navigatsiooniteede ümberpaigutamine või elusolendite elukeskkonna muutmine) on väikese mõjuga. Samas peab silmas pidama, et praegu olemasolevad laineenergia muundurite tehnoloogilised printsiibid on enamasti seotud mere rannikutega, kus neid on lihtsam paigaldada. [11] Ja kuigi teatavad laineenergia kogused jõuavad rannikuteni välja, pole need kohad eriti energia poolest rikkad. Energia saagikuse poolest produktiivsed ja ranniku lähedal asuvad kohad katavad vaid 2% kogu ookeani rannajoonest ja võivad anda kuni 480 GW võimsust või 4200 TWh aastas elektritoodangut. [12]

Läänemere lainekliima on keskmiselt suhteliselt malbe. Pikaajaline oluline lainekõrgus (HS) küündib avamere Läänemere piirkonnas 1 m tasemeni. Oluline lainekõrgus Gotlandi ja Rootsi mandri vahel ning Botnia lahes on mõnevõrra väiksem. Lainekliima on veelgi leebem - HS on hinnanguliselt 0,6–0,8 m poolvarjulistes alamvesikondades, nagu Soome laht, Liivi laht või Arkona vesikond. [13] [14]

Läänemere lainetes olev energiaressurss ei oma ainult asukohast sõltuvat ja hooajalist varieeruvust, vaid ka äärmiselt kõrget ajalist muutlikkust: hinnanguliselt 30% aastasest energiavoost saabub mõne päeva jooksul. Laineenergiaressursside varieeruvus nõuab uusi tehnoloogiaid laineenergia muundamiseks, mis püsiks äärmiselt tormilistes oludes, suudaks toime tulla jää tingimustes ja oleks võimeline energiat genereerima ka suhteliselt väikese energia potentsiaaliga lainete korral. [15]

Tänu erinevate faktoritele on Läänemeres piiratud laineenergiaressursid, mis on tingitud eelkõige madalast vee sügavusest Läänemeres võrreldes ookeanidega (keskmise 50m , kõige sügavam koht

453m) [13]. Vaatamata sellele võivad mõned piirkonnad olla siiski sobivad laineenergia kasutamiseks. Kovaleva et al. (2017) on analüüsidest tõestanud, et Läänemeres leidub mitu kohta, kus lainekliima on soodne selleks, et merelainetust kasutada elektri genereerimiseks. Läänemere rannikutel laineenergia voog ulatub tasemeni 1,79 kW/m Sambia (*Samland*) poolsaare rannikul ja 1,61 kW/m Soome kirdeosa valitud osades. Need tasemed pakuvad kohaliku laineenergia kasutamiseks sobivaid võimalusi. [15]

Töö autori bakalaureuse diplomitöös läbiviidud uuringu alusel on mugavaim koht merelainetuse elektri muundamise muunduri paigaldamiseks Eesti territoriaalmeres Saaremaa ja Hiiumaa saarte vahel asuv veeala. (vt. ka Joonis 1.1) Selle asukoha eelisteks on ankurdamist lubav sügavus, meri ei jäätu selles piirkonnas täielikult, meresõidukite liikumisteed ja looduskaitse all olevad territooriumid puuduvad. Arvestades eelpool toodud Läänemere tingimusi, valiti merelaineenergia muundamise printsiip ja juhtimistehnoloogia. Energia muundamise printsiibiks on nn energia merepinna pealt korjamise tehnoloogia („*Point Absorber*“ - *ing k*). [11]



Joonis 1.1 Sobiv ala muundurite installeerimiseks. [11]

1.2 Merelaineenergia elektri muundava muunduri loomise olulised faktorid

Selles peatükis vaadeldakse faktoreid, mis mõjutavad merelaineteenergia elektri muundava muunduri (*WEC -Wave energy converter - ing. k.*) loomist.

1. Optimism

Uue energiatootmise seadme arendamisega kaasneb tavaliselt väide, et see suudab lahendada kõik maailma või riigi energiaprobleemid. Arendaja strateegiaks on tavaliselt nõuda, et seade oleks suurepärane energiamuundur, odav konstrueerida, piisavalt vastupidav, et ellu jääda kõige tormides ja et seade püüaks anda kogu aeg konstantse energiavoo. Selleks et üleliigne optimism ei takistaks arendust, on vajalik põhjalikult kaardistada arendamisetapid.

2. Arendamise etapid

Enne WEC väljatöötamist, selle arendamise etapid peavad olema selgelt ja arusaadavalt kirja pandud. Nagu teistes arendamissuundades, merelainetusenergeetika harus on olemas institutsioonid, kes tegelevad merelainetus muundurite valideerimisega. Üks nendest on EMEC. Euroopa Mereenergia Keskuse (EMEC) järgi on tehnoloogia valmiduse tasandid (TRL – technology readiness level- *ing. k.*) järgmised [16]:

1. Jälgitud ja kirjeldatud põhiprintsiibid;
2. Tehnoloogia kontseptsioon ja / või rakendus;
3. Analüütiline ja eksperimentaalne kriitiline funktsioon ja / või kontseptsiooni iseloomulik tõend;
4. Komponendi ja / või osalise süsteemi valideerimine laborikeskkonnas;
5. Komponendi ja / või osalise süsteemi valideerimine reaaloludes lähedasel keskkonnas;
6. Süsteemi / allsüsteemi mudeli valideerimine reaaloludes;
7. Süsteemi prototüübi demonstreerimine töökeskkonnas;
8. Tegelik süsteem on lõpetatud ja teenus kvalifitseeritud testimise ja tutvustamise teel;
9. Tegelik süsteem, mis on tõestatud eduka missiooni toimimise kaudu.

Tehnoloogiavalmiduse tasandid jaotuvad 3 osaks. Esimene on rakenduslik uuring (TRL 1-4), teine tehnoloogia valideerimine (TRL 5-6) ja kolmas on süsteemi valideerimine (TRL 7-9). [16]

3. Levinud vead

Tuginedes WEC seadmete loojate kogemustele on olemas kolm probleemi, mis takistavad kohese edu ja mööda kaardistatud teekonna liikumist, ja mida peab iga merelainetusmuunduri arendamise juures silmas pidama. Esimeseks oluliseks faktoriks on, et seadme teoreetiline mudel ja praktiline mudel ei lähe tavaliselt kokku. Tekkib vajadus proovida läbi mõlemad. Füüsilise prototüüpi käsitledes tavaliselt selgub, et 1 seade vs 10 seadet koos käituvad keskkonnas erinevalt, kuna seadmete arvu suurendamisel tuleb arvestada ka seadmete vastastikuse mõjuga. Kolmandaks oluliseks faktoriks, millega arendamisel peab arvestama, on lainete esinemise statistika ja asukoha ilmastik, mida peab arvestama seadme projekteerimisel. [17]

4. Keskkonna olulisus

Olulisemaks faktoriks iga seadme loomisel on keskkond, kus seade hakkab funktsioneerima. WEC'i jaoks on niisuguseks keskkonnaks antud töös Läänemeri. Meri on ohtlik seadmele korrosiooni ja vee füüsiliste löökide tõttu.

Läänemeres, keskkonna vähesoolasuse tõttu, üks m^3 vett kaalub 1000-1020 kg. Keskmine, 50 sentimeetrilise pikkusega laine avameres, kõrgusega 1 meeter, sisaldab umbes 0.5 tonni vett. Vee kaalu võimalikku mõju seadme konstruktsioonile peab hindama enne seadme vette laskmist ja vastavalt sellele hinnata muunduri vastupidavust. [13]

Korrosioon meres on tavaliselt tingitud mitmete faktorite poolt. Merevesi on suurepärane elektrolüüt. Merevesi on pinnakihis hapnikurikas (umbes $8 \text{ mg O}_2/\text{l}$) ja sellel on suhteliselt kõrge elektrijuhtivus (võib ulatuda $3 \cdot 10^{-2} \text{ oomi}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). Keskkond on neutraalne ($\text{pH} = 7,2-8,6$). Merevees leidub kaltsiumi, kaaliumi, magneesiumi, naatriumsulfaate, kloriide. Lahustunud kloriidide sisalduse tõttu merevees (Cl^- ioonid), on viimasel metalli pinna suhtes korrodeeruv mõju (see hävitab ja takistab passiivsete kaitsekilede teket metallpinnal). Üldiselt on meres paiknevate metallkonstruktsioonide korrosiooni kiirustavaks faktoriks vee soolsus. Vee soolsus varieerub meres 7 g/kg (Läänemeres) kuni 35,6 g/kg (Vaikses ookeanis). [18]

WEC'i materjalide valimisel ja disaini loomisel, peab määrama vee koostise ja asukoha kliima peamised mõjud seadmele, kuna sellest sõltub üldine seadme kasumlikkus ja eluiga. Seoses sellega, peab kontrollima seadme materjalide sobivust konkreetse keskkonna tingimustega.

1.3 Seadme keskkonnapõhine disain

Seadme jaoks on Läänemeres oluline, et konstruktsioon peab olema võimeline üle elama torme, mida esineb Eesti territoriaalvetes sageli. [13] Et võimalikult maksimaalselt kõrvaldada kaootilise ja ennustamata avamere lainetuse mõju järel dati muunduri disainimisel, et muundur (WEC) peab eelkõige olema arendatud sadamate jaoks. Sadamates on olemas pidev seadmete järelevalve, mis tagab pideva kontrolli ja asjakohase hoolduse. Samuti lihtsustab see lainetusmuunduri uurimist esimestes arendussammudes.

Läänemeres on madalam ja kergem laine, võrreldes ookeani lainetega, mis tuleneb sellest, et Läänemeres esinev sügavus, soolsus ja tuul on väiksem võrreldes ookeaniga. See annab võimaluse kaitsta seadet ja teeb projekti tavaliselt majanduslikult efektiivsemaks, võrreldes sellega kui merelainete muunduri arendamine toimuks ookeanitaolise veekogu jaoks. Teisest küljest Läänemeri jäätub, mis takistab tavapärasel tingimustel elektri genereerimist talvisel ajal. Jäätumine teeb WEC osade liikumise ja raskendab energia ülekandmiste generaatorilt. Maksimaalne jäätuvus on Läänemeres aastate lõikes olnud keskmiselt 45%. [19]

Seega seade peab olema võimeline funktsioneerima talvistes jäistes tingimustes. Seadme arendamise käigus külastati perioodil detsembrist- veebruarini, aastatel 2016-2018 Läänemere sadamaid (vt. ka Joonis 1.2). Vaatluse käigus selgus, et kõige ohtlikumaks on väikeste jäätükkidega vee segu, kus vesi jäätub liikuvatele detailidele. Seda probleemi on võimalik lahendada, kui osa genereeritud elektrist suunata seadme kere soojendamiseks või paigaldada ümber seadme töötsooni jäätõke . Alternatiiv on talveks seade veest välja tõsta. Siiski võib kergendavaks asjaoluks lugeda seda, et Läänemeri pole viimased 10 aastad kinni jäätunud. [20]



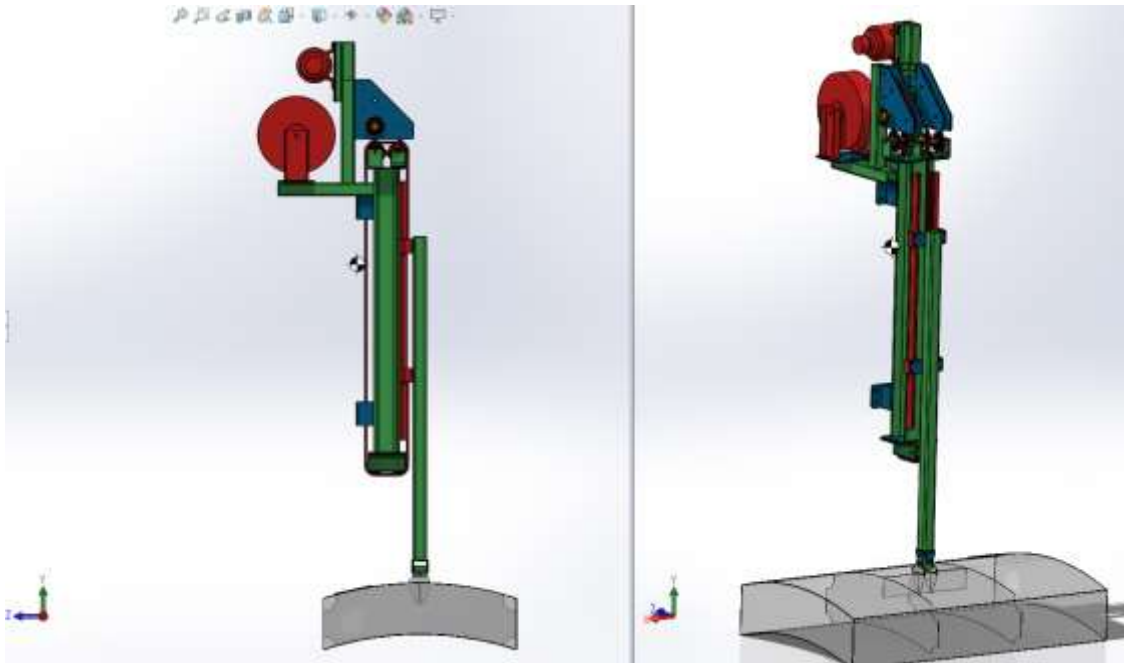
Joonis 1.2 Sadamate külustus. Jaanuar 2018

Seadme disaini loomisel liigitati materjalid ja komponendid kaheks.

Esimene grupp on need materjalid, mis ei pea otseselt veega kontakteeruma. Nendeks on peamiselt seadme liikuvad osad, mis on peidus vastavate kaitsete all, mis ei lase vett ja liikuvaid osasid omavahel kontakti. Samuti kuuluvad siia need materjalid, mida kasutatakse nende osade valmistamiseks, mis on ilmastikule avatud. Need on materjalid, mis on loodud selleks, et vastu pidada niiskes keskkonnas. Tavalise terase kasutamisel tuleb selle pind eelnevalt taadelda ja katta vastava pinnakattega. Elektrikomponente käsitledes, vastavalt seadmeosa olulisusele, kasutati vastava IP klassiga seadmeosi vee eest kaitsmiseks. [21]

Teine grupp on materjalid (peamiselt ujuk ja tema kinnitused), mis on mõeldud olema veega pidevas kokkupuutes. Nendeks on alumiiniumist tehtud detailid. Prototüübi ujuki peamaterjalina kasutati alumiiniumimarkeeringuga AW5754. Materjal valiti tuginedes konsultantsioonile laevaehitusettevõttega BLRT grupp: Merkatex Marine. See materjaligrupp on ettevõtte sõnul ennast hästi tõestanud laevakerede katmisel Läänemeres, ja seda kasutatakse laevade ehitamisel.

Lähtudes eelmistes peatükkides kirjeldatud infost, koostati seadme disain, mis oleks vastupidav Läänemere tingimustele (vt. ka Joonis 1.3).



Joonis 1.3 Merelainetusmuunduri disain

Generaatori valikul lähtuti olemasolevatest taastuenergeetikas kasutatavate pöörlevate generaatorite valikust ja omapäradest. Paljud merelainete muundurite arendajad kasutavad lineaarseid generaatoreid. [22]

Kuigi see lihtsustab süsteemi (vähem liikuvaid osi), teeb lineaarse generaatori olemasolu süsteemi esiteks kalliks, kuna lineaarseid generaatoreid tavaliselt valmistatakse tükkide kaupa ja konkreetse olukorra jaoks, st masstoodang puudub. Teiseks on lineaarse generaatori oluline puudus üles-alla liikudes null punktide olemasolu, kus generaatori magnetväljad peatuvad enne tagasiliikumist. Pöördliikumisel põhinevad generaatorid on paremini sobilikumad, sest nad on osaliselt paigaldatud jäigalt sadamakai või muu infrastruktuuri osa juurde ja seega generaatori pöörlemist ei takista midagi. Teiseks on nende tööd rohkem uuritud ja neid kasutatakse laialdaselt tuulest elektri genereerimisel. Kuna merelainetus osaliselt tuleneb tuulemasside liikumisest, kattuvad osaliselt ka tuule ja merelainetuse aktiivsuse profiilid. Sellepärast on tuuleenergiamuunduritele sobilik madalapöördeline (u 69 rpm) generaator sobilik ka merelainetuse muundamiseks.

Tänu avamere lainetuse kaootilise ja ennustamata iseloomule, toimuksid generaatori pöörlemises järsud muutused, kui generaatori pöörlemine on otsese sõltuvuses lainetusest. e. Selline lahendus ei

ole soovitatav, kuna alandab generaatori eluiga. Sellest tulenevalt on vajadus kasutada vahelüli – inertshooratas. Hooratas tasakaalustab generaatori pöörlemist, teeb pöörlemise rohkem sujuvamaks ja konstantsemaks. Samuti kaitseb hooratas süsteemi järskudest süsteemi muutustest (jõumomentidest) ehk löökidest, mis tekivad lainetuse järsul muutusel. Seda esineb tihti sadamates, kui laev väljub sadamast (kiirendab) või vastupidi ankurdab kai juurde. Laeva liikumise tulemusena sadamas, tekib lainete kõrguse järsk muutus. Käesolevas töös kirjeldatud esimese prototüübi puhul otsustati kasutada hooratast, mille mass on 40 kg. Ujuki veeväljasurve on 140 kg. Selleks, et suurendada survet vastu vee pinna, on ballasti mass 20 kg.

2. MERELAINETEMUUNDURI TESTIMINE KATSEBASSEINIS

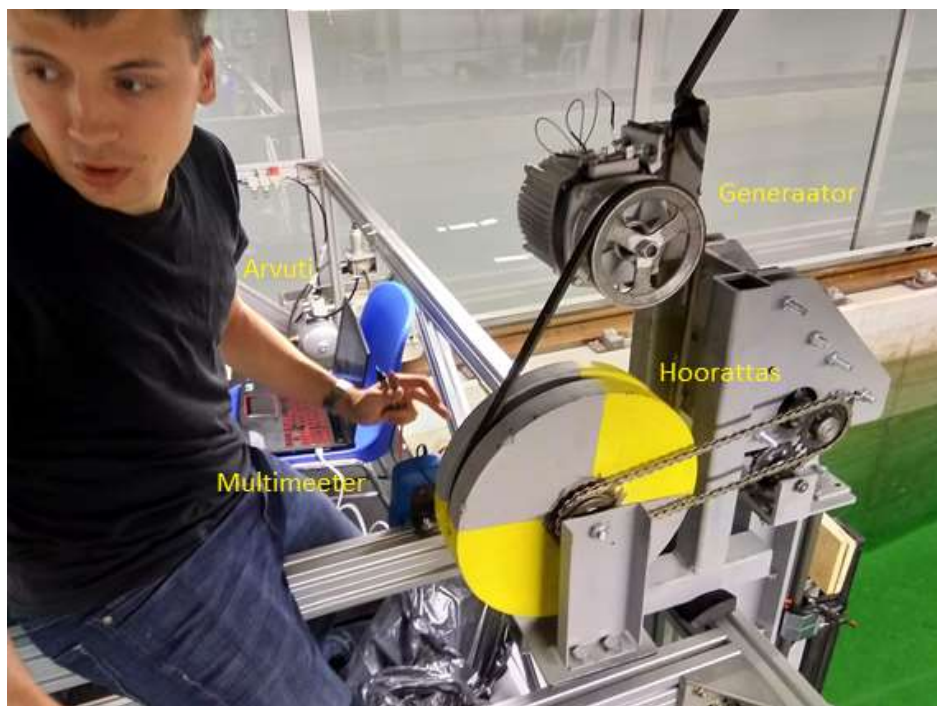
Merelaineenergiamuunduri katsetamine toimus 06.05.2019. Katsetuse eesmärgiks oli mõõta laineenergigeneraatori elektrilisi parameetreid erinevate lainepikkuste ja generaatori mehhaaniliste ülekannete juures. Selgitada välja antud elektrigeneraatori (WindZilla 12VDC, PEM) sobivus laineenergia rakendusse ja leida optimaalsed parameetrid süsteemi energiavoo maksimeerimiseks. Eesmärke oli kaks. Esmalt selgitada välja antud elektrigeneraatori sobivus laineenergia rakendusse. Teiseks leida kõige sobivam tasakaal ballasti, hooratta ja mehhaanilise ülekande vahel, mis tagaks maksimaalse väljundvõimsuse. Enne seda toimus seadme mehhaanilise toimimise määramine ja disaini optimeerimine katsete jaoks.

2.1 Seadme testimiseks ettevalmistamine

Esmane seadme vette laskmine toimus 27.09.2018. Esmase käivitamise eesmärgiks oli paigaldada süsteem katsetusbasseini ja korraldada esmane käivitamine ning valmistada koostatud disain katsetamiseks, eesmärgiga kontrollida, kas käsitletav seadme disain on sobilik soovitud keskkonnas töötamiseks. Määrata mehhaanilised puudujäägid ja kitsakohad, nt kontrollida lainetuse vibratsiooni mõju ülekannetele. Vaadata elektrigeneraatori (WindZilla 12VDC, PEM) tööd 2-3 lainekõrguse juures. Tõestada, et süsteem toimib, läbi väljundpinge väärtuse määramise ja selgitada välja arendamist vajavad aspektid. Süsteem koosneb generaatorist, kettülekannetest, ujukist, hoorattast ja ballastist (vt. Joonis 2.1). Lained panevad ujuki liikuma vertikaal-telje suunas. Vertikaalne liikumine muudetakse kettülekannete abil pöörlevaks liikumiseks (vt. Joonis 2.2), mis kantakse üle generaatori völli.



Joonis 2.1 Laineenergia generaatorsüsteem.



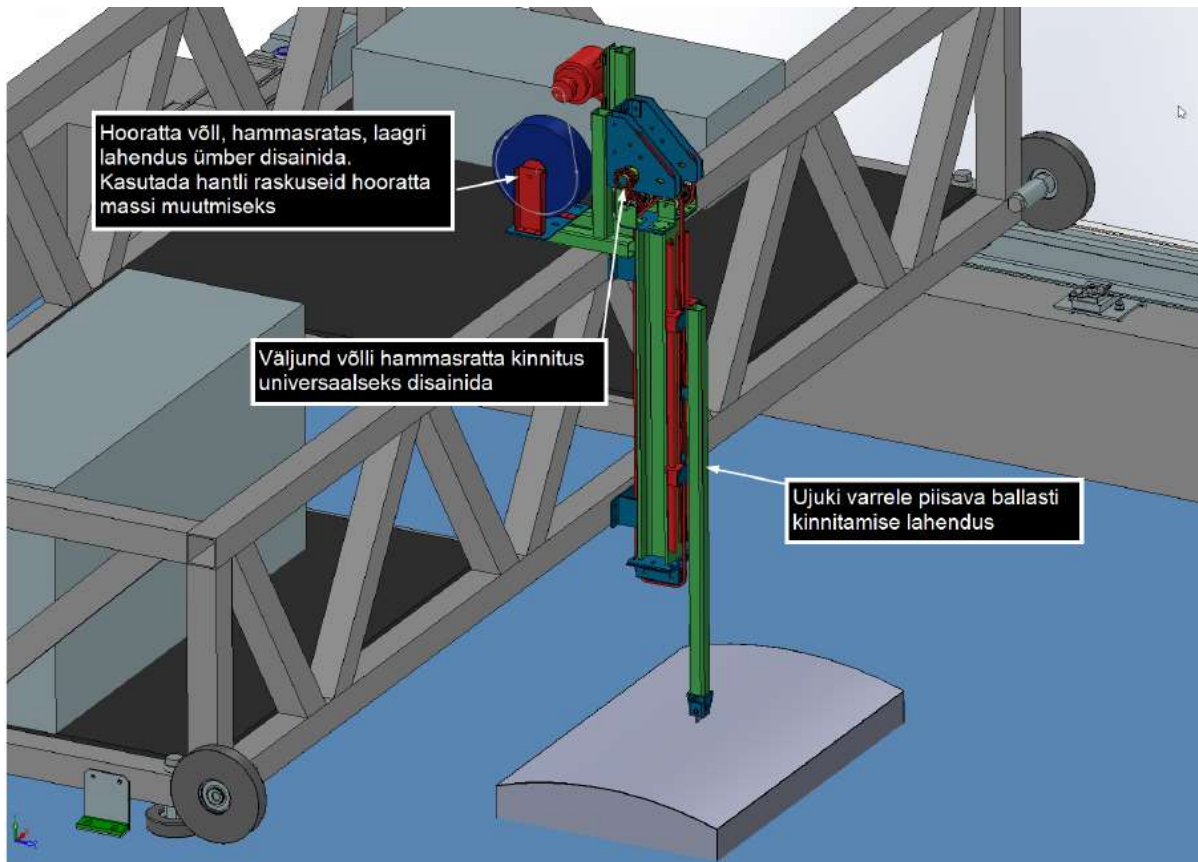
Joonis 2.2 Generaator ja mehhaanikaülekanded.

Mehhaanilist toimivus määrati kasutades voltmeetrit ja määrates generaatori pinget, vt. ka Joonis 2.2. Mõõtmised toimusid erinevate lainerežiimide juures. Seadmel puudus juhtimissüsteem, mis laseks seadistada merelainetusmuundurit vastavalt keskkonnarežiimidele. Seetõttu muutus väljundpinge väärtus sõltuvalt rakendatud lainele, mis samas tõestas seadme toimivust.

2.2 Süsteemi parendamine

Merelainegeneraatorsüsteem töötas ja süsteemi ühendatud voltmeeter näitas väljundpinget. Süsteem oli mehhaaniliselt töökorras. Seadet ei olnud katsetustel võimalik seadistada vastavalt mereoludele. Seetõttu ei olnud katseliselt võimalik määrata, et missugune oleks tulemus avamere keskkonnas. Selleks, et katsestendi abil paremini mõõta seadme elektrilisi parameetreid ja hinnata käitumist avamere tingimustes, viidi sisse mehhaanilised muudatused.

Seadme katsetamise käigus tekkisid 3 ettepanekut, kuidas oleks võimalik parandada seadme vastavust mereoludele. Need muudatused on välja toodud Joonis 2.3 peal.



Joonis 2.3 Seadme vajalikud muudatused.

Põhitulemuseks oli vajalike seadme disaini puudutavate täienduste kaardistamine. Tuvastati kolm kohta, mida on võimalik teha seadistavaks ja läbi selle mõjutada mehhaanilise süsteemi kasutegurit ja väljundpinget. Nendeks olid tark hooratas - tulevikus peab see suutma aru saada mereoludest ja muutma oma kaalu vastavalt merelainetuse parameetritele ja prognoosidele. Väljundvõlli, mis suudaks valida ülekannet nii, et lihtsustada momendi ülekandmist hoorattale. Tark ujukiballast, mis suurendades survet vastu veepinda, tasakaalustaks jõu ülekannet hoorattale, tasandaks üleliigsed ja järsud energiatõusud.

2.3 Katsestendi kirjeldus

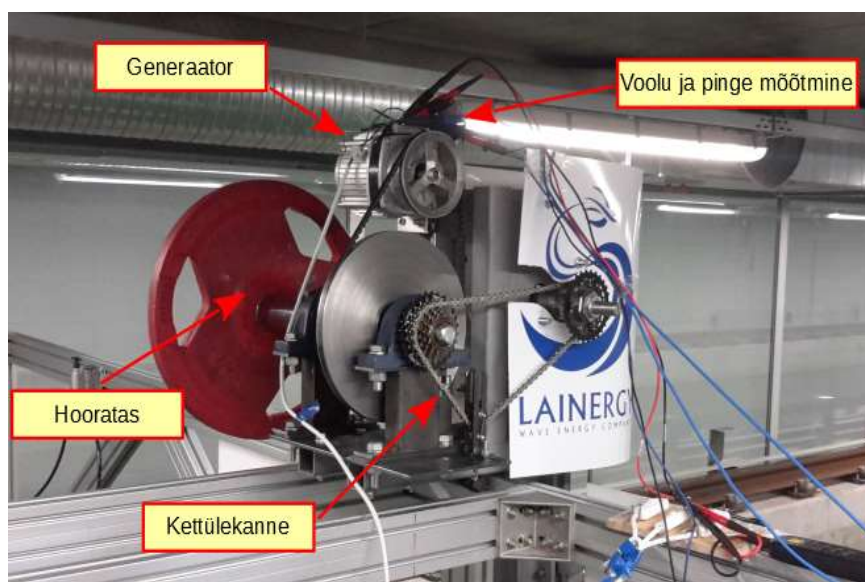
2.3.1 Mehhaaniline osa

Uuendatud süsteem koosneb generaatorist, kettülekannetest, ujukist, hoorattast ja ballastist (vt. Joonis 2.4). Nende komponentide kaalu on uue disaini korral võimaik muuta. Lained panevad ujuki

liikuma vertikaal-telje suunas. Vertikaalne liikumine muudetakse kettülekannete abil pöörlevaks liikumiseks, mis kantakse üle hooratta võllile. Hooratta võlli kiirust on võimalik muuta universaalse kettülekannde abil. Edasiliikumine edastatakse generaatori võllile (vt. ka Joonis 2.5).



Joonis 2.4. Laineenergia generaator-süsteem.



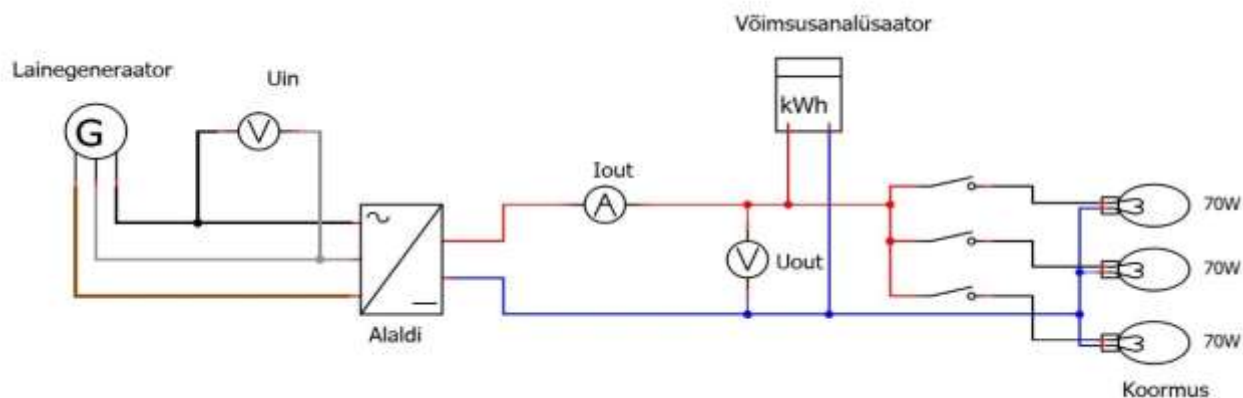
Joonis 2.5 Generaator ja mehhaanilised ülekannded

2.3.2 Elektriiosa

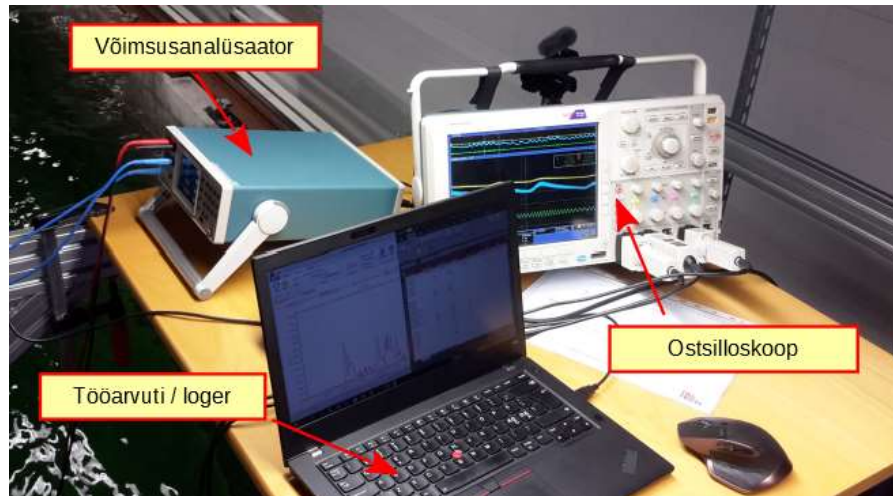
Testsüsteem on varustatud kolme-faasilise püsimagnet-generaatoriga vt. Joonis 2.6. Generaatori väljundisse on ühendatud kolme-faasiline alaldi, mis muudab vahelduvpinge alalispingeks. Alaldi väljundisse on paralleelselt ühendatud kolm 70 W halogeenlampi (230 VAC, 50 Hz) maksimaalse võimsusega 210 W. Testsüsteem varustati järgmiste mõõtepunktidega:

1. Alaldi sisendpinge (U_{in}), mis on ühtlasi generaatori väljundpinge;
2. Alaldi väljundpinge (U_{out});
3. Alaldi väljundvool (I_{out}).

Joonis 2.7 peal on näidatud katsetel kasutatud mõõteriistad. Voolude ja pingete kujusid mõõdeti ostsilloskoobiga Tektronix DPO7254 3.5 GHz. Andmete salvestamiseks ja väärtuste arvutamiseks kasutati võimsusanalüsaatorit Tektronix PA1000 (1 MHz bandwidth). Logeriks kasutati tööarvutit Thinkpad T480. Tööarvuti ühendati võimsusanalüsaatoriga kasutades spetsiaalset tarkvara PWRview. PWRview salvestas süsteemi kõik väljund parameetrid 1 sekundilise sammuga.



Joonis 2.6. Testsüsteemi elektriskeem.



Joonis 2.7. Katsetes kasutatud mõõteriistad.

2.3.3 Generaatori elektrilised parameetrid

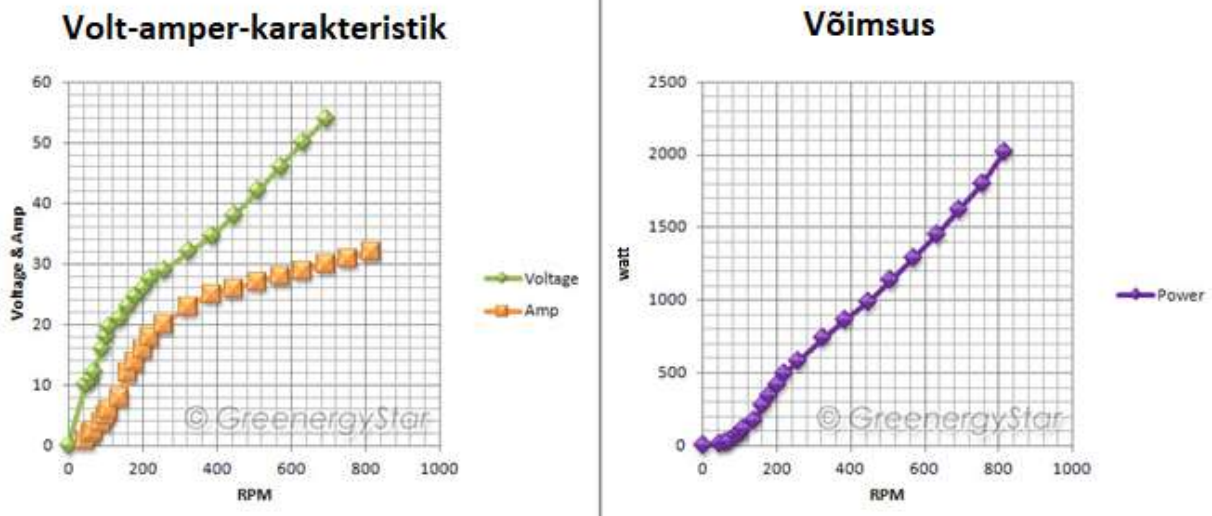
Elektrit genereerib kolme-faasiline püsomagnet-generaator (WindZilla 12 V DC Permanent Magnet Alternator Wind Turbine Generator), mis on eelkõige mõeldud tuulegeneraatorite jaoks. Püsomagnet-generaatori eelisteks alalisvoolugeneraatori ees on järgmised:

- pikem eluiga ja väiksem hooldusvajadus, kuna puuduvad mootoriharjad;
- suurem võimsustihedus;
- suurem kasutegur. [23]

Generaatori tehnilised parameetrid on toodud Tabel 2.1. Nimipinge on 12V, mis saavutatakse pööretega 50 min⁻¹. Generaatori tunnusgraafikud (Joonis 2.8) näitavad, et mootor suudab töötada pööretega kuni 800 min⁻¹. Samas, väga madalatel pööretel (< 50 min⁻¹) on võimsuse ja pöörete arvu suhe ebalineaarne.

Tabel 2.1. Generaatori WindZilla tehnilised andmed.

Pinge	3 faasi, 12 VAC
Püsomagnetid	Haruldased muldmetalli magnetid
Ülekandearv	1:6
Pööretearv 12V juures	50 min ⁻¹
Korpuse materjal	Alumiiniumi ja terase sulam
Rotor Diameter	12 cm
Pikkus	10 cm
Kaal	3.90 kg



Joonis 2.8. Püsimagnet-generaatori WindZilla 12 V tunnusraafikud. [24]

2.4 Metoodika

Laineenergiageneraatorit uuriti tsükliliselt mitmes erinevas seadistuses. Iga seadistus ja tsükel kestis 3 min. Testiti erinevaid laineprofiile, mehhaanilisi ülekandeid ja elektrilisi koormusi. Testide jooksul muudeti järgmisi parameetreid:

- Lainekõrgus 150mm, 200 mm, 250 mm;
- Lainesagedus 0.2...1 Hz;
- Ballastraskused 30 kg, 45 kg, 60 kg;
- Hooratta mass 25 kg, 40 kg;
- Elektriline koormus halogeenlambid (70 W) 1, 2 või 3 samaaegselt sees. Resulteeruv võimsus sõltub generaatori pingest.

Igas katses mõõdeti süsteemi elektrilised parameetrid ning salvestati kõige olulisemad voolude ja pingete kujud. Mõõdeti alaldi väljundvoolu, -pinge, -võimsuse ja reaktiivvõimsuse efektiivväärtused.

Enamus katseid tehti lainekõrgusega 150 mm. Lainekõrgust 200 mm kasutati ainult testsüsteemi häälestamiseks. Maksimumlainekõrgusega (250 mm) tehti üks katseseeria.

Esimese katsetsükliga selgitati välja kõige efektiivsemad lainesagedused. Testiti generaatori tööd sagedustel 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 Hz. Katsed näitasid, et 0.2 Hz on antud generaatori jaoks liiga madal

sagedus ja 1 Hz liiga kõrge sagedus. Seega koostati järgnev katseplaan lähtudes kolmest järgnevast sagedusest: 0.4, 0.6 ja 0.8 Hz. Igat sagedust testiti kahe hooratta korral ja kolme ballast raskuse juures.

Katsed tehti passiivse koormusega, milleks olid kolm 70 W, 230 V halogeenlampi. Lampe sai vastavalt vajadusele sisse/välja lülitada. Enamus katseid viidi siiski läbi ainult ühe lambiga. Erandiks olid katsed maksimaalse lainekõrguse juures (250 mm), kus tuli sisse lülitada kõik kolm lampi, et takistada ujuki liiga hoogsat vertikaalset liikumist.

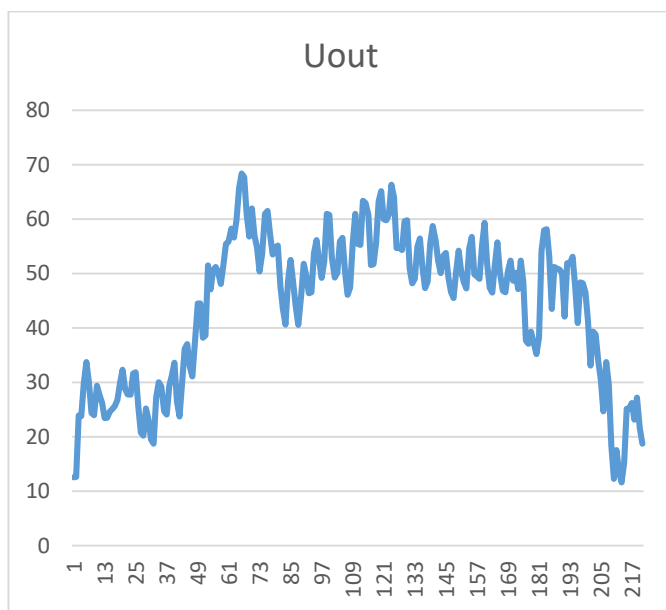
Antud katsetes generaatori pöörete arvu otseselt ei mõõdetud. Puuduvad ka täpsed generaatori andmed, et seda generaatori väljundpinge sageduse järgi arvutada. Seega hinnati pöördevahemiku kaudselt lähtuvalt generaatori pinge efektiivväärtusest ja generaatori tunnusgraafikust.

2.5 Katsetulemused ja analüüs

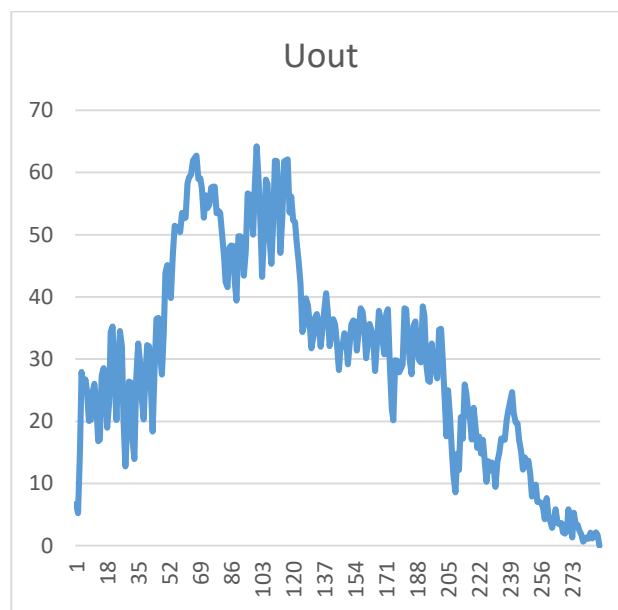
Põhilised katsetulemused on toodud Tabel 2.2. Sooritati 6 katsetsükli. Iga tsükkel koosnes 2-3 mõõtmisest erineva lainesagedusega. Tsüklid erinevad üksteisest põhiliselt hooratta ja kasutatud ballastraskuse poolest. Maksimaalne väljundpinge 164 V saavutati tsükli 5, milles testiti süsteemi suurima lainekõrgusega 250 mm. Seega on tulemus igati põhjendatud. Väiksema lainekõrguse (150 mm) korral saavutati maksimaalne väljundpinge 72 V tsükli 4 (vt. Tabel 2.2). Samas ei tähenda see seda, et antud tsükli oli teistest parem hoorattamassi ja ballasti suhe. Väga sarnane pingeprofiil saavutati ka tsükli 1 ja 2 (vt. Joonis 2.9 - *a* ja *b*), kus maksimaalne väljundpinge ulatus 68 voldini. Väikest erinevust võib aga märgata kolmandas katsetsükli (vt. Joonis 2.9 - *c*), kus pinge keskmine väärtus on oluliselt madalam kui tsükkel 2 või 4 korral. Põhiliseks erinevuseks on raskem hooratas (40 kg), mida kasutati ainult tsükli 3.

Tabel 2.2. Katsetulemused

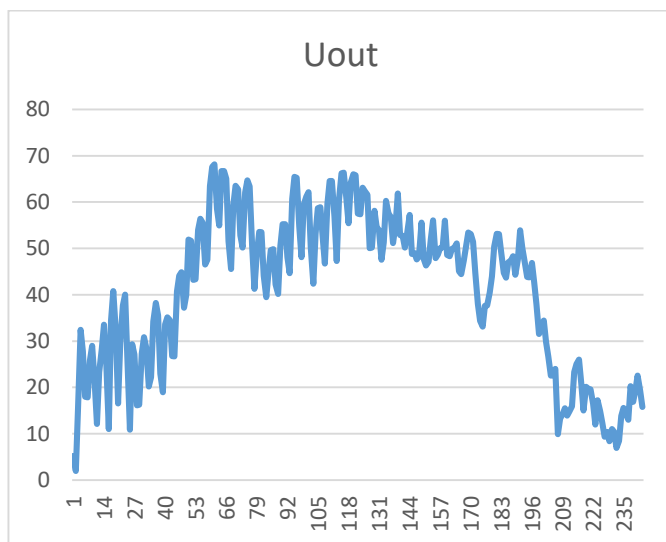
Laine kõrgus	laine sagedus	Ballast	Hooratas	U _{out} max	I _{out} max	P _{out} max	U _{in} sagedus	Koormus	Märkused
[mm]	[Hz]	[kg]	[kg]	[Vrms]	[Arms]	[W]	[Hz]	[W]	
TSÜKKEL 1									
150	0.8	30	25	27.8	0.1	3.1	50	70	
150	0.6	30	25	47.0	0.1	6.5	64	70	
150	0.4	30	25	68	0.2	11.1	125	70	
TSÜKKEL 2									
150	0.8	60	25	24.7	0.1	2.7	25	70	
150	0.6	60	25	35.9	0.1	4.4	55	70	
150	0.4	60	25	68.2	0.2	11.2	125	70	
TSÜKKEL 3									
150	0.8	45	40	22.1	0.1	2.2	31	70	
150	0.6	45	40	36.3	0.1	4.4	42	70	
150	0.4	45	40	64.2	0.5	24.8	25	210	
TSÜKKEL 4									
150	0.8	45	25	16.6	0.1	1.5	14	70	
150	0.6	45	25	48.0	0.1	6.7		70	
150	0.4	45	25	71.9	0.2	11.9	100	70	
TSÜKKEL 5									
250	0.6	45	25	163.9	0.7	91.7	200	210	
250	0.4	45	25	90.2	0.6	49.9	130	210	
TSÜKKEL 6									
250	0.1 - 0.6	45	25	46.9	0.1	6.4		70	Kaootiline



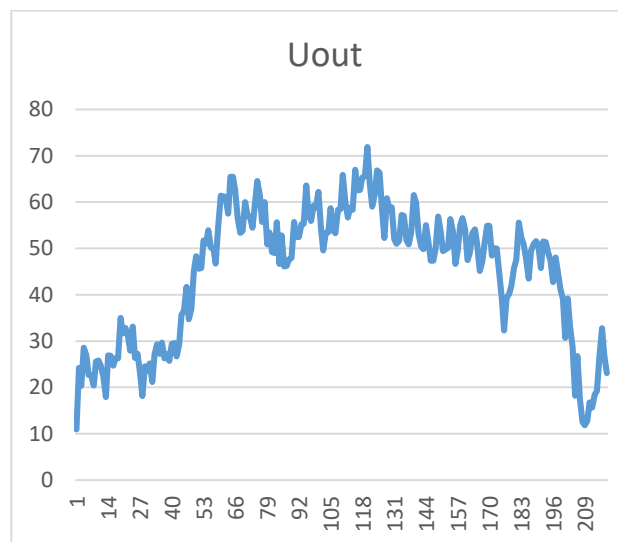
(a)



(c)



(b)



(d)

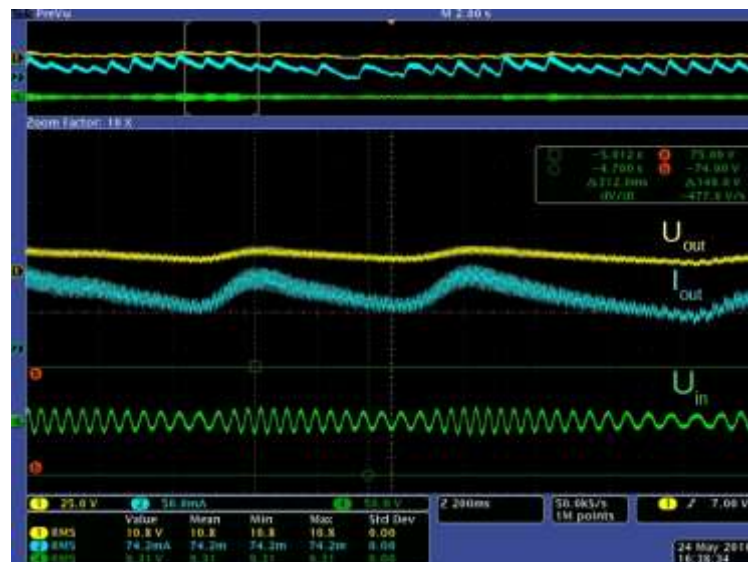
Joonis 2.9 Süsteemi väljundpinge graafikud testtsükli jooksul (lainekõrgus 0.4): tsükel 2(a), tsükel 3(b), tsükel 4(c), tsükel 5 (d)

Katsete käigus hinnati ka lainegeneraatori maksimumpöörete arvu. Generaatori väljundiks on siinuseline pinge, mille sagedus muutub lainete rütmis (vt. Joonis 2.10). Kuna pöörded ja generaatori väljundpinge sagedus on omavahel võrdelises sõltuvuses, siis piisab kui leida maksimaalse sageduse punkt. Selles punktis on ühtlasi ka pöörlemiskiirus suurim. Katsete põhjal oli

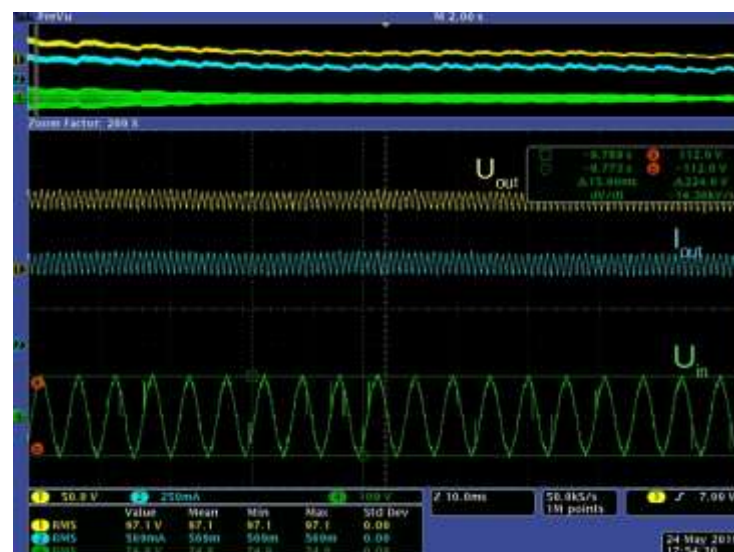
see suurim tsükkel 5 (laine kõrgus 0.6) korral.(vt. Tabel 2.2) Generaatoripinge amplituud on 100 V (vt. Joonis 2.11). Siinuspinge amplituudi väärtusest saab leida pinge efektiivväärtuse järgmise valemiga:

$$U_{eff} = \frac{U_{amp}}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

Kus U_{eff} on pinge efektiivväärtus ja U_{amp} on pinge amplituutväärtus. Antud juhul saame generaatoripinge efektiivväärtuseks 70 V. See pinge ületab generaatori lubatud pingevahemikku (vt. Joonis 2.8) rohkem kui 10 voldiga ja tähendab pöörete arvu lähedase arvule 1000 min^{-1} .



Joonis 2.10. Generaatori väljundpinge sagedus muutub lainete taktis.



Joonis 2.11. Alaldi sisend-väljund pinged ja vool maksimaalse sageduse punktis.

Generaatori tunnusjoonelt on näha, et maksimaalne lubatud pöörete arv on 800 min^{-1} . Võimsuse sõltuvus pöörete arvust muutub lineaarseks alates 200 min^{-1} . Seega sobiks antud generaator kõige paremini töötama pöörete vahemikus $200...800 \text{ min}^{-1}$. Antud katsetes saavutas generaator suurimaks pöörete arvuks 1000 min^{-1} (vastab generaatori pingele 70 Vrms), mis ületab lubatud maksimum 10 voldiga. Selliseid pingeid tuleks antud generaatori korral vältida lülitades sisse lisakoormuse.

Kuna kasutati koormusseadet, mis on mõeldud tööks kõrgematel pingetel kui generaator suutis välja anda, siis ei tekkinud väljundis ka vajalikku koormusvoolu. Selle tulemusena töötas generaator väga madalatel võimsustel ($P < 50 \text{ W}$), mille võib lugeda praktiliselt tühijooksuks e. koormuseta tööks. Pöörete arv ja koormus on oma vahel pöördvõrdelises sõltuvuses. Kui koormus kasvab, siis pöörded vähenevad. Kuna generaator töötas madalatel koormustel, ei saa ka hinnata, kui palju tema pöörete arv langeks koormatud olukorras, mistõttu ei ole hetkel võimalik täpselt hinnata generaatori sobivust antud rakendusse.

Hetkel kasutati katsetes passiivset koormust (kolm 70 W lampi). Kuna lambid olid mõeldud kõrgema pingele (230 VAC) jaoks, kui antud generaator välja suutis anda, siis töötaski generaator alakoormusega. Järgmistes katsetes on soovitatav ühendada väljundisse sobiva pingega koormus ja muundur, mis stabiliseeriks pinget. Nõnda saaks generaatorit koormata ühtlasemalt ja mõõta ka reaalselt energiahulka.

Alternatiiv oleks laineenergiaga laadida akut. Selleks tuleks süsteemi ühendada koormuseks sobiv aku ja pingeregulaator, mis reguleerib generaatori pinget akule sobivaks. Aku laadimine võimaldaks hinnata reaalselt võimsust ja energiat, mida antud seade lainetest kätte saaks.

Püsimagnet-generaatori maksimum-võimsuspunkt sõltub pöörete arvust ja koormuse suurusel. Kuna laineenergia korral kõigub nii generaatori pöörete arv kui ka koormus suurtes piirides, siis tuleks kaaluda maksimum-võimsuspunkti järgiva kontrolleri (MPPT kontrolleri) lisamist süsteemi väljundisse. Maksimumvõimsuspunkti järgimine võib muuta süsteemi energeetiliselt oluliselt tõhusamaks.

Lainegeneraator töötas kõige paremini lainekõrgusel 250 mm kus saavutati maksimaalne väljundpinge 164 Vrms . Tulemused näitasid, et süsteemi väljundpinge kõigub tugevalt vahemikus $15...164 \text{ Vrms}$. Koormuseks oli valitud 70 W halogeenlambid, mis olid liiga suure takistusega ja ei suutnud generaatorit piisavalt koormata. Seega töötas generaator liialt madalal ja ebaühtlasel koormusel, mistõttu oli väljundvõimsus piiratud. Süsteem tuleks varustada pinget stabiliseeriva

väljundmuunduriga, misjärel on täpsemalt võimalik hinnata energeetilist potentsiaali ja antud generaatori sobivust sellesse rakendusse. Seega said kaardistatud seadme arendamise järgmised sammud ja Kuressaare väikelaevade kompetentsikeskuse abil esimest korda Eestis läbiviidud merelainete energia füüsiline ülekandmine tarbijale (lampidele). Käesolevad testid on olulised merelainetusest elektri genereerimise aspektide mõistmise jaoks.

Kuna katsete põhjal saadud tulemused ei võimalda prognoosida praegu veel seadme tootlikust avamerel, vaadeldakse töös lihtsustatud matemaatilist mudelit, mis seob seadme tootlikkuse ja merelainetuse energiaressurssi sõltuvust konkreetse asukohaga ja annab võimaluse analüüsida merelainetuse muunduri ja teise taastuva energia allika sünergia. Järgnevalt vaadeldakse seadme jaoks avamere mudelit, arvestades laboritingimustes tehtud katsete tulemusi, ja väikesaare autonoomset elektritootmise võrku, mis pole ühendatud ei jaotus- ega põhivõrguga.

3. MERELAINETUS MUUNDURI MODELLEERIMINE.

Käesoleva lõputöö raames vaadeldakse võimalust merelainetus kineetilise energia elektriiks muundamise kasutatava muunduri kasutamist koostöös Viirelaiu päikeseelektrijaamaga. Esialgne seadme testimine Kuressaares ei andud võimaluse analüüsida seadme tootlikkust, kuna nõudis parandusi süsteemis, mis toimub järgmistes arendusetappides ja väljaspool käesoleva töö piire. Selleks, et ikkagi saaks hinnata merelainetusmuunduri tootlikust, tehti koostööd TalTech Meresüsteemide instituudiga. Meresüsteemide instituut edastas kogutud Läänemere merelainete kõrguste ja lainete perioodide puudutava statistika, mis võimaldas simuleerida merelainetusmuunduri lihtsustatud mudeli maksimaalselt reaalloludesse lähedases matemaatilises keskkonnas.

3.1 Modelleerimiseks kasutatud seadme ülevaade.

Selleks, et visualiseerida matemaatilist mudelit, oli testides käsitletud seade paigutatud ujuva aluse peale ja modelleeritud ümber avamerel kasutamise jaoks. (vaata Joonis 3.1) Käesolev operatsioon toimus joonistamis programmis ja omab illustratiivset põhimõtet.



Joonis 3.1 Seadme disain mudeli jaoks

Seade koosneb kahest eraldi ujuvast kehast. Suurem ujuv kere on põhimõtteliselt mootorita laev, mida saab pukseerida ja vajalikesse kohtadesse viia. Asukohas on see sildunud jäigalt kolme erineva ankruga merepõhja ja meie mudelis eeldatakse, et lained seda ei mõjuta. Suurema ujuva keha ees olev väiksem ujuv keha (silinder) on see osa, mis ammutab laineenergiat. Väiksem ujuv kere liigub lainete tõttu vertikaalselt üles ja alla. Üles- ja alla liikumisest tulenev saadaolev kineetiline ja potentsiaalne energia muundatakse elektriiks.

Väiksem ujuv keha on modelleeritud kui vertikaalne silinder, mille parameetrid on toodud all olevas tabelis, vt Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Silindri parameetrid

Raadius [m]	3.5
Silindri kõrgus [m]	2
Silindri veesistumise sügavus* [m]	1
Kogu mass (keha + ballast) [kg]	39400
omavõnke sagedus [rad/s]	1.7

* vertikaal kaugus veeliini ja silindri põhja vahel

Lisaks Tabel 3.1-s nimetatud parameetritele iseloomustavad silindrit ka hüdrodünaamilised parameetrid, mida nimetatakse hüdrodünaamiliseks sumbuvusteguriks ja lisatud massiks. (vt. lisad lk 75) Lõpuks iseloomustab lainete muunduri energia muundamiskoha, milleks on tavaliselt elektri generaator, mehaaniline sumbuvustegur, mida süsteemi kasutaja saab reguleerida. Seega modelleerimisel eeldatakse, et iga laine kõrguse ja perioodi kohaselt on seadistatud, maksimaalse energiakoguse saamise eesmärgil, mehaanilise sumbuvusteguri optimaalne väärtus. (vt. lisad lk. 84) Seda arvesse võttes eeldatakse, et käesolev lainemuundur suudab tuvastada iga mereolukorra, kus ta töötab, ning arvutada välja ja rakendada oma generaatori optimaalse mehaanilise sumbuvusteguri väärtuse.

3.2 Modelleerimiseks kasutatud asukoha ülevaade

WEC'i modelleerimiseks kindla asukoha jaoks on vaja teada selles asukohas esinevaid mereolusid. Mudelis mereolusid iseloomustavad oluline lainekõrgus (H_s) ja tipplainetuse periood (T_p). Nende leidmiseks kasutatakse modelleerimisel JONSWAP lainespektrit (Vt. lk 69). Oluline lainekõrgus on defineeritud ühe kolmandiku kõrgeimate lainete keskmise lainekõrgusena. Tipplainetuse

laineperiood on kõige suurema lainespektri osa periood. WEC'i keskmist energiavõimsust analüüsitakse järgmise asukoha jaoks, mille kohta on saadud andmeid ühe aasta jooksul ilmnenud mereolude kohta vt. ka Joonis 3.2:



Joonis 3.2 Asukoht mille andmete alusel toimub modelleerimine

Selle Läänemere osa eelised olid vaadeldud töö autori bakalaureuse töös. [11]

3.3 Väljundvõimsuse analüüs

3.3.1 Eeldused ja mudeli piirangud

Seadme väljundvõimsuse analüüsimiseks kasutati matemaatilist mudelit. Mudeli sisendina kasutatud hüdrodünaamilised parameetrid põhinevad lineaarsel lainete teoorial ja neid arvutatakse analüütiliste avaldiste abil. Lineaarlainete teooria, mida nimetatakse ka väikese amplituudiga lainete teooriaks, eeldab et laine kõrgus on palju väiksem kui lainepikkus ja veesügavus.

Samuti mudelis eeldatakse, et:

- Väiksem ujuv keha, mida lained liigutavad, on modelleeritud lihtsa vertikaalse silindrina, millel on üks vabadusaste - vertikaalne liikumine üles ja alla;
- Silindri läbimõõt on palju väiksem kui meres esinevad lainepikkused. Sellest eeldusest tulenevalt on rõhu jaotus silindri põhjas ühtlane;
- Lained ei mõjuta suuremat ujuvat keha, mis on ankrute abil merepõhja kinnitatud. Suurem ujuv keha on kui vundament, mille peale on paigaldatud merelainemuundur;

- Lained lähenevad merelainete muundurile suunast, mida suurem ujuv keha ei mõjuta (st lained ei lähene WEC-ile tagantpoolt);

- WEC suudab tuvastada iga mereseisundi (eelkõige lainetuse suurust), milles ta töötab, ja rakendada selle mereolukorra jaoks optimaalset mehaanilist sumbuvesteguri (vt lk. 84).

Mudeli väljatöötamisel kasutatakse tarkvara Matlab – mis kujutab endast arvutuskeskkonda ja programmeerimise keelt [25].

3.3.2 Keskmise väljundvõimsus erinevate mereseisundite vältel

Selles peatükis on toodud tulemused aasta jooksul esinenud mereolude keskmise väljundvõimsuste kohta, eespool nimetatud asukohas. Lisaks näidatakse mõne mereoleku korral väljundvõimsust ajafunktsioonina, et analüüsida nn väljundvõimsuse piike (seda saab kasutada generaatori suuruse määramiseks) (Vt. lk. 69 ja lk. 75).

Esialgu määratakse võimalik kättesaadav energia asukohal, iga mereoleku kohta, vt. Tabel 3.2. See on WECile kättesaadav energia hulk, mida saab muundata elektriks. (nõ primaarenergia).

Tabel 3.2 Kättesaadav võimsus [kW] muunduri jaoks iga mereoleku jaoks (st palju laine suutis tagada muunduri pikkuses energiat)

7.8	0	2	219	372	496	612	725	819	932	1044	1156	1268	1380	1493	1607	1722	1841	1964	2092	2226	2365	2511
7.3	0	1	191	325	434	535	635	717	815	913	1011	1110	1208	1306	1406	1507	1611	1719	1831	1948	2070	2198
6.8	0	1	166	282	376	464	550	622	707	792	877	962	1047	1132	1219	1307	1397	1490	1587	1688	1794	1905
6.3	0	1	142	242	322	398	472	533	606	679	752	825	898	971	1045	1120	1197	1277	1360	1447	1538	1633
5.8	0	1	120	205	273	337	399	451	513	575	636	698	760	822	884	948	1013	1081	1151	1225	1302	1382
5.3	0	1	100	171	228	281	333	376	428	479	530	582	633	685	737	790	845	901	960	1021	1086	1152
4.8	0	1	82	140	186	230	272	308	350	392	434	476	518	561	604	647	692	738	786	836	889	943
4.3	0	0	66	112	149	184	218	246	280	314	348	381	415	449	483	518	554	591	629	669	711	755
3.8	0	0	51	87	116	143	170	192	218	244	271	297	323	350	376	403	431	460	490	521	554	588
3.3	0	0	38	65	87	108	128	144	164	184	203	223	243	263	283	303	324	345	368	391	416	442
2.8	0	0	28	47	62	77	91	103	117	131	146	160	174	188	202	217	232	247	263	280	298	316
2.3	0	0	18	31	42	52	61	69	79	88	97	107	116	126	135	145	155	166	176	188	199	212
1.8	0	0	11	19	25	31	37	42	48	53	59	65	70	76	82	88	94	100	107	113	121	128
1.3	0	0	6	10	13	16	19	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	58	62	65
0.8	0	0	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20	21	22	24
0.3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3
Hs /Tp	0.3	0.9	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9	4.4	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0	8.6	9.2	9.8	10.4	11.0	11.6	12.2	12.8

Teiseks, keskmine väljundvõimsus iga mereoleku juures, vt. Tabel 3.3:

Tabel 3.3 Keskmine muunduri väljundvõimsus [kW] iga mereoleku jaoks (Palju muundur suutis võtta)

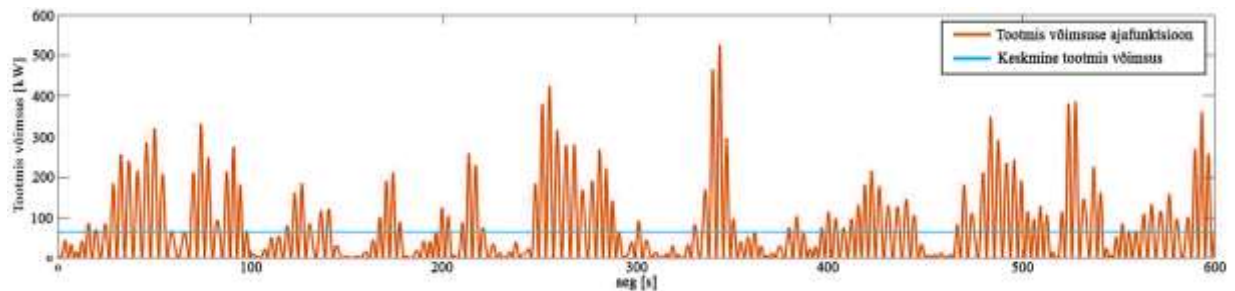
7.8	0	0	0	0	0	0	6	28	106	247	311	343	361	370	373	372	368	361	354	346	337	328
7.3	0	0	0	0	0	0	5	24	93	216	273	300	316	324	327	325	322	316	310	302	295	287
6.8	0	0	0	0	0	0	5	21	81	188	236	260	274	281	283	282	279	274	268	262	256	249
6.3	0	0	0	0	0	0	4	18	69	161	203	223	235	241	243	242	239	235	230	225	219	213
5.8	0	0	0	0	0	0	3	15	58	136	171	189	199	204	205	205	202	199	195	190	185	181
5.3	0	0	0	0	0	0	3	13	49	114	143	157	166	170	171	171	169	166	162	159	155	151
4.8	0	0	0	0	0	0	2	10	40	93	117	129	136	139	140	140	138	136	133	130	127	123
4.3	0	0	0	0	0	0	2	8	32	74	94	103	109	111	112	112	111	109	106	104	101	99
3.8	0	0	0	0	0	0	1	6	25	58	73	80	85	87	87	87	86	85	83	81	79	77
3.3	0	0	0	0	0	0	1	5	19	43	55	60	63	65	66	65	65	64	62	61	59	58
2.8	0	0	0	0	0	0	1	3	13	31	39	43	45	47	47	47	46	45	45	44	42	41
2.3	0	0	0	0	0	0	1	2	9	21	26	29	30	31	31	31	31	30	30	29	28	28
1.8	0	0	0	0	0	0	0	1	5	13	16	17	18	19	19	19	19	18	18	18	17	17
1.3	0	0	0	0	0	0	0	1	3	6	8	9	9	10	10	10	10	9	9	9	9	9
0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hs /Tp	0.3	0.9	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9	4.4	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0	8.6	9.2	9.8	10.4	11.0	11.6	12.2	12.8

Lõpuks, muunduri efektiivsus iga mereoleku kohta, vt Tabel 3.4:

Tabel 3.4 Efektiivsus [%] muunduri jaoks iga mereoleku kohta

7.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
7.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
6.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
6.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
5.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
5.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
4.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
4.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
3.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
3.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
2.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
2.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
1.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
1.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
0.8	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	16%	14%	13%
0.3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	11%	24%	27%	27%	26%	25%	23%	22%	20%	18%	17%	15%	14%	13%
Hs /Tp	0.3	0.9	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9	4.4	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0	8.6	9.2	9.8	10.4	11.0	11.6	12.2	12.8

Piltliku ülevaade loomiseks on välja toodud väljundvõimsuse sõltuvus ajast ühe mereoleku jaoks, vt. ka Joonis 3.3.



Joonis 3.3 Tootmisvõimsus $H_s = 3.3\text{m}$ and $T_p = 7.4\text{s}$ kestvusega 600s

Keskmine väljundvõimsus on 63.1 kW, seda võib näha ka Tabel 3.3-s. Maksimaalne väljundvõimsus Joonis 3.3 põhjal on 519kW. See tähendab, et paigaldatava generaatori ja elektroonika võimsuse tase peab olema 8.4 korda suurem keskmisest. Nii suurel määral üle dimensionimine võib põhjustada majanduslikku ebaefektiivsust. Madal koormustegur (ülekantud võimsuse ja nimivõimsuse suhe) võib energia muundamist märkimisväärselt vähendada [26].

Lisaks on kõrgema võimsusastmega generaatorid kallimad ja mõjutavad iga seadme tasuvust. Soovitav on teha täiendav analüüs, et mitte generaatorit üle dimensionida ja et selle keskmine võimsus oleks samas piisavalt kõrge.

3.3.3 Aastane energia genereerimise analüüs

Aastane energia genereerimise analüüs tehakse punktidiagrammi abil. Näiteks number 43 punktidiagrammis (punasega märgistatud) tähendab seda, et selle aasta vältel oli 43 tundi niisuguse kõrgusega ja perioodiga lainetust, vt Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Punktidiagramm asukoha kohta

7.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
5.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0
5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	12	2	0	0	0	0
4.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	20	9	0	0	0	0	0
4.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	26	26	2	0	0	0	0	0
3.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	40	55	8	0	0	0	0	0	0
3.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	55	106	23	2	0	0	0	0	0	0
2.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	98	174	52	9	2	0	0	0	0	0	0
2.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	191	258	84	20	7	2	1	0	0	0	0	0
1.8	0	0	0	0	0	0	0	2	89	390	340	110	35	15	6	2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0	43	415	666	357	129	54	22	7	2	0	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	113	654	917	646	271	108	42	16	5	1	0	0	0	0	0	0	0
0.3	35	1	10	134	445	708	391	169	67	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hs / Tp	0.3	0.9	1.5	2.1	2.7	3.3	3.9	4.4	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0	8.6	9.2	9.8	10.4	11.0	11.6	12.2	12.8

Kasutades eelmises peatükis toodud eeldusi ja tabeleid, arvutatakse punktidiagrammilt aastane kättesaadav võimsus (ressurss mida on võimalik muundamiseks kasutada). Muunduri asukohal aastane laineenergia ressurss on 438488 kWh/aastas. Teiseks arvutatakse punktidiagrammilt tegelik aastane lainetest muundatud energia. Aastane toodang on 99088 kWh aastas. Arvutustulemusi iseloomustab Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Võimsused valitud asukohas

Aastane genereeritud energia	99088 kWh/a.
Keskmine aastane väljundvõimsus	11.3 kW
Kasutegur	22.6 %
Aastane võimalik energia hulk	438488 kWh/a.

Aasta keskmine väljundvõimsus tähendab, et osa aastast on kättesaadav laineenergia väiksem kui 11.3 kW (70% aastast praeguste dimensioonidega) ja osa aastast rohkem kui 11.3 kW (30% aastast praeguste dimensioonidega). See osa aastast, kus laineenergiat on rohkem kui 11.3 kW, tuleks salvestada üle jääv laineenergia hulk salvestusseadmesse ja kasutada siis, kui lainete energiat on vähem kui 11.3 kW.

Üheks võimaluseks on akude kasutamine. Kõige suurem kogus energiat, mida saab salvestada akudesse on nt tormiperiood, kus on lained näitajatega $H_s = 4.8$ ja $T_p = 9.8$ - selliseid laineid loetakse Eesti mõistes väga suurteks laineteks. TalTechi Meresüsteemide Instituudist saadud info kohaselt esineb sellised laineid 20h aasta jooksul. Eeldades, et need 20h on ühe tormi pikkus, siis nendest lainetest saadav kogus, mis oleks vaja akudesse salvestada, on ca 2600 kWh. Sellist elektri kogust võib salvestamise seisukohalt lugeda suureks koguseks. Võrdluseks, nt Tesla model S (levinud elektriauto) aku on 100 kWh - ehk laeva peal peaks olema ca 26 Tesla model S-i akut.

Selline kogus akusid teeb projekti ebamõistlikult kalliks. Praeguse lahenduse juures on odavam hoida laeval vedelkütusel töötavat generaatorit, mis toodab elektrit, siis kui lainetest piisavat energiat ei tule. Samuti on võimalik, et see aku suurus tuleb väiksem kui suurtest tormidest korraga nii palju energiat ei tule. Tuleb silmas pidada ka asjaolu, et see suurus peab veel suurem olema, kui aasta jooksul esineb järjest väga pikki perioode väikeste lainetega.

Edasi vaadeldakse lõputöös päikeseenergia ja merelainemuunduri sünergiat kasutades selle peatüki modelleerimise printsiipe ühe Eesti saare näitel.

4. PÄIKESEENERGIA ELEKTRIJAAAM VÄIKESAAREL VÕRGUVÄLISTES TINGIMUSTES

4.1 Viirelaiu tarbimisgraafiku uurimine ja modelleerimine

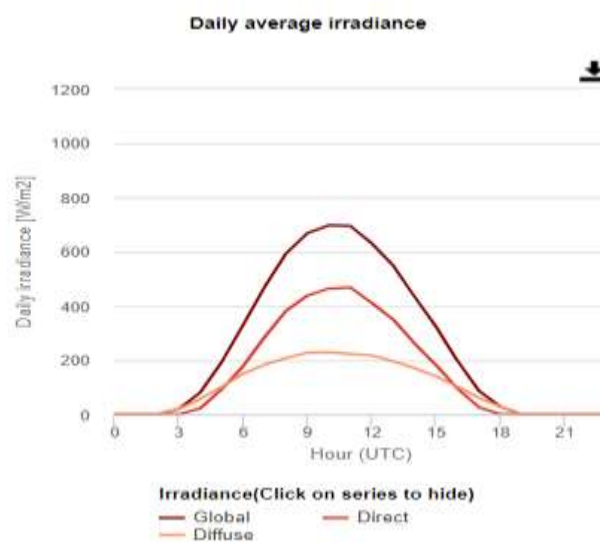
Eestis, Muhu saare kagupoolses osas, Muhust linnulennult ca 1,1 km kaugusel. asub Viirelaiu saar. Saarel, majaka juures, asub majade kompleks, mida kasutatakse enamasti suvel ürituste korraldamiseks (nt ettevõtte suvepäevad, laagrid jms). Suvel on majutuskohi kuni 100-le inimesele tänu suvemajadele, talvel on majutuseks sobilikud ainult soojustatud majad, mis võivad pakkuda majutust kuni 35-le inimesele. Tänu sellele, et suurim energiatarbimise koormus langeb tavaliselt suveperioodile, sobivad saarel elektri genereerimiseks päikesepaneelid. Samuti, juhul kui külaliste arv on üle 10, tekib elektri puudujääk ja see lahendatakse diislgeneraatori sisse lülitamisega. Majutuskompleksi omaniku sõnul selgus, et keskmine grupi suurus on 25-30 inimest, mis tähendab et energiadefitsiit esineb saarel tihti. Sellepärast on saare elektrivõrk sobilik lõputöös püstitatud eesmärkide lahendamiseks, kuna annab võimaluse vaadelda ja analüüsida diislgeneraatori asemel taastuvate energiaallikate sünergia. Käesolevas peatükis luuakse ülevaade saare tarbimisest ja uuritakse merelainetusel töötava elektrijaama lisandumist saare energiavarustussüsteemi. Selleks, et hinnata erinevaid tootmislahendusi, tuli kõigepealt leida Viirelaiu elektri tarbimisvajadus. Selleks koostati päevane tarbimisgraafik ja 2018 suve andmete järgi koostati elektri tarbimisprofiil. Kuna saarel mõõteseadmed puuduvad, tuli tarbimist modelleerida ebamäärase info tingimustes. See tähendab, et mudel on suure ebatäpsusega, kuid on olemas võimalus seda tulevikus täiendada täiendava info ilmumisel.

Oli teada, et laiul on 2600W (10x260W) päikesepaneele ja akud 6x240Ah . Kui külastajaid on rohkem kui 10, siis olemas olevad elektrivarustuse lahendused ei suuda katta tarbijate elektrivajadust. Viimase põhjal hinnati 10 külastaja tarbimise suurusjärg. Selleks, et modelleerida päikesepaneelide poolt genereeritava elektri kogust kasutati paneelide kohta teada olevaid andmeid [27] (vt Tabel 4.1).

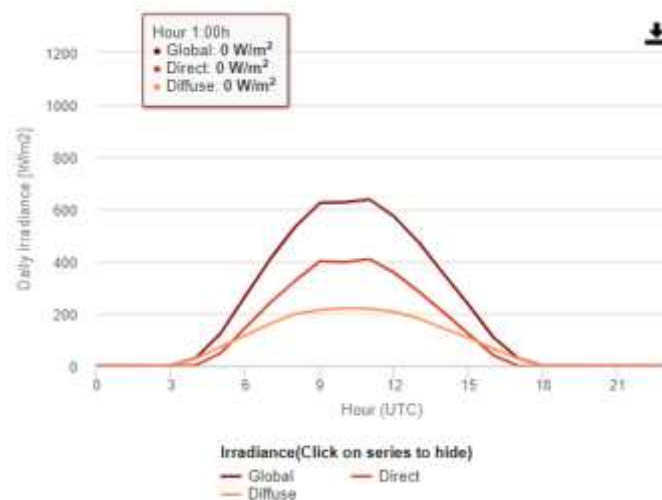
Tabel 4.1. Päikesepaneeli parameetrid

Kõrgus	1640	mm
Laius	992	mm
Võimsus	260	W
Pindala	1,62688	m ²
Efektiivsus	16	%

Eeldati, et suurim tarbimine oli juulis (532 külastajat) ja augustis (691 külastajat). Külastajate arv nende kahe kuu jooksul moodustas ligi poole saare aastasest külastajate arvust. Seetõttu otsustati analüüsida saare energiavajadust eelkõige nende kahe kuu baasil. Leiti päikese kiirgusenergia kuu keskmine graafik Viirelaiul, kasutades Euroopa Komisjoni poolt pakutud ametlikku tarkvara PVGIS (vt Joonis 4.1 ja Joonis 4.2).



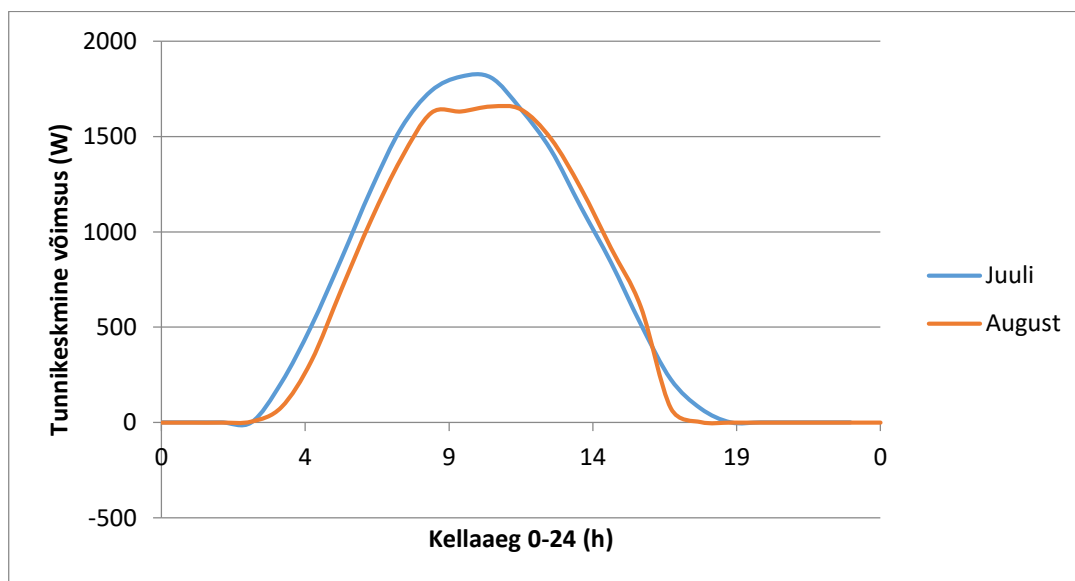
Joonis 4.1. Päikeseenergia kogus (J) ajaühikus (s) ruutmeetritele Viirelaiul juulis, keskmiselt [28]



Joonis 4.2. Päikeseenergia kogus (J) ajaühikus (s) ruutmeetritele Viirelaiul augustis, keskmiselt [28]

On teada, et Viirelaiul muudeti kaldenurka maa suhtes ja kasutati juulis 20 kraadist ning augustis 30 kraadist. Käesolevas uuringus nurga vahetamine omab marginaalset efekti, kuna kahe kuu peale jaotatuna kaldenurga vähendamisel saavad päikesepaneelid rohkem energiat hommikul ja õhtul, kuid vähem keskpäeval, mistõttu summaarne kiirusenergia muutub vähe. Võib järeldada, et efektiivsem on laiul hoida paneelid konstantse kaldenurga juures.

Leiti Viirelaiu päikeseelektrijaama tootmisgraafik keskmisel augusti ja juuli päeval (vt ka Joonis 4.3).



Joonis 4.3. Päikeseelektrijaama poolt toodetud võimsus augusti ja juuli päevadel, keskmiselt

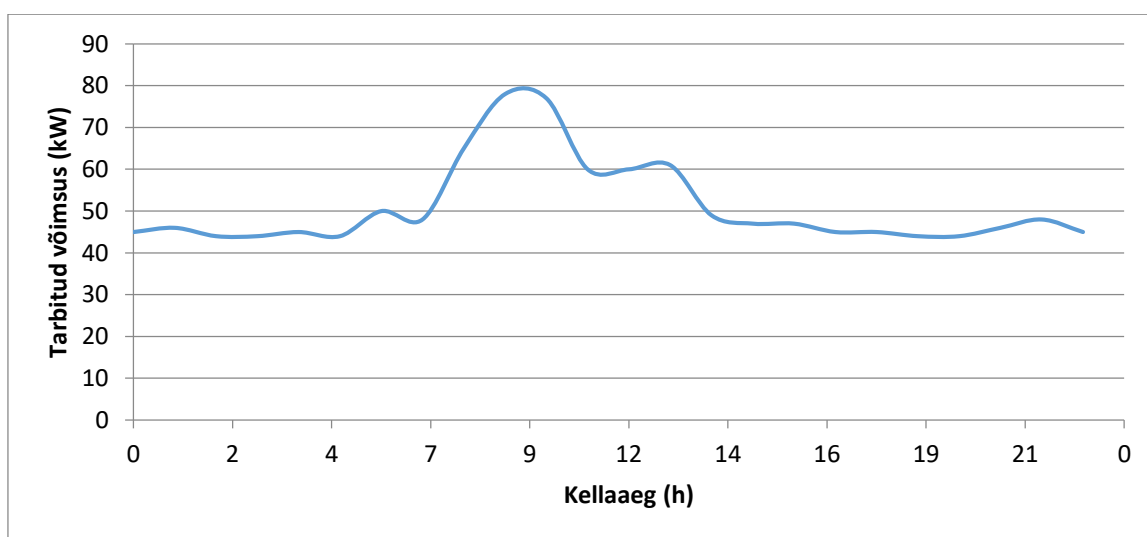
Joonisel on sinise joonega näidatud juuni ja oranži joonega augusti päeva keskmine tootmine. Summeerides kokku tootmisvõimsused on võimalik hinnata päikeseelektrijaama 1 päeva tootmist, mis kujunes 15,8 kWh juulis ja 14,6 kWh augustis. Sellest võib järeldada, et keskmiselt tarbib 1 inimene saarel 1/10 päikesepaneelide toodangust ehk 1,5 kWh päevas.

Akude mahutavus on 1440 Ah so. 17,3kWh, millest piisab ühe keskmise juulikuu päeva päikeseenergia salvestamiseks või 10 külalise energiaga varustamiseks üheks päevaks (inverteri keskmine kasutegur 0,95). Seega on akude mahutavus valitud täpselt nii, et on võimalik siluda päevast tootmisgraafikut, mis toodab näiteks juulis keskmiselt 15,8kWh.

Laiul on paigutatud diisligeneraator nominaalvõimsusega 14kW, mis keskmiselt töötab aastas 600 tundi. Eelneva info alusel saame järeldada, et sellise generaatori olemasolu lubab täita 88 inimese

energiavajadust. Peab silmas pidama, et 1 inimese tarbimine ei taandu lineaarselt, mis seletab kas asjaolu, et kui saarel on olnud 100 inimese suurune grupp, siis on elektriga suudetud vajadus rahuldada. Tulenevalt ühendusskeemist, võis seda tagada ka generaatori toitele paralleelne toide akudelt.

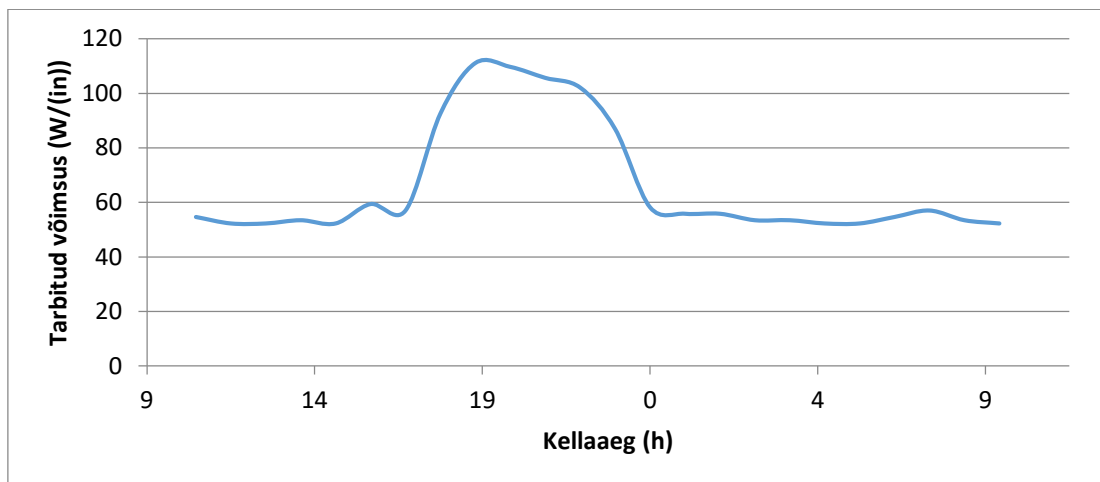
Tarbivate seadmete kohta läbi viidud küsitluse abil saadi infot, et suuremate tarbijatena kasutatakse 4 jahekülmikut, 3 sügavkülmikut, jäämasinat, õllekompressorit, nõudepesumasinat, helitehnikat, basseinipumpa ja mullivanni. Tarbimist modelleeriti kasutades sarnase meelelahutusasutuse tarbimisgraafikut. Selleks kasutati Kopra talu tunnipõhist tarbimist 2017. aastal. Leiti, et selle asutuse tarbimine on suurim tööpäevade keskel (Joonis 4.4).



Joonis 4.4. Kopra talu tarbimine 18.07.2017

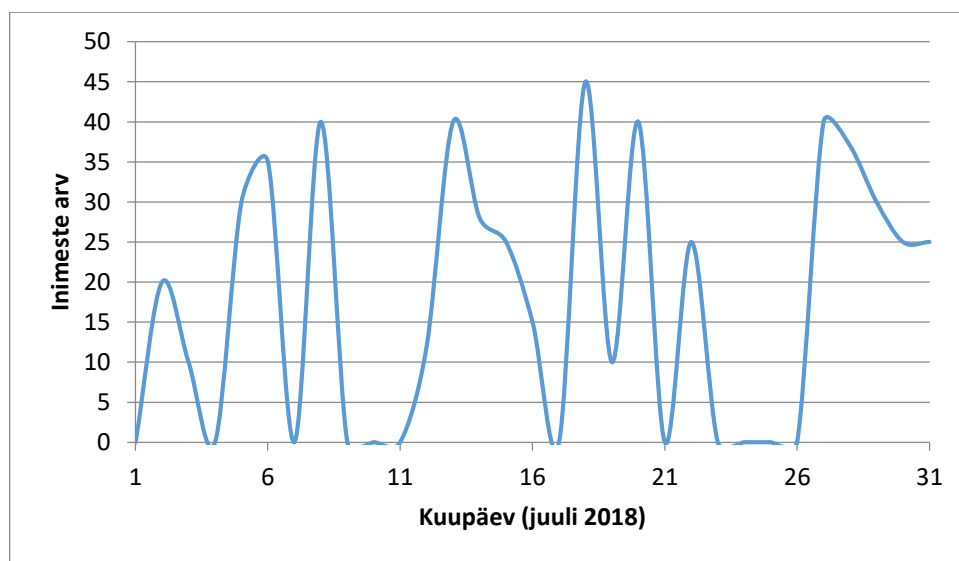
Kopra talu mastaap on suurem, kui Viirelaiu oma, sest vahepeal, viiakse seal läbi üritusi kuni 1000 inimesele. Suuremate mahtude tõttu on elektri tarbimine seal ka kordades suurem. Hinnati, et eraldatud laiu tarbimine ei lange kokku mandril asuvate meelelahutusasutuste omaga, kuid külmutusseadmete jms olemasolu tõttu on sealgi olemas baaskoormus. Võib eeldada, et tipukoormus esineb, aga õhtustel tundidel, ja on keskmiselt pikem ja baaskoormuse suhtes kõrgema amplituudiga. Seda eeldatakse, kuna tegemist on laiuga, kus inimesed veedavad mitu päeva ja on õhtul aktiivsemad kui Kopra talus, kus on valdavalt ühepäevased konverentsid. Seetõttu nihutati koormusgraafikut hilisemaks. Täpsema info selgumise korral saab tarbimisgraafikuid täpsustada.

Kopra talu päevane tarbimine valitud juulikuu päeval oli kokku 1337kWh (päeva tunnikeskmine tarbimine 56 KWh), Viirelaiul inimese kohta 1587Wh, seega teisendati tarbimise iseloom Viirelaiu ühe inimese poolt tarbitud võimsuse järgi vt. ka Joonis 4.5.



Joonis 4.5. Viirelaiu modelleeritud päevane ühe inimese tarbimisgraafik

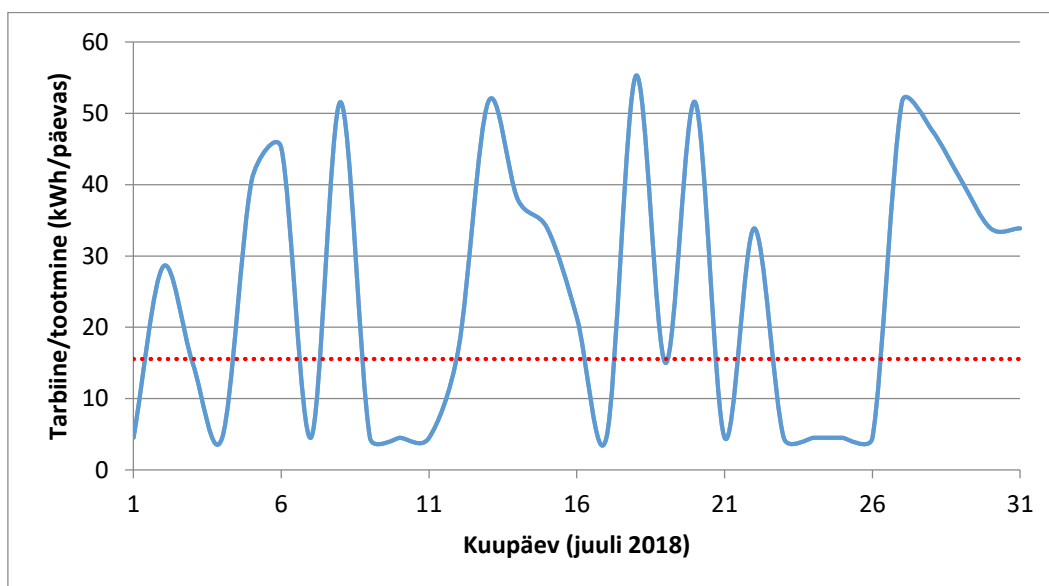
Teadagi oli veel küllastajate arv laiul, vt ka Joonis 4.6.



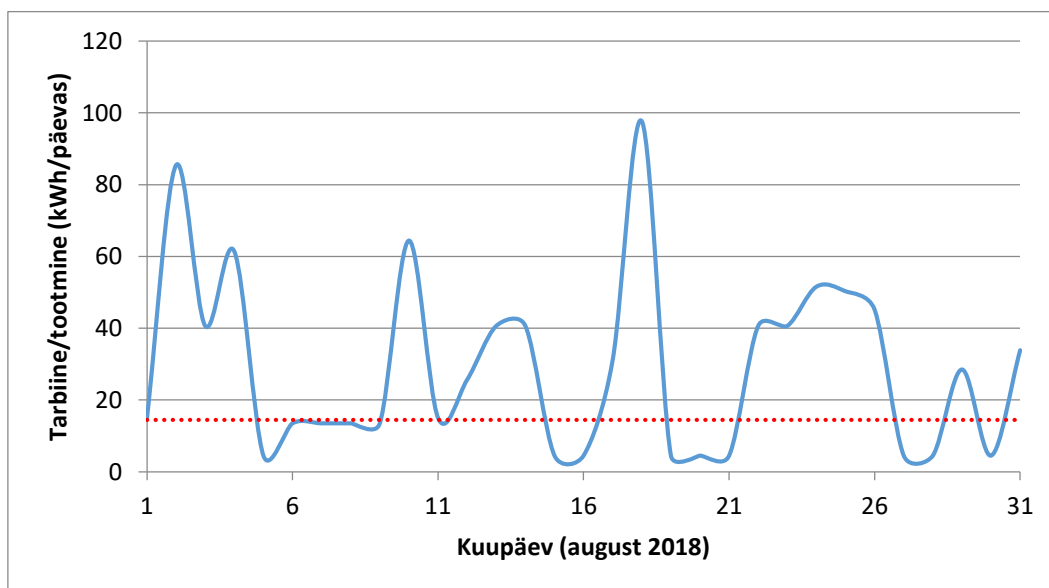
Joonis 4.6. Küllastajate arv juulis

Saarel on baastarbimine ka nendel päevadel, kui külalisi saarel ei ole ja see on keskmiselt võrdne kolme külalise tarbimisega. Kuna koormuse suurenemine ei ole külaliste arvu suurenedes lineaarne, eeldati, et iga 10 järgneva külalise energiakasutus on 10% eelmise 10 omast väiksem. Sellega võeti arvesse ka seda, et ühe külalise tarbismahu arvutamisel pole võetud arvesse personali tarbimist.

Nende kaalutluste tulemusel saadi järgnevad juuli ja augusti tarbimisgraafikud, v. ka Joonis 4.7 ja Joonis 4.8.

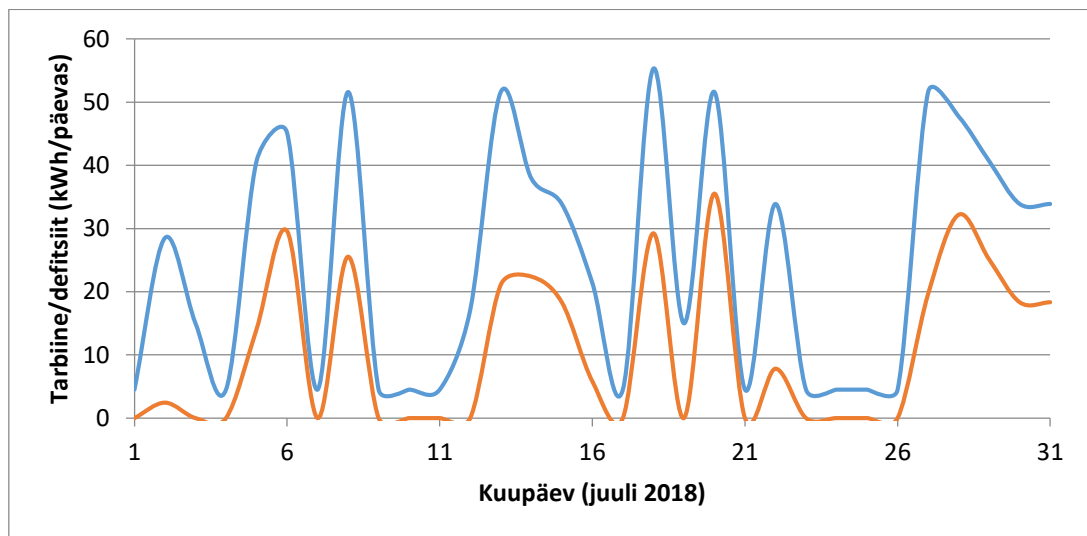


Joonis 4.7. Viirelaiu modelleeritud juuli tarbimine

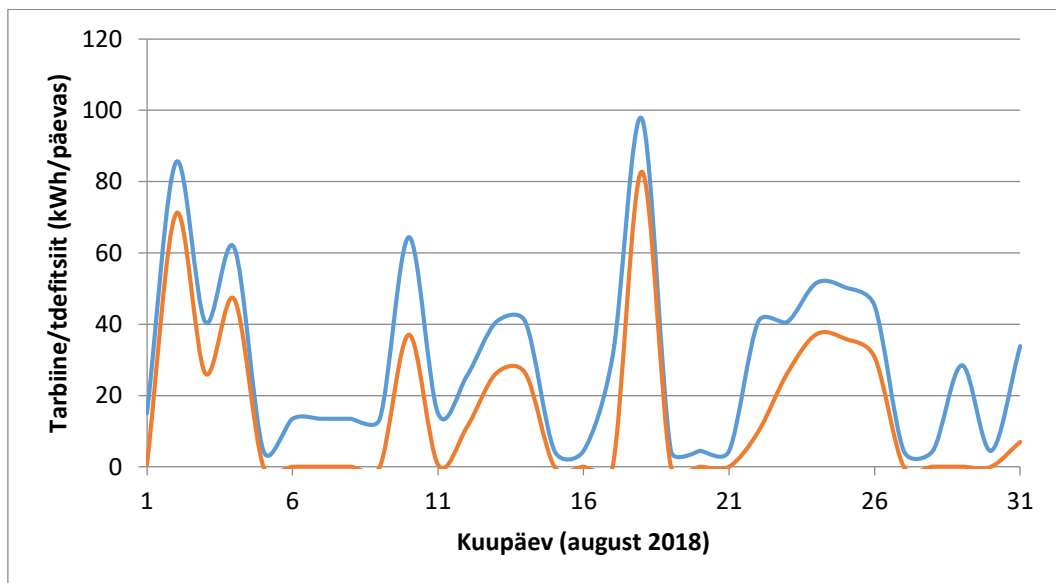


Joonis 4.8. Viirelaiu modelleeritud augusti tarbimine

Punase punktiirjoonega on näidatud baaskoormuse katmine päikesepaneelidega. Modelleeritud on keskmist juulikuu päeva ja pole arvestatud ilmastikutingimuste variatsiooniga. Arvestades modelleeritud tarbimist, päikeseenergia keskmist päevast tootmist inverteri 0,95 kasutegurit ja akude mahtuvust, arvesse võtmata nende tühjenemisel tekkivaid kadusid, leiti energiadefitsiit vaid päikeseenergia tootmisel, vt ka Joonis 4.9 ja Joonis 4.10.



Joonis 4.9. Tarbimisdefitsiit päikeseenergiast tootmisel juulis



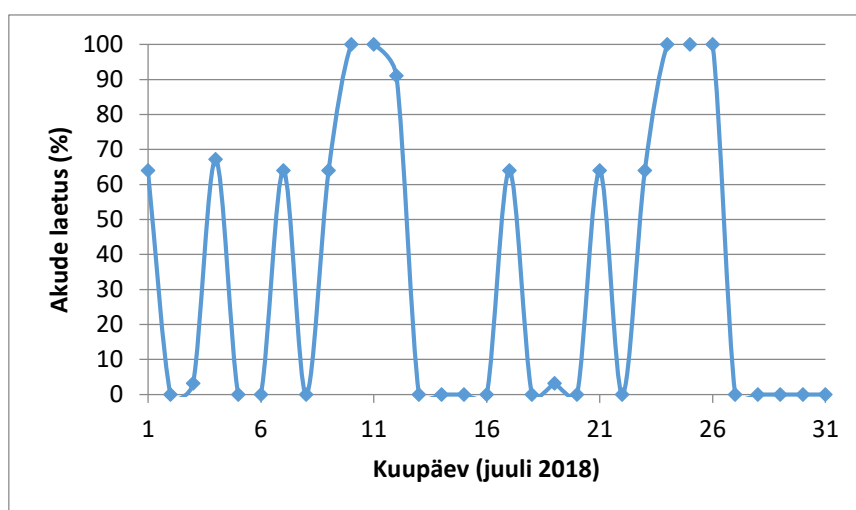
Joonis 4.10. Tarbimisdefitsiit päikeseenergiast tootmisel augustis

Joonistel on sinisega näidatud tarbiskoorumus ja oranžiga defitsiit päikeseenergiast tootmisel. See koormus kaetakse hetkel akudega. Defitsiit leiti arvutades iga päeva lõpuks akude jääkmahutavus ja päevasest päikeseenergia tootmisest ja tarbimisest tekkiv defitsiit, juhul kui päikesepaneelide toodang polnud piisav.

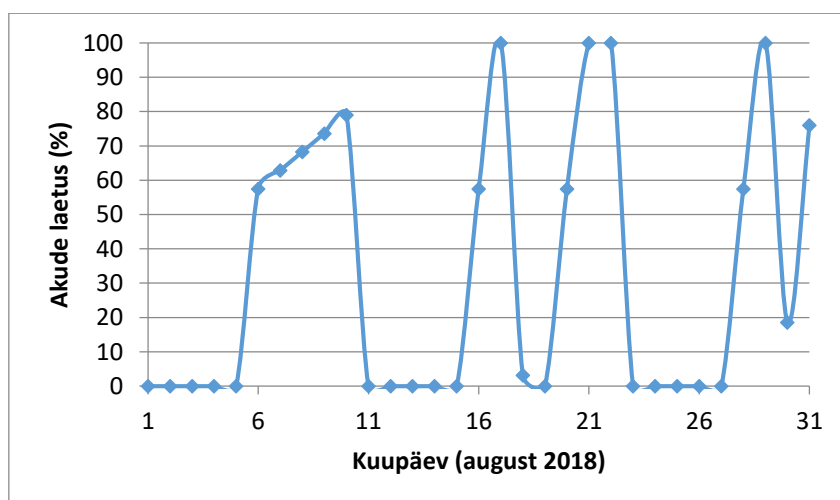
Joonis 4.7 ja Joonis 4.8 järgi on punase punktiirjoone alune pindala vastavalt 482 ja 447 kWh, so. päikesepaneelide toodetud energia. Joonis 4.9 ja Joonis 4.10 on oranži joone alune pindala 325kWh ja 475kWh, so. juulis ja augustis hinnanguliselt diisलगeneraatoriga toodetud energia.

Taastuenergia tootmise defitsiidi katmiseks on mitu võimalust. Hetkel kasutatakse diisलगeneraatorit, mis on sobilik tipukoormuse katmiseks. Kuid on ka taastuenergia alternatiive, mis pruugivad olla odavamad (tänu saarele kütuse transportimise keerulisusele) ja on kindlasti loodussäästlikumad, sest ei saasta oma heitmetega keskkonda. Üks võimalus on suurendada päikesepaneelide ja akude mahutavust, et katta suurem osa koormusest ja vähendada (hetkel ca pool koormusest katva) diisलगeneraatori kasutamist. Selleks tuleks leida optimaalne päikesepaneelide võimsus viies läbi sama analüüs, mis graafiliselt näidati Joonis 4.9 ja Joonis 4.10. Teine võimalus on kasutada laineenergiat, mis eeldaks samuti suuremate akude kasutamist.

Praegu olid akud maksimaalselt täis laetud neljal päeval juulis ja viiel päeval augustis kui tarbimist polnud, vt ka Joonis 4.11 ja Joonis 4.12.



Joonis 4.11 Akude laetus juulis



Joonis 4.12 Akude laetus augustis

Uute tootmisvõimsuste lisamisel tuleks akude mahutavust suurendada nii palju, et need suudaks talletada päevaga toodetud energia, et siluda päevast tootmisgraafikut tarbimisele vastavaks. Nende tootmistehnoloogiate kasutusele võtul tuleks läbi viia tasuvusarvutus ja leida punkt, kus lisanduva taastuveneergetilise tootmisvõimsuse installeerimisel muutuksid investeerimiskulud suuremaks kui diisलगeneraatori kütuse kulud. Arvesse võib võtta ka taastuvatest energiaallikatest energia tootmist eraldi väärtusena tuginedes põhjustele, mida on mainitud töös eelpool (alguses). Samuti, peab arvestama diislikütuse transportimise kuludega mandrilt laiule.

4.2 . Merelaineenergia elektri muundava muunduri ja päikeseelektrijaama sünergia ja modelleeritud andmete võrdlemine

Ülaltoodud andmete alusel võrreldakse elektri genereerimist 2018. a. juulis ja augustis. Vaadeldakse, kuidas merelainetuse energiaallika lisandumine mõjutab süsteemiteoreetiliselt . Tuginedes lk.41 toodud mudeli väljundile, võib luua teoreetilise lahenduse eesmärgiga vaadelda päikesepaneelide ja laineenergia muunduri sünergia.

Analüüsides laiu ümbrust, selgus et energia saagikuse poolest on kõige kasulikum koht laiust kagus, vt ka Joonis 4.13.



Joonis 4.13 Saare Viirelaid juures asukoht merelainetus muunduri jaoks

Selles töös vaatleme lihtsustatult, et asukoht on laiuele piisavalt lähedal, et kaablite maksumused võib lugeda tühiseks.

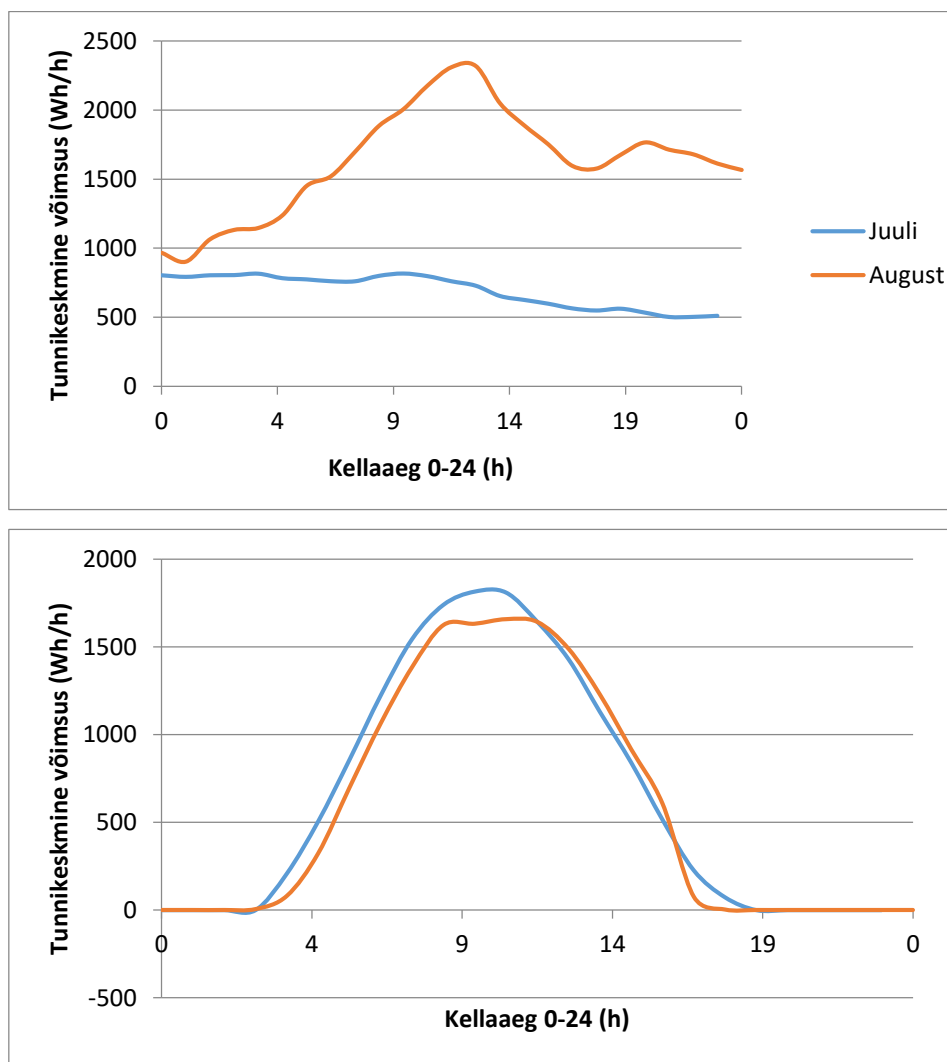
Meresüsteemide instituudi andmebaasist oli tehtud väljavõtte vaatluse all oleva aasta jooksul esinevatest lainekõrgustest, mudeli jaoks võetud punktis. Lainekõrgused olid teisendatud võimsuseks, kilovatt/laineharja meetri kohta.

Merelainetusmuunduri mudeli parameetrite (vt. lk. 36) alusel saab Viirelaidu jaoks genereerida aastas keskmiselt 5,1 kW elektrit(vt Tabel 4.2).

Tabel 4.2 Võimsused valitud asukohast

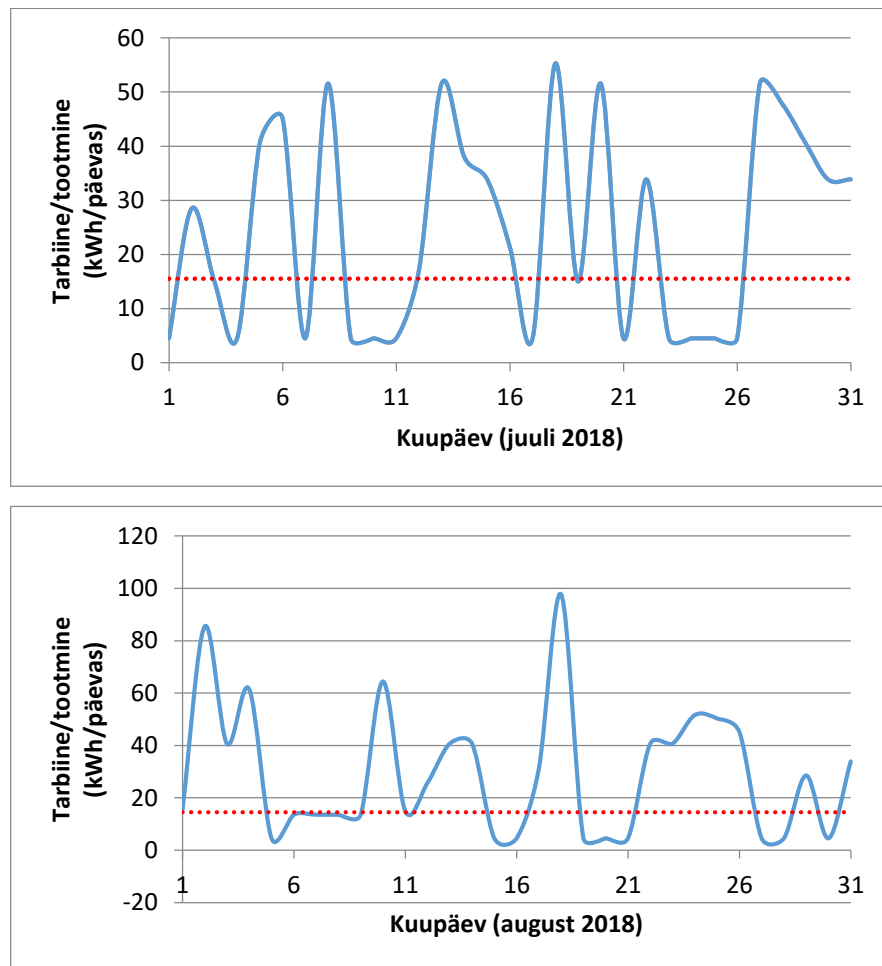
Aastane toodetud energia	43259 kWh/a.
Keskmine aastane väljundvõimsus	5,1 kW.
Efektiivsus	21.1 %
Aastane võimalik energia hulk	234468 kWh/a.

Modelleeritud laineenergia muunduri tootmisprofiili saab lisada päikesepaneelide tootmisprofiili juurde, mis omakorda võimaldab analüüsida muudatusi laiu energiavarustuses (vt. ka Joonis 4.14).



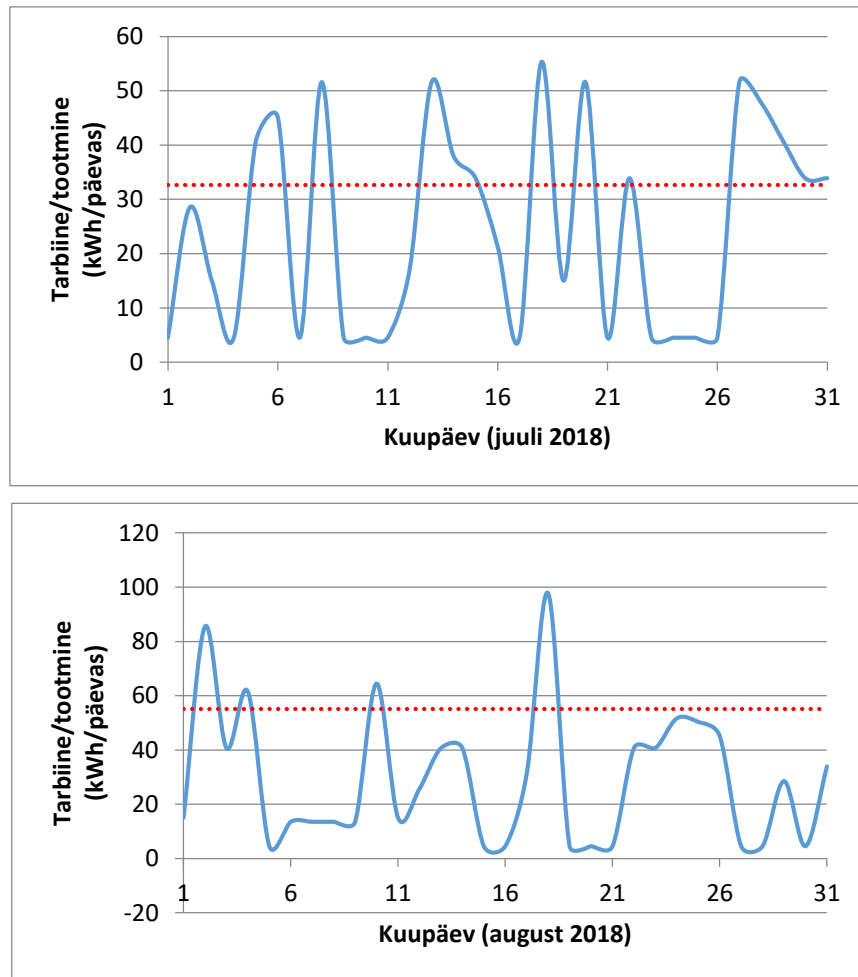
Joonis 4.14 Merelainetusmuunduri energia tootmine juulis ja augustis (Üleval). Päikesepaneelide energia tootmine juulis ja augustis (All)

Esmalt vaadeldakse olukorda, mis esineb laiul ka olemasolevas olukorras. Osa tarbitud energiat on kaetud päikesepaneelide poolt ja ülejäänud katab diisलगeneraator (vt Joonis 4.15).



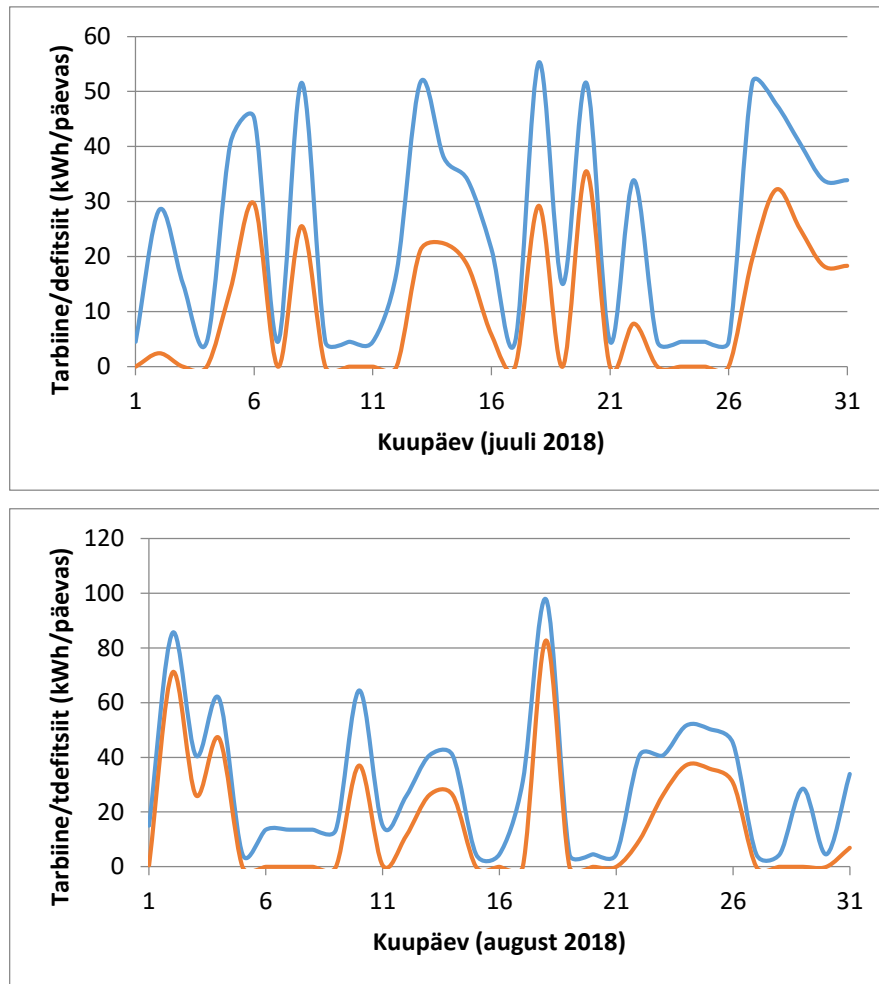
Joonis 4.15 Viirelaiu juuli ja augusti päikesepaneelide tarbimis/tootmise bilanss, punase punktiirjoonega on näidatud baaskoormuse katmine päikesepaneelidega

Juhul kui lisandub laineenergia, diisligeneraatori poolt kaetava energia hulk väheneb (vt Joonis 4.16).



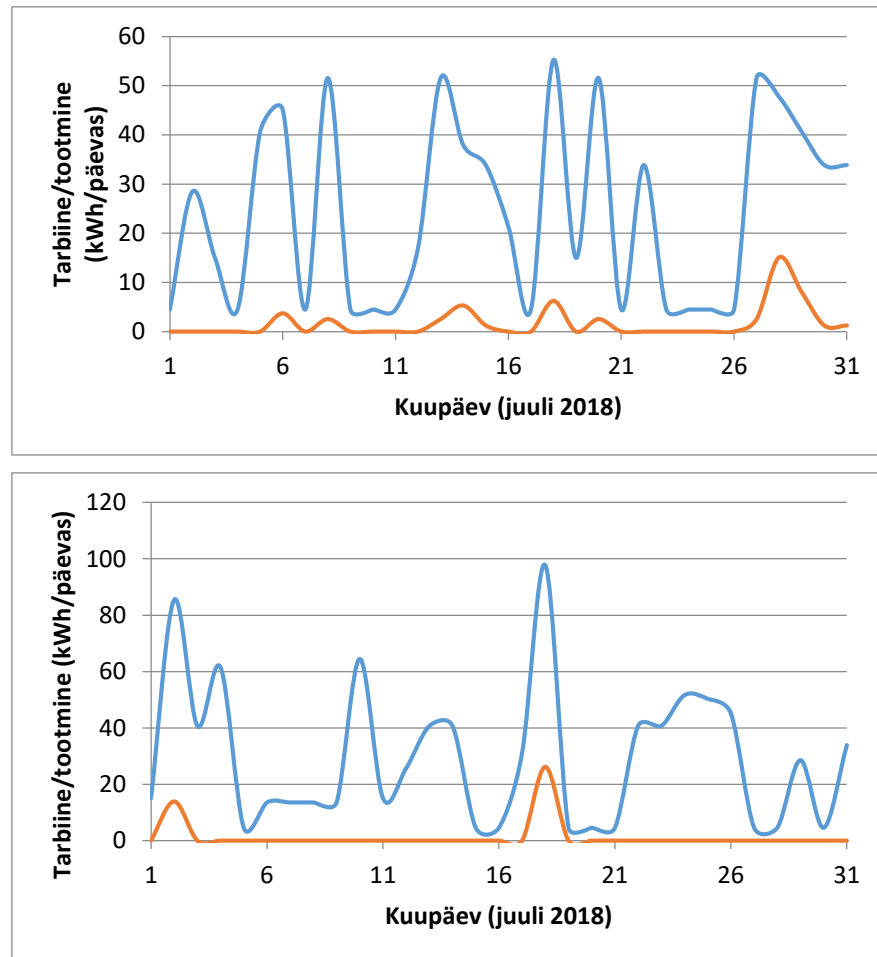
Joonis 4.16 Viirelaiu Juuli ja Augusti laineenergia ja päike tarbimise/tootmise bilanss, punase punktiir - joonega on näidatud baaskoormuse katmine päikesepaneelidega ja muunduriga

Sama tendents on jälgitav ka vaadeldes energia defitsiiti (vt Joonis 4.17). Joonistel on näidatud energia defitsiit praegusel hetkel, kui defitsiit kaetakse diisligeneraatori abil.



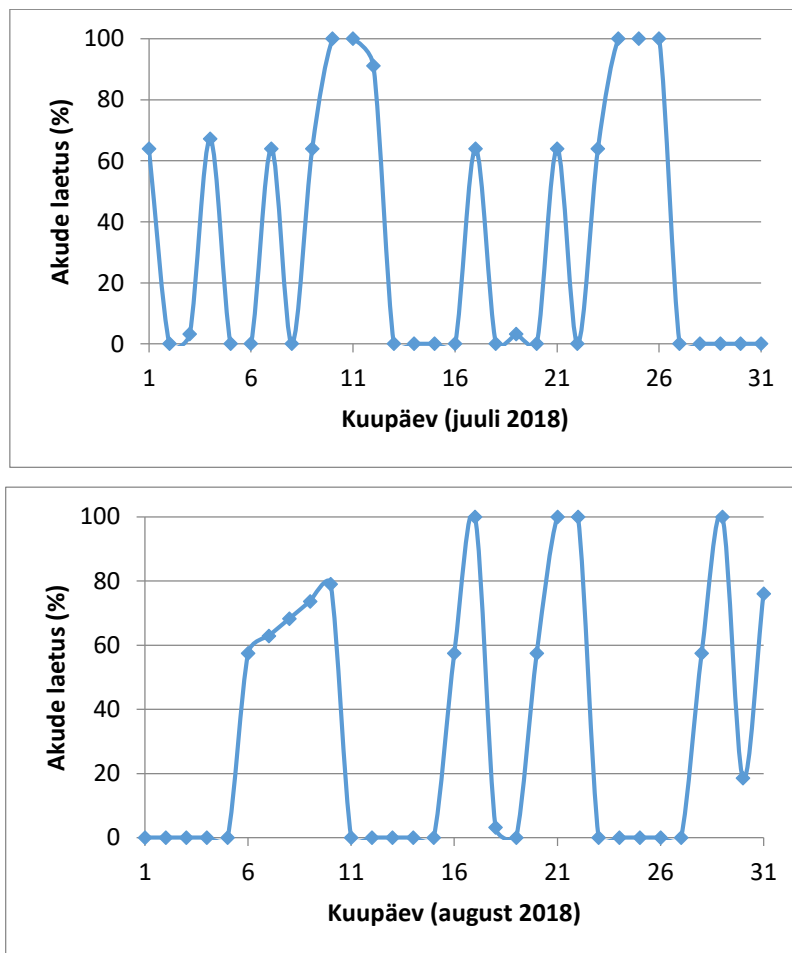
Joonis 4.17 Viirelaiu Juuli ja Augusti päikesepaneelide tarbimine ja energia defitsiit. Joonistel on sinisega näidatud tarbimiskoormus ja oranžiga defitsiit energia tootmisel

Juhul kui lisandub laineenergiast elektri genereerimine, defitsiit väheneb ja diisli tarbimine energia tootmiseks laiu energiavarustuses väheneb oluliselt. (vt. Joonis 4.18)



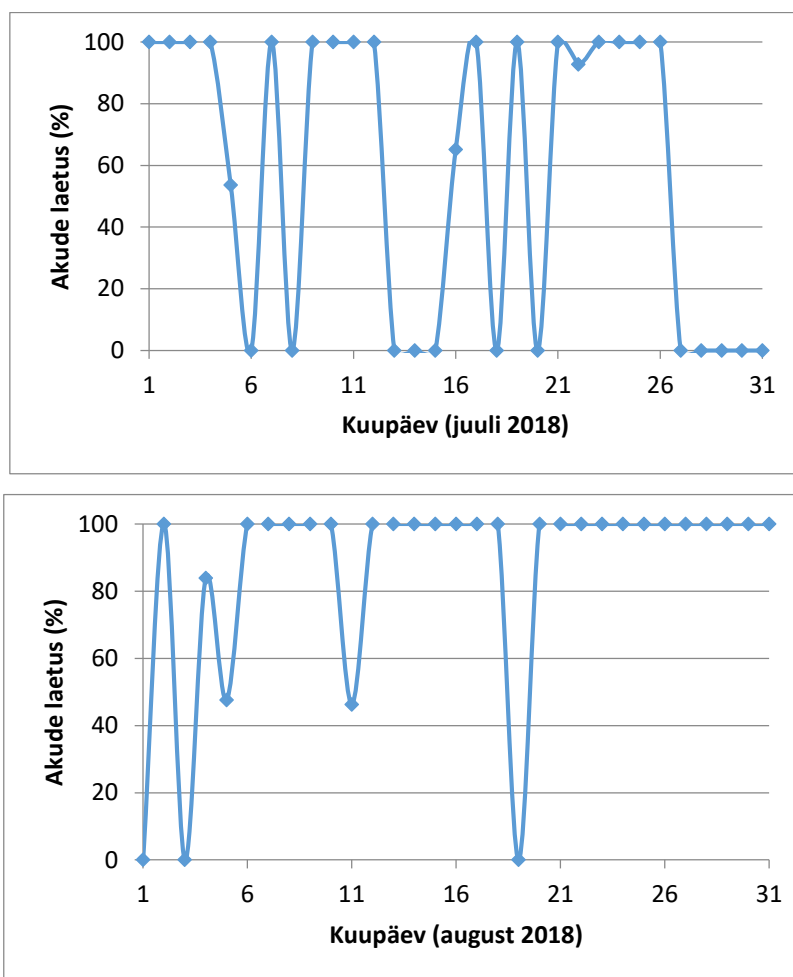
Joonis 4.18 Viirelaiu juuli ja augusti laineenergia ja päikesepaneelide sünergia. Joonistel on sinisega näidatud tarbimiskoormus ja oranžiga defitsiit energia tootmisel

Kui palju diisलगeneraatori kasutamine väheneb on hästi näha, kui vaadelda olemas olevate akude varu laetavust. Enne laineenergia lisandumist juulis olid akud täis laetud 5 päeval ja augustis 4 päeval (vt Joonis 4.19).



Joonis 4.19 Viirelaiu juuli ja augusti päikeenergiat kasutades protsentides akude, mahutavusega 1440 Ah so. 17,3kWh, laetavus

Pärast laineenergiaallika lisandumist olid akud tühjad ja diisलगeneraatorit oli vaja sisse lülitada ainult 12. päeval juulis ja 3. päeval augustis (vt Joonis 4.20).



Joonis 4.20 Viirelaiu juuli ja augusti päikeenergiat ja laineenergiat kasutades protsentides akude, mahutavusega 1440 Ah so. 17,3kWh, laetavus

Kokkuvõtteks võib näha, et laineenergia lisandumine tagab saare elektrivarustuse ja peaaegu välistab generaatori kasutamise. Seega kui 14 kW generaator tarbib 2,5 liitrit kütust tunnis, teeb see 1 suve kuu jooksul hinnanguliselt 300 liitrit kütuse säästu. Kuid praeguse laineenergia tehnoloogia arenguetapis, on odavam suvel sama eesmärgini jõudmiseks, kasutada suuremat arvu päikese paneele ja akusid. Alternatiivina võib kasutada ka tuulegeneraatorit.

KOKKUVÕTE

Taastuvenergeetika on süsihappegaasi vaba. Tänu sellele on taastuvenergeetika areng seotud inimkonna tulevikuga. See tugineb visioonidele, mis on kujundatud „võitlemaks“ ülemaailmse kliima soojenemisega. Laineenergia kasutusele võtmine on üks nendest elektri genereerimise viisidest, mis on kooskõlas Euroopa liidu kliimapoliitiliste eesmärkidega ja selgelt panustavad kliimaga seotud probleemide lahendamisele.

Lõputöö eesmärgiks oli merelainete energia elektriks muundava seadme ehk muunduri arendamine, seadme tootlikkuse testimine ja modelleerimine autonoomses elektrivõrgus koos päikeseelektrijaamaga väiketarbija energiavarustuses.

Eesmärgi saavutamiseks koostati mehhaaniliselt optimeeritud merelainete energia muunduri prototüüp. Uuriti merelainete energia muundamise põhiprintsiipe. Muunduri katsetatis Väikelaevade Kompetentskeskuses Kuresaares. Katsetuste põhjal leiti, et selle generaatori pöördearv ületas lubatud maksimumi ja tänu tarbija suure takistusele (hõõglamp) töötas generaator madalatel võimsustel. Järgmistes katsetes on soovitatav vahetada väljundis koormus ja lisada muundur, mis stabiliseeriks pinget. Nõnda saaks generaatorit koormata ühtlasemalt ja mõõta ka reaalselt energiahulka. Suuremat laineenergiast genereeritud elektri kasutust aitaks tagada salvestamine ehk akude kasutamine. Samuti aku laadimine on üks kergematest viisidest hinnata reaalselt võimsust ja energiat, mida antud seade lainetest kätte saaks. Kuna püsimagnet-generaatori maksimum võimsuspunkt sõltub generaatori pöörete arvust ja koormuse suuruselt, tuleb perspektiivis analüüsida võimalusi lisada süsteemi väljundisse MPPT kontrolleri, mis võib parandada süsteemi energeetilist tõhusust läbi maksimum-võimsuspunkti järgimise.

Nende täienduste sisseviimine annab võimaluse täpsemalt hinnata muunduri energeetilist potentsiaali ja sobivust töös kirjeldatud energiasüsteemi. Töö käigus teostati esimesed katsetused ja kaardistati järgmised sammud seadme arendamiseks. Kuressaare väikelaevade kompetentskeskuses läbi viidud esmase prototüübi katsed näitasid, et välja arendatud muunduti abil on võimalik merelainete energia füüsiline ülekandmine tarbijale (lampidele). Siiski oli tarbija takistus liiga suur ja generaatorit ei suudetud piisavalt koormata. Kuna lambid hakkasid põlema, siis see tõestas, et energia ülekanne lainetest lampidele toimub. Käesolevad testid on olulised merelainetusest elektri genereerimise aspektide mõistmiseks.

Kuna katsete tulemused ei võimaldanud prognoosida käesolevas etapis seadme tootlikust avamerel, võeti töös käsile lihtsustatud matemaatiline mudel, mis sidus seadme tootlikkuse ja

merelainetuse energia ressursi sõltuvust konkreetse asukohaga ja andis võimaluse analüüsida merelainetuse muunduri ja teise taastuva energiaallika sünergia. Vastavalt ülesandele modelleeriti avamere matemaatiline prototüüp, mille ujuki kaal oli 40 tonni. Tulenevalt TalTech Meresüsteemide instituudi merelaine energeetilise ressursi käsitlevate andmetest, kujunes seadme aastaseks keskmiseks väljundvõimsuseks 11,3 kW. Laineenergia ressurss on kaootilise iseloomuga ja kaootiliselt hajutatud aasta sees. Kuigi modelleeritud seadme keskmine võimsus oli 11,3 kW lähedal, oli 70% aastast lainetus vaiksem ja seega toodetud energiahulk väiksem kui 11,3 kW. Ainult 30 % aastast esines niisugune lainetus, mille muundamisel elektriks energia toodang oluliselt ületas 11,3 kW väärtust.

Üheks viisiks energiavoo ühtlustamiseks on kasutada energiasalvestid, mis salvestaks energiat siis, kui seda on palju (tormiline meri) ja annaks ära, kui laineenergiat on muundurile vähe (vaikne meri). Siiski, käesoleva mudeli dimensioonide juures on odavam hoida merelainetusenergia muunduri pardal vedelkütusel töötavat generaatorit, mis toodab elektrit, siis kui lainetest piisavat energiat ei tule.

Alates sellest kui mudel, mis käsitles Läänemere lainetust aasta vältel ja näitab selle abil toodetud elektrienergiat sai korrastatud, tekkis võimalus modelleerida merelainetusgeneraatoriga ja päikesepaneelide tootmise koosmõju ja vaadelda nende sünergia. See on kõige olulisem väikesaartele, mis pole elektrivõrguga ühendatud, ja vajavad kohalikku energia tootmist. Tavaliselt niisugustes kohtades kasutatakse fossiilsetel kütustel töötavate generaatorite toodangut, mis nõuab tavaliselt vedelkütust ja suurendab süsihappegaasi teket. Taastuvate energiaallikatega energiatootmine vähendab süsihappegaasi teket ja ei vaja kütust. Lõputöös käsitletud laiul on kasutusel diisलगeneraator ja päikesepaneelid, mille juurde sai lisatud merelainetusmuunduri matemaatiline prototüüp. Selle tulemusel, vaadeldud perioodil, oli diisलगeneraatori kasutamise vajadus minimaalne, mille tulemusena vähendatakse süsihappegaasi heidet.

Kokkuvõtvalt, lõputöö eesmärgid on saavutatud ja merelainemuunduri arendamise protsessi etapid on välja toodud ja antud edasised soovitusel. Töös on kirjeldatud muunduri prototüüp ja matemaatiline mudel. Töös uuriti merelaine- ja päikeseenergia elektriks muundamise protsessi nende süsteemide koosmõju ja tehti ettepanek edasisteks arendusteks selliste süsteemide energiavarustuse tagamise juhtimisel. Lõputöö lisandväärtuseks on avamerel merelainetusenergia muunduri tootlikkuse hindamise printsiip.

SUMMARY

The development of renewable electricity sources, due to their property of reducing carbon monoxide emissions, is clearly linked to the future of humankind and is based on the development of a vision in response to climate change issues, which in turn are related to global warming. The application of wave energy is one of the ways of generating electricity that is in line with European Union's climate policy objectives and clearly contributes to addressing climate challenges.

The aim of this thesis was to develop a sea wave converter to test the productivity of the device and to model off-grid solar cogeneration.

To achieve this goal, a prototype of a mechanically optimized sea wave energy converter was constructed. Basic principles of sea wave energy production were examined. During the testing cycle of the converter at the Small Craft Competence Center in Kuressaare, it was discovered that the rotational speed of the used generator exceeded the maximum allowed rate and, due to the high resistance of the energy consumer (incandescent lamp), the generator was operating at low capacity. In the following tests, it is worth consideration to change the output load and add a converter to stabilize the voltage. This way the generator load could be more even, and an accurate amount of energy could be measured. Additionally, a battery could be charged using wave power for accurate measurements. Charging the battery would allow to estimate the actual power and energy that the device would receive from waves. As the maximum power point of a permanent magnet generator depends on the number of revolutions of the generator and the magnitude of the load, the possibility of adding an MPPT controller to the system output, which can improve the energy efficiency of the system, should be analyzed.

When these changes are introduced, an opportunity will appear to more accurately assess the energy potential and suitability of a given generator for this application. Thus, the first steps of the devices development were completed, and the next steps mapped, and with the assistance of the Kuressaare Small Craft Competence Center sea wave energy was for the time in Estonia transmitted physically to the consumer (lamps), the resistance factor of which was unfortunately too high and could not adequately load the generator. However, they allowed to successfully demonstrate energy transmission from waves to the lamps. These tests are important for understanding the electricity generation from sea waves.

As the results of the experiments do not allow to predict the productivity of the offshore device at this stage, a simplified mathematical model was introduced, linking the devices productivity and

wave energy resource dependency to a specific location and allowing to analyze the synergy between the wave converter and another renewable energy source. According to the conditions, a mathematical offshore prototype with a float weight of 40 tons was modeled. According to data from the TalTech Marine Systems Institute's marine waves energy resource, the device would have an average annual output of 11.3 KW. The emergence of a wave energy resource is unpredictable and chaotic and varies over time. Although the modeled device had an average annual power output near 10 KW, 70% of the year the wave height was low, and the power produced was below 10 KW and only 30% of the year were waves high enough for the energy converted to electricity to be significantly above 10 KW.

One way to balance the flow of energy is to use energy accumulating devices that store energy when the output is high (stormy seas) and distribute it when there is little wave energy being converted (quiet seas). However, with the dimensions of this model, it is more cost-efficient to keep a liquid-fuel generator onboard the wave power converter, that would produce electricity when there is not enough power coming from the waves.

Ever since the annual sea wave model of the Baltic Sea, showing the electricity generated in it, was composed, the opportunity has emerged to model the sea wave converter together with solar panel production and observe their synergy. This is most important for small islands unconnected to the electricity grid which require local power generation. Generally, such locations rely on fossil fuel generators, which usually require fossil fuel and increase the emission of carbon oxides. Energy production from renewable sources reduces carbon oxide pollution and does not require any fuel. The island used in this thesis relies on a diesel generator and solar panels, to which the mathematical prototype of a sea wave converter was added. As a result, during the tracked period on the island, the need to use a diesel generator was almost eliminated, resulting in a reduction in carbon dioxide production and a reduction in diesel consumption.

In summary, the objectives of the thesis have been achieved and the sea wave converter development process studied. The mathematical and physical prototypes of the converter are discussed, and their differences are presented. It was also demonstrated how consumption data is collected in places without power meters. I have studied the process of converting sea wave and solar energy into electricity and made suggestions for further development. The added value of the thesis is the process of evaluating the productivity of offshore wave energy converters on the high seas.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, „Arengukavad: Vabariigi Valitsus,“ 20 10 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.valitsus.ee/sites/default/files/content-editors/arengukavad/enmak_2030.pdf. [Kasutatud 07 03 2019].
- [2] „Eurostat andmebaas,“ 08 07 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: ec.europa.eu. [Kasutatud 12 06 2019].
- [3] „Taastuvenergia Elekter: Taastuvenergia toetus,“ Elering AS, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/taastuvenergia-toetus>. [Kasutatud 01 08 2019].
- [4] „Aktiaselts Eleringi infokeskus,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://elering.ee/sites/default/files/public/Infokeskus/elering_vka_2018_web.pdf. [Kasutatud 07 03 2019].
- [5] „Eesti Taastuvenergia Koda, Taastuvenergia aastaraamat 2017,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.taastuvenergeetika.ee/wp-content/uploads/2018/06/Taastuvenergia-aastaraamat-2017.pdf>. [Kasutatud 07 03 2019].
- [6] „International Energy Agency, Market analysis and forecast from 2018 to 2023,“ 1 12 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.iea.org/renewables2018/>. [Kasutatud 07 03 2019].
- [7] „Eesti Energia, Viru Keemia Grupp, Kiviõli Keemiatööstus, TTÜ Virumaa kolledži Põlevkivi Kompetentsikeskus; "Põlevkivi aastaraamat",“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.ttu.ee/public/p/polevkivi-kompetentsikeskus/aastaraamat/Polevkivi_aastaraamat_EST_2018-06-27c.pdf. [Kasutatud 07 03 2019].
- [8] „Toetatavad tegevused,“ Keskkonna Investeeringute keskus, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.kik.ee/et/toetatavad-tegevused>. [Kasutatud 01 09 2019].
- [9] „Rahvusvahelised kokkulepped : Pariisi kokkulepe,“ Keskkonnaministeerium, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/kliima/rahvusvahelised-kokkulepped/pariisi-kokkulepe>. [Kasutatud 01 09 2019].

- [10] W. W. Fund, „Importance of Renewable Energy in the Fight against Climate Change,” *World Wildlife Magazine*, 2015.
- [11] N. Vidjajev, „MERELAINETE ENERGIA - TAASTUVA ENERGEETIKA KOLMAS SAMMAS,” TTÜ Bakalareuse töö, 2017.
- [12] M. Z. Jacobson, „Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security,” *Energy & Environmental Science*, nr 2, pp. 47-72, 2009.
- [13] M. Leppäranta ja K. Myrberg, *Physical Oceanography of the baltic sea*, Praxis, 2009.
- [14] I. Zaitseva-Pärnaste, „Wave Climate and its Decadal Changes in the Baltic Sea Derived from Visual Observations,” *TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY*, 08 11 2013.
- [15] O. Kovalevaa, M. Eelsalu ja T. Soomere, „Hot-spots of large wave energy resources in relatively sheltered sections of the Baltic Sea coast,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, p. 424–437, 2017.
- [16] „ The European Marine Energy Centre LTD: Technology Readiness Levels,” EMEC, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.emec.org.uk/services/pathway-to-emec/technology-readiness-levels/>. [Kasutatud 07 03 2019].
- [17] J. Cruz, *OceanWave Energy: Current Status and Future Prepectives*, Bristol: Garrard Hassan and Partners Limited, 2008.
- [18] P. Henderson, *Inorganic geochemistry*, London: Pergamon Press, 1985.
- [19] M. Leppäranta ja K. Myrberg, *Physical oceanography of the baltic sea*, Praxis Publishing LTD, 2009.
- [20] J.-V. Björkqvist, I. Lukas, V. Alari, G. P. van Vledder, S. Hulst, P. Pettersson, A. Behrens ja A. Männik, „Comparing a 41-year model hindcast with decades of wave measurements from the Baltic Sea,” *Ocean Engineering*, nr 152, pp. pp. 57-71, 2018.
- [21] „IP Ratings Explained,” The Enclosure Company, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.enclosurecompany.com/ip-ratings-explained.php>. [Kasutatud 01 09 2019].

- [22] M. Rahm, R. Waters, M. Eriksson, O. Danielsson, K. Thorburn, H. Bernhoff ja M. Leijon, „Full-Scale Testing of PM Linear Generator for Point Absorber WEC,” Upsala University, Upsala, 2005.
- [23] A. Kilk, Paljupooluseline püsimagnetitega sünkroongeneraator tuuleagregaatidele, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2008.
- [24] „Wind Zilla generator spec.,” Green Energy Star LTD, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.greenenergystar.com/shop/wind-generators/34-gs200w12v-charge-controller2.html>. [Kasutatud 02 03 2019].
- [25] D. Heslop, „An Introduction to MATLAB for Geoscientists,” Online Edition, 2012.
- [26] E. Tedeschi, M. Carraro ja M. Molinas, „Effect of Control Strategies and Power Take-Off,” *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, kd. 26, nr 4, 2011.
- [27] „Akromex: e-pood,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.akromex.com/eshop/product.php?id_product=186. [Kasutatud 10 10 2019].
- [28] E. Commission, „PVGIS,” PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP. [Kasutatud 10 10 2019].
- [29] J. J. W. Massie, Offshore Hydromechanics, Delft University of Technology, 2000.
- [30] L. H. Holthuijsen, Waves in Oceanic and Coastal Waters, Cambridge University Press, 2007.
- [31] „The State of the Art in Wave Interaction Analysis,” WAMIT , [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.wamit.com/>. [Kasutatud 10 02 2019].
- [32] S. Kão, „A Control System for a Wave Energy Converter for Optimum Power Production,” Deltares, University of Twente, Delft, 2014.
- [33] M. E. Tarmo Soomere, „On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast,” *Renewable Energy*, pp. 221-233, 2014.
- [34] B. Bosma , Z. Zhang, K. A. Ted, H. Brekken, T. Özkan-Haller, C. McNatt ja S. Yim, „Wave Energy Converter Modeling in the Frequency Domain: A Design Guide,” *IEEE*, 2012.

- [35] Newman ja J. Nicholas, Marine Hydrodynamics, Massachussets: MIT Press, pg 144, 1977.
- [36] J. Hooft, Hydrodynamic aspects of semi-submersible platforms, Delft, 1972.
- [37] „WAMIT,“ [Vörgumaterjal]. Saadaval: <http://www.wamit.com/>. [Kasutatud 10 February 2014].
- [38] L. S. Sterling, The Art of Agent-Oriented Modeling, London: The MIT Press, 2009.

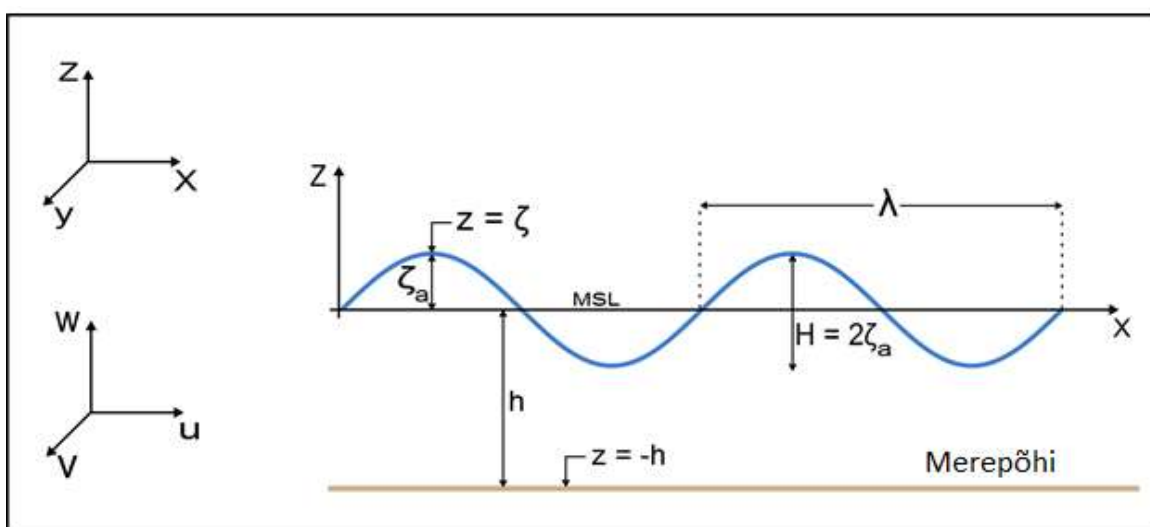
LISAD

Lisa 1 Teooria kasutatud lainete, energia ja võimsuse kirjeldamisel

Siin antakse ülevaade olulistest merelainetuse aspektidest, mis olid kasutatud antud töö raames merelainetuse muunduri matemaatilise prototüübi loomisel. Antakse teoreetiline taust olulistele lineaarse merelaineteooria aspektidele. Hea arusaamine sellest peatükist on oluline, selleks et tekiks arusaam, kuidas toimub merelainete energia muundamine elektriks. käesolevas peatükis esinevaid valemeid ja teooriat kasutatakse mere infrastruktuuri loomisel ja laevaehituses. Rohkem informatsiooni võib leida kirjandusest, näiteks [29], [30] [31].

Ookeani pinnalained

Tähised, mis on kasutatud selles lisa võivad olla kasutatud paremaks arusaamiseks lainete teooriast. Telgede süsteem, mis on näidatud Joonisel L1.1 kasutatakse kõikides käesoleva lõputöö lisades.



Joonis L1.1 Sümbolid ja teljed skemaatiliselt [32]

Harmonilise laine joonisel L1.1 võib kujutada pildina, kui laine läbilõige pildistada küljelt. Laine profiili näidatakse siin nagu kauguse funktsiooni x , mööda laine liikumise suunda fikseeritud ajahetkel. Eeldades et laine liigub positiivses x -suunas, laine profiili saab väljendada järgmiselt:

$$\zeta(x, t) = \zeta_a \cos(kx - \omega t) \quad (\text{L1.1})$$

Kus k on laine arv rad/m ja ω nurksagedus rad/s. ζ_a laine amplituud meetrites.

Monokromaatiliste lainete juures, lainete amplituud on pool laine kõrgusest:

$$H = 2\zeta_a \quad (\text{L1.2})$$

Lainete arv ja nurksagedus avaldub kasutades järgmisi suhteid:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (\text{L1.3})$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{L1.4})$$

Kus L on laine pikkus meetrites ja T laine periood sekundites.

Laine levimiskiirus on väljendatud järgmiselt:

$$c_p = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (\text{L1.5})$$

Regulaarsed lained

1. Energia regulaarsetes lainetes

Energiat lainetes võib jagada kaheks - kineetiline energia ja potentsiaalne energia. Kineetiline energia horisontaalse mere pindala ühiku kohta avaldub:

$$E_K = \frac{1}{4} \rho g \zeta_a^2 \quad (\text{L1.6})$$

Potentsiaalne energia horisontaalse mere pindala ühiku kohta avaldub:

$$E_P = \frac{1}{4} \rho g \zeta_a^2 \quad (\text{L1.7})$$

Siin on näha, et potentsiaalne ja kineetiline energia on võrdsed. Kogu energia horisontaalse mere pindala ühiku kohta avaldub:

$$E_T = E_K + E_P = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (\text{L1.8})$$

2. Võimsus regulaarsetes lainetes

Laine võimsust väljendame järgmiselt:

$$P_{wave_avg} = \frac{1}{4} \frac{\rho g \zeta_a^2 \omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 c_g \quad (L1.9)$$

Kus

$$c_g = \frac{\omega}{k} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right\} \quad (L1.10)$$

c_g on gruppi kiirus, teisisõnu laine energia transportimise kiirus

Keskmise võimsuse laineharja meetri kohta, väljundi saab väljendada ka sellisel kujul:

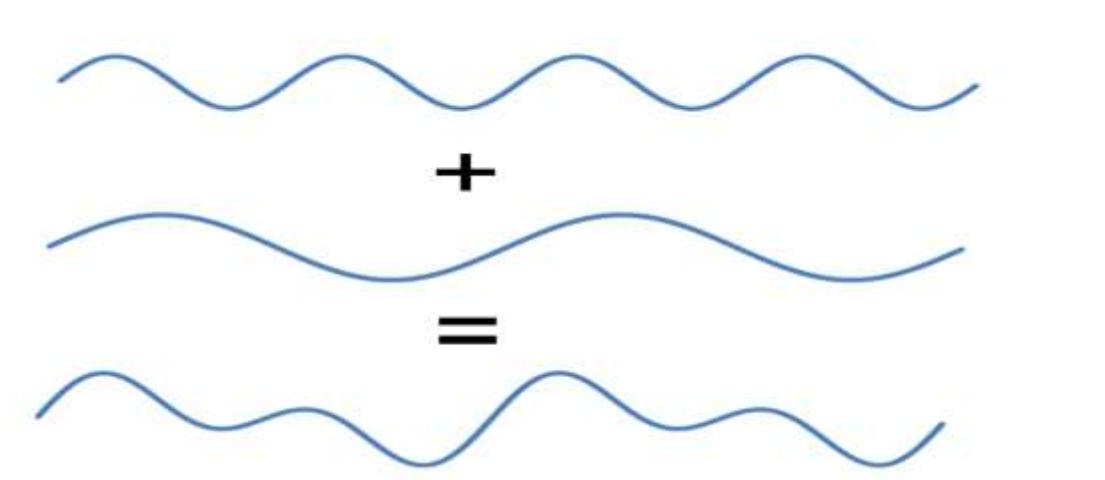
$$P_{wave_avg} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 c_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_g = E_T \cdot c_g \quad (L1.11)$$

Nagu on näha eelmises võrrandis, regulaarsete lainete keskmine võimsus on korrutis lainete energia pinnaühiku ja kiiruse millega seda energiat transporditakse.

Ebaregulaarsed lained

Siiamaani oleme töös vaadelnud ainult regulaarseid lained. Lineaarse laine teooriat käsitledes, regulaarsed lained omavad sarnast struktuuri, sama amplituudide ja sagedustega. Tegelikult lained meres omavad väga ebaregulaarset mustrit erinevate amplituudide ja sagedustega. On võimalik näidata ebaregulaarset merepinna lainetust kasutades lineaarse superpositsiooni

printsipi. Seega, liites kokku N regulaarsed laine komponendid saadakse kätte realistlikum lainetus (nt. Joonis L1.0.2).



Joonis L1.0.2 Superpositsioon regulaarsete lainete korral [32]

Laine profiili ebaregulaarsete lainete korral, mis levib positiivses x-suunas, võib kirjutada järgmiselt:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varphi_n) \quad (\text{L1.12})$$

Kus N on spektraal komponentide arv ja n on konkreetne monokromaatiline laine. ζ_{a_n} n - järgne laine komponent, k_n n- järgne lainete arv, ω_n n- järgne nurk sagedus φ_n n- järgne ebaregulaarse laine faasi nurk-komponent.

Kasutades Fourier analüüsi on võimalik kätte saada lainete amplituudi ζ_{a_n} kõikide lainete komponentide kohta, ebaregulaarsetes lainetuses mida võib esitada ajateljel peal. Kasutades lainetuse amplituudi võib leida ebaregulaarse lainetuse amplituudi muutlikust ja defineerida muutlikkuse spekter. Kuid, aga andmed muutlikkuse spektris baseeruvad diskreetsete sageduste põhjal, mis pole täiuslikult õiglane. Reaalses elus kõik lainetuse sagedused on erinevad meredes ja ookeanides. Sellepärast muutlikkuse jaotamine sageduse intervallis $\Delta\omega_n$ sagedusel ω_n avaldub lainetuse spektris nagu:

$$S_{\zeta}(\omega_n) \cdot \Delta\omega_n = \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2(\omega_n), \text{ Kus } \Delta\omega_n \rightarrow 0 \quad (\text{L1.13})$$

Kus $S_{\zeta}(\omega_n)$ on energia tihedus nurksagedusele ω_n .

Tihti on vaja teada ainult statistilisi omadusi ebaregulaarse lainetuse ajaloost. Sellepärast amplituudid ja sagedused jäetakse alles, aga faasi nurkade komponendid φ_n tühistatakse. Niimoodi toimub statistiliste andmete säilitamine.

1. Energia ebaregulaarsetes lainetes

Nullindat järku moment defineeritakse nagu spektri alune pindala (vt. Joonis L1.0.3) ja avaldatakse:

$$m_0 = \sum_{n=1}^N S_{\zeta}(\omega_n) \cdot \Delta\omega = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n}^2(\omega_n) \quad (\text{L1.14})$$

Laineenergia spekter näitab laineenergia jaotust üle sagedusriba. Korrutades kõverjoone aluse pindala, m_0 , koos ρg annab kogu energia laine spektris, lainete pinnaühiku kohta:

$$E_T = \rho g m_0 = \frac{1}{2} \rho g \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n}^2(\omega_n) \quad (\text{L1.15})$$

2. Võimsus ebaregulaarsetes lainetes

Eelnevalt määratletud laine spekter (valem L1.13), sisaldab kõiki regulaarsete lainete komponendid kindla aja jooksul, seda saab kasutada selleks, et tuletada avaldis keskmise võimsuse laineharja meetri kohta, ebaregulaarsete lainete korral:

$$P_{\text{wave_avg}} = E_T \cdot c_g = \rho g m_0 c_g = \frac{1}{2} \rho g \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n}^2 \cdot \frac{\omega_n}{k_n} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_n h}{\sinh 2k_n h} \right) \right\} \quad (\text{L1.16})$$

Seega ebaregulaarsetes lainetes ajakeskmise võimsuse parameeter on võimsuse komponentide summa, mis on seotud kõikide regulaarsete lainetega laine spektris.

JONSWAP spekter

Esimeses lähenduses saab lainetuse Läänemeres esitada JONSWAP spektri abil. Arvatakse, et Läänemere lainekliima vastab JONSWAP-i lainespektrile, mis on sobilik piiratud merede lainetuse arvestamiseks (*fetch-limited seas- ing*) [33].

Eksperimendid ja mõõtmised, mis on läbiviidud Põhjamere keskkonnas paljude aastate jooksul ja defineerivad lainetust Põhjameres kompaktses kujus, on teadlaskonnale tuttavad nagu JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project- ing.*). Analüüsides andmeid, mis olid kogutud JONSWAP projekti

raames, võime tulla järeldusele, et lainetus ei saa kunagi olla lõpuni uuritud. Kui JONSWAP lainetuse spekter on piiratud keskkonnas pindala poolt, spektri valem näeb välja järgmisena:

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{320 \cdot H_{1/3}^2}{T_p^4} \cdot \omega^{-5} \cdot \exp \left\{ \frac{-1950}{T_p^4} \cdot \omega^{-4} \right\} \cdot \gamma^{A_g} \quad (\text{L1.17})$$

Koos:

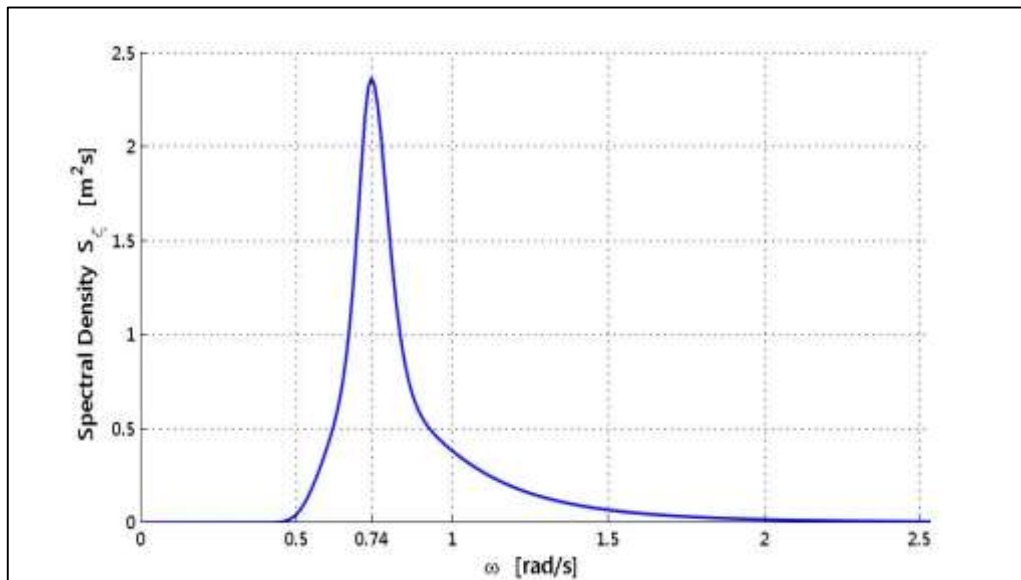
$$A_g = \exp \left\{ - \left(\frac{\omega/\omega_p - 1}{\sigma\sqrt{2}} \right)^2 \right\} \quad (\text{L1.18})$$

$$\begin{aligned} \sigma &= 0.07 \text{ if } \omega < \omega_p \\ \sigma &= 0.09 \text{ if } \omega > \omega_p \end{aligned} \quad (\text{L1.19})$$

$$\gamma = 3.3 \quad (\text{L1.20})$$

Üleval olevatest valemites, γ diagrammi teravuse faktor, mis juhib spektraalse maksimumi teravust, ja A_g normaliseerumise faktor. Andmed mis olid kogutud JONSWAP jooksul kasutati selleks, et määratleda ja pakkuda konstantide väärtused.

Näiteks Joonis L1.0.3 on loodud MatLab tarkvara abil simulatsioon, mis näitab JONSWAP spektri juhule, kui $H_s = 3m$ ja $T_p = 8.5s$.



Joonis L1.0.3 JONSWAP spekter kus $\omega_p = 0.74 \text{ rad/s}$ ($T_p = 8.5 \text{ s}$) [32]

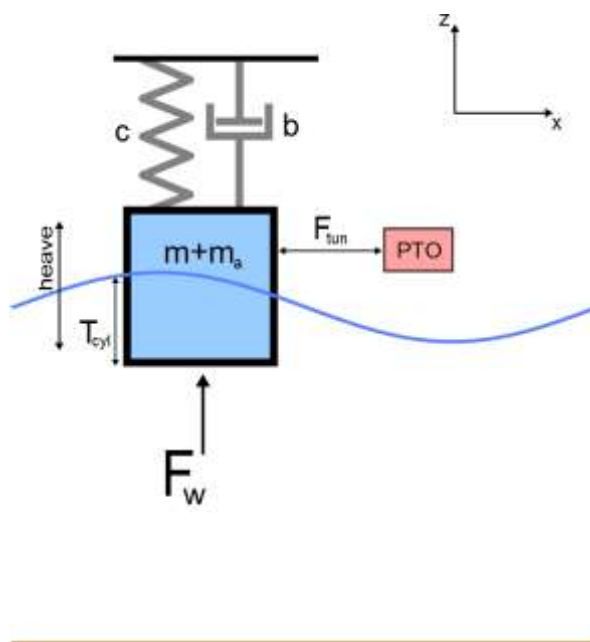
Joonis L1.0.3 näitab lainetuse energiat jaotatuna sageduse rea (ala) peal. Joonis L1.0.3 maksimumväärtus asub 0.74 rad/s juures, mis on samuti maksimum väärtuseks JONSWAP spektrile. See tähendab, et see maksimum väärtus vastab kõige kõrgemale energia sisaldusele antud spektris.

Lisa 2 Teooria kasutatud merelainete muunduri ujukeha modelleerimisel

Süsteemi mudel

Laineenergia muundur on modelleeritud jäiga kehana vees, täpsemalt vertikaalse silindrina. Tegelikult saab muundur liikuda kõigis kuues vabadusastmes, mis vastab suundadele edasi-tagasi liikumisele, kaldumisele ja veeremisele. Võimsuse eraldamisel on kõige olulisem vabadusaste - üles-alla liikumine (liikumine piki z-telge). Arvestades seda, modelleeritakse muunduri ühe vabadusastmega silindrina, milleks on üles alla-liikumine.

Muunduri dünaamikat saab kirjeldada sundmassi-vedru-summuti süsteemiga nagu on kujutatud Joonis L2. peal. Silindril on 1 vabadusaste ja sellele rakendatakse olemasolevat lainejõudu F_w üles liikumise suunas. Laine ergutusjõust põhjustatud vertikaalse silindri üles-alla liikumist kasutatakse energia muundamiseks jõu eraldamise seadme (antud lõputöös generaator) kaudu.



Joonis L2.1 Mass-vedru-sumbumis süsteem [32]

F_w on süsteemi mõjutav lainejõud, T_{cyl} on silindri süvis, m ja m_a on vastavalt silindri mass ja lisatud mass, c on vedru taastumis koefitsient, b hüdrodünaamiline sumbumistegur, PTO on generaatori jõuvõtuvõll. Seadme korral on F_{tun} generaatori jõuvõtuvõllist tulenev häälestamisjõud.

Sagedusala analüüs

Süsteemi saab analüüsida sagedusalas. See lähenemisviis on laineenergiatööstuses väga levinud ja see on hea meetod algsete projekteerimisparameetrite valimisel ja esmakujutuse saamiseks seadmest. Sageduspiirkonna analüüsi negatiivne külg on see, et see põhineb lineaarsetel eeldustel ja ei arvestata paljusid mittelineaarseid mõjusid, mis muutuvad silmapaistvaks kõrgetes ja ekstreemsetes mereoludes [34]. Seda peab arvesse võtma tulemuste Interpreteerides. Kokkuvõttes on sagedusala kasulik meetod väljundvõimsuse omaduste hindamiseks. Lisaks saab sageduspiirkonnast ajast sõltuva vastuse saada, kasutades superpositsiooni printsiipi.

Esiteks koostatakse väljapakutud süsteemi liikumisvõrrandid ja lahendatakse muunduri üles alla liikumise amplituudi vältel. Seejärel arutatakse seotud parameetreid.

Newtoni teise seaduse kohaselt on selle süsteemi liikumisvõrrand vastava tõusulaine korral järgmine:

$$m\ddot{z} = F_h + F_{PTO} + F_{tun} + F_w \quad (L2.1)$$

Kus: F_h on hüdromehaaniline jõud, F_{PTO} mehaaniline summutusjõud, F_{tun} häälestamisjõud ja F_w on olemasolev lainejõud

Hüdromehaaniline koormus F_h koosneb lisatud inertsjõust $m_a\ddot{z}$, hüdrodünaamilisest summutusjõust $b_{hyd}\dot{z}$ ja vedru taastamis jõust $c z$:

$$F_h = -m_a\ddot{z} - b_{hyd}\dot{z} - c z \quad (L2.2)$$

Kus: m_a lisatud mass, b_{hyd} hüdrodünaamilise summutuse koefitsient ja c vedru taastamise koefitsient.

Kuna muunduri liikumisest on vaja energiat ära kasutada, lisatakse jõuvõtuvõlli (generaatori) süsteem. Jõuvõtuvõlli näide on generaator. Jõuvõtuvõlli on võimalik modelleerida mehaanilise summutusjõuna, mida iseloomustab mehaaniline sumbuvustegur b_{PTO} :

$$F_{PTO} = -b_{PTO}\dot{z} \quad (L2.3)$$

Seadme jõudluse optimeerimiseks on lisatud häälestamisjõud ja selle peamine ülesanne on muuta süsteemi loomulikku nurksagedust. See häälestamisjõud koosneb mehaanilisest vedru avaldisest k_{spring} :

$$F_{tun} = -k_{spring}z \quad (L2.4)$$

Ja olemasolev jõud F_w on lainejõud, mis avaldab süsteemile mõju keha liikumise (üles -alla) suunas.

Kirjeldatud jõudude abil saab liikumisvõrrand võrrandis L2.1:

$$m\ddot{z} = F_h + F_{PTO} + F_{tun} + F_w \quad (L2.5)$$

$$m\ddot{z} = -m_a\ddot{z} - b_{hyd}\dot{z} - cz - b_{PTO}\dot{z} - k_{spring}z + F_w \quad (L2.6)$$

$$(m + m_a)\ddot{z} + (b_{hyd} + b_{PTO})\dot{z} + (c + k_{spring})z = F_w \quad (L2.7)$$

Lainejõudu saab väljendada järgmiselt:

$$F_w(t) = \Re\{F_{w_a}e^{-i\omega t}\} \quad (L2.8)$$

Kus F_{w_a} on lainejõu amplituud ja $\Re$ tähistab sulgude vahelise kompleksvõrrandi reaalsel osa.

Samamoodi kirjeldades üles-alla liikumist avaldub:

$$z(t) = \Re\{z_a e^{-i\omega t}\} \quad (L2.9)$$

Kus z_a on üles-alla liikumise amplituud.

Kasutades (L2.9) saame tuletada:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \Re\{-i\omega z_a e^{-i\omega t}\} \\ \ddot{z} &= \Re\{-\omega^2 z_a e^{-i\omega t}\} \end{aligned} \quad (L2.10)$$

Kasutades valemeid (L2.10), (L2.9) ja (L2.8), liikumisvõrrandi kompleks kujul avaldub:

$$z_a \{(c + k_{spring}) - \omega^2(m + m_a)\} - i\omega(b_{hyd} + b_{PTO}) = F_{w_a} \quad (L2.11)$$

$$z_a = \frac{F_{w_a}}{\{(c + k_{spring}) - (m + m_a)\omega^2\} - i\omega(b_{hyd} + b_{PTO})} \quad (L2.12)$$

Üles-alla amplituudi absoluutväärtuse saamiseks võetakse selle kompleks avaldise moodul:

$$|z_a|^2 = z_a \cdot \overline{z_a} \quad (L2.13)$$

Kus $\overline{z_a}$ on kompleks pöördväärtus kompleksarvu z_a .

$$|z_a|^2 = \frac{F_{w_a}}{\{(c + k_{spring}) - (m + m_a)\omega^2\} - i\omega(b_{hyd} + b_{PTO})} \cdot \frac{F_{w_a}}{\{(c + k_{spring}) - (m + m_a)\omega^2\} + i\omega(b_{hyd} + b_{PTO})} \quad (L2.14)$$

$$|z_a| = \frac{F_{w_a}}{\sqrt{\{(c + k_{spring}) - (m + m_a)\omega^2\}^2 + \omega^2(b_{hyd} + b_{PTO})^2}} \quad (L2.15)$$

Parameetrite kirjeldus

Lisatud mass m_a

Lisatud massi võib pidada süsteemi täiendavaks kaaluks, kuna keha peab kiirendades või aeglustades liigub ümbritseva vedeliku osaga. Sellel on massi parameetrid ja see sõltub ujuva konstruktsiooni geometriast. Ketassilindri jaoks arvutatakse see lisatud massina ümber kera [35]:

$$m_a = \frac{2}{3} \rho_w \pi R_{cyl}^3 \quad (L2.16)$$

Kus:

ρ_w – Merevee tihedus ja R_{cyl} – Silindri raadius

Lineaarne hüdrodünaamiline sumbumis tegur b_{hyd}

Vees vertikaalselt võnkuv muundur tekitab laineid, mis levivad sellest eemale. See protsess võtab osa energiat muundurilt kuni võnkumise kustumiseni. Hüdrodünaamiline sumbumisjõud on võrdeline muunduri kiirusega $\dot{z}$ ja selle koefitsient b_{hyd} on mass ajaühiku kohta. J. P. Hooft pakkus välja potentsiaaliteoorial põhineva meetodi hüdrodünaamilise summutuskoefitsiendi arvutamiseks [36]:

$$b_{hyd} = \nu \int_0^{2\pi} \left(\frac{F_{w_a}(\mu)}{\zeta_a} \right)^2 d\mu = 2\pi\nu \left(\frac{F_{w_a}}{\zeta_a} \right)^2 \quad (L2.17)$$

Kus:

F_{W_a} – Laine jõu amplituud

μ – Laine suund kraatides

(L2.18)

$$v = \frac{\omega^3 \cos h^2 kh}{4\pi\rho g^3 kh \tan h kh (1 + \frac{\sin h^2 kh}{2kh})}$$

Valemis (L2.17) integraal väheneb 2π suuruses, silindri pärast, $\frac{F_{W_a}}{\zeta_a}$ on übermõõdu piires

konstantne ja seetõttu pole laine suund oluline. Tegelikult suurendavad seda sumbumist täiendavad mõisted, näiteks hõõrdumine ja keerised. Kuid neid peetakse marginaalseks suuremate ujuvkonstruktsioonide jaoks.

Vedru taastumis koefitsient c

MSD-süsteemi vedrutegur on seotud taastamisjõuga, mida vedru võib tekitada nihke korral meetri kohta, ja see arvutatakse järgmise valemi abil:

$$c = \rho_w g A_{wl} \quad (L2.19)$$

Kus A_{wl} on mere pindala mida muundur katab.

Mehaaniline sumbumistegur b_{PTO}

Mehaaniline sumbumistegur pärineb jõuvõtuvõllilt (generaatorilt) ja seda saab kasutada jõu ammutamiseks muunduri üles-alla liikumiste summutamisel. See ei sõltu laine sagedusest ja süsteemi kasutaja saab seda reguleerida. Lisaks eeldatakse, et sumbumine on lineaarne, mis on võrdeline muunduri kiirusega.

Häälestamisjõud F_{tun}

Seadme loomulikku sagedust saab muuta, lisades täiendava massi parameetri või täiendava vedru parameetri. Otsustatakse lisada täiendav vedru parameeter, mida käesolevas lõputöös on kujutatud mehaanilise vedru koefitsiendi näol k_{spring} .

Laine jõud

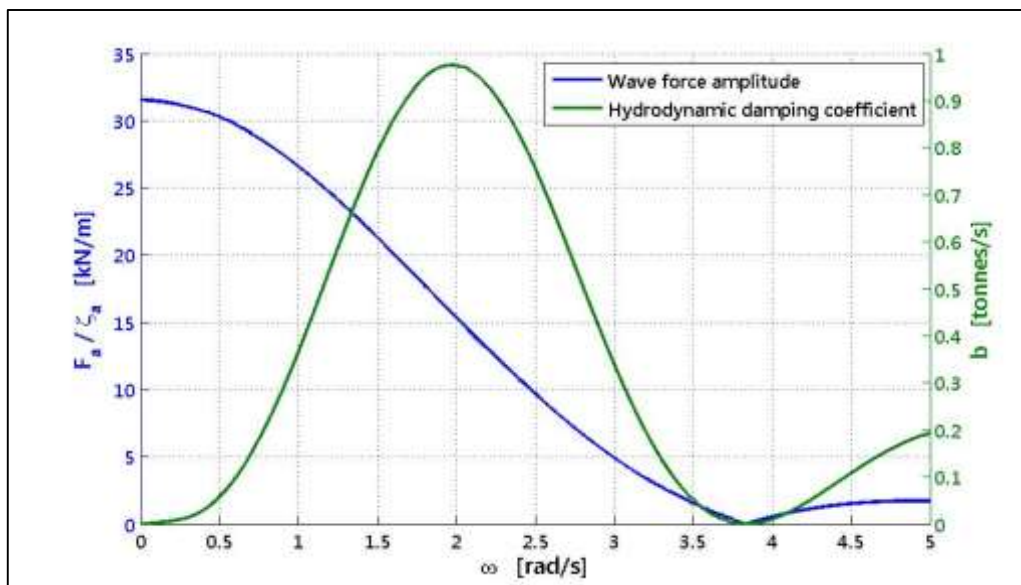
Lainejõu amplituud väljendatakse järgmise valemiga:

$$F_{w_a} = \zeta_a e^{-kT_{cyl}} \sqrt{(c - m_a \omega^2)^2 + (b_{hyd} \omega)^2} \quad (L2.20)$$

Lainejõu amplituud määratakse Hoofti valemi abil:

$$b_{hyd} = 2\pi v \left(\frac{F_{w_a}}{\zeta_a} \right)^2 \quad (L2.21)$$

Hoofti valem asendatakse valemis (L2.21) ja lainejõu amplituud määratakse iteratsiooniga. Allolev joonis on näide lainejõu amplituudist ja hüdrodünaamilisest sumbumistegurist, mis on määratud silindri jaoks $R = 1\text{m}$.



Joonis L2.2 Lainejõud koos difraktsiooniga ja hüdrodünaamilise sumbumise silindril, mille $R = 1\text{m}$ ja $T_{cyl} = 1\text{m}$

Joonis L2.2 peal [32] on näha, et sagedusalas 3,8 rad / s lähevad mõlemad read nulli ja suurenevad siis taas. Tegelikult ei tohiks lainejõu amplituud ja hüdrodünaamiline sumbumine pärast nulli jõudmist suurened. Seda nähtust seletatakse esimese avaldisega ruutjuure all valemis L2.20. Sageduse suurenemisel läheb väljund negatiivseteks väärtusteks, kuid lõppeb positiivsega, kuna väljund ise on ruudus. Meie puhul on lisatud mass püsiväärtus. See nähtus ei juhtu tõenäoliselt siis,

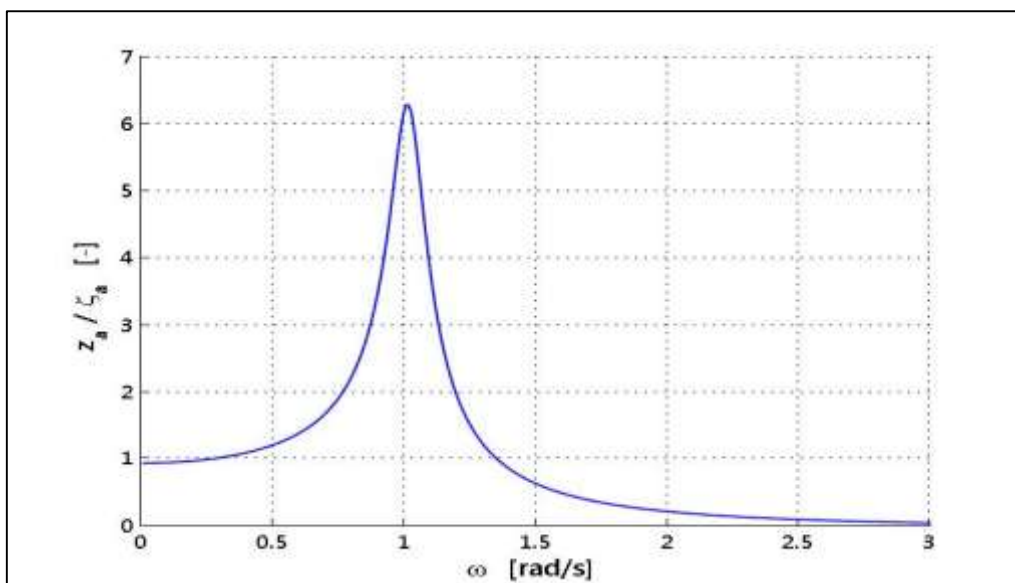
kui lisatud mass määratakse pigem sageduse funktsioonina, kuna lisatud mass väheneb sageduse suurenemisega veidi, nagu näitas Wellens oma töös [37].

Nende tulemuste kasutamiseks otsustatakse seada kõik hüdrodünaamilise sumbumisteguri ja lainejõu amplituudi väärtused nulli pärast sageduspunkti, kui nad esimest korda nulli lähevad. Tulevaste soovitude saamiseks on soovitatav kasutada hüdrodünaamiliste parameetrite arvutamiseks tarkvara pakette, nt. WAMIT.

Reageerimise amplituudioperaator

Reageerimise amplituudioperaator (RAO) on mõõtmata suurus, mis kirjeldab süsteemi reageeringut langevale lainele (vt Joonis L2.3). RAO on kõrguse amplituudi suhe laine amplituudini ja selle saamiseks kasutatakse valemeid (L2.15) ja (L2.20):

$$RAO = \frac{z_a}{\zeta_a} = e^{-kT_{cyl}} \sqrt{\frac{(c - m_a \omega^2)^2 + (b_{hyd} \omega)^2}{((c + k) - (m + m_a) \omega^2)^2 + \omega^2 (b_{hyd} + b_{PTO})^2}} \quad (L2.22)$$



Joonis L2.3 1 m raadiusega silindri RAO [32]

Ülaltoodud joonisel on x-telg lainete sagedus rad / s ja y-telg on üles – alla liikumise amplituudi ja laine amplituudi suhe. On näha, et pikema (st väikese ω) lainepikkuse korral järgib seade laineid ja RAO on lähedane 1. Väljund on suurim süsteemi loomuliku sagedusega, mida tähistab graafiku tipuna. Kui laine sagedus suureneb pärast loomulikku sagedust, hakkavad lained oma mõju seadmele kaotama ja väljund kipub olema 0.

Elektri edastamine regulaarsetest lainetest

Nagu varem mainiti, lisatakse meie süsteemi jõuvõtuvõlli (generaator) seade, et muunduri liikumisest energiat absorbeerida ja muuta see kasulikuks energiavormiks. See jõuvõtuvõlli seade avaldab võnkumisel silindril mehaanilist sumbumisjõudu. Sumbumine eeldatakse olevat lineaarne. Jõuvõtuvõlli abil eraldatud võimsus saadakse jõuvõtuvõlli võnkesilindril avaldatava jõu korrumtamisel koos silindri võnkekiirusega.

$$P_{ext} = F_{PTO} \cdot \dot{z} = b_{PTO} \dot{z} \cdot \dot{z} = b_{PTO} \dot{z}^2 \quad (L2.23)$$

Valemist järeldub:

$$\dot{z} = -z_a \omega \sin(\omega t) \quad (L2.24)$$

Kus keskmine võimsus aja intervallis T on

$$P_{ext_avg} = \frac{1}{T} \int_0^T b_{pto} \dot{z}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T b_{PTO} z_a^2 \omega^2 \sin^2(\omega t) \cdot dt = \frac{1}{2} b_{PTO} z_a^2 \omega^2 \quad (L2.25)$$

Asendades valemist (L2.15) - z_a asemele, saadakse keskmine võimsuse ülekandmine järgmise avaldisega:

$$P_{ext_avg} = \frac{b_{PTO} \omega^2 F_{wa}^2}{2 \left[\left((c + k_{spring}) - (m + m_a) \omega^2 \right)^2 + \omega^2 (b + b_{PTO})^2 \right]} \quad (L2.26)$$

Elektria edastamine ebaregulaarsetest lainetest

Arvestades, et ebaregulaarsed lained esindavad reaalsusele lähedal meresid ja ookeane, on vaja tuletada avaldus võimsuse ammutamiseks ka ebaregulaarsete lainete korral. Laine energiaspekter oli varem määratletud valemities nagu:

$$S_{\zeta}(\omega) \cdot \Delta\omega = \frac{1}{2} \zeta_a^2(\omega) \text{ with } \Delta\omega \rightarrow 0 \quad (L2.27)$$

Sellega seoses saadakse vastuse spekter järgmisel viisil:

$$S_z(\omega) \cdot \Delta\omega = \frac{1}{2} z_a^2(\omega) = \left(\frac{z_a}{\zeta_a}(\omega) \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \zeta_a^2(\omega) = \left(\frac{z_a}{\zeta_a}(\omega) \right)^2 \cdot S_{\zeta}(\omega) \cdot \Delta\omega \quad (L2.28)$$

Kui korrutada iga regulaarne laine komponent ülekandefunktsiooniga $\left(\frac{z_a}{\zeta_a}(\omega) \right)$ (s.o RAO)

saadakse regulaarsed sünkroonkomponendid, mida saab seejärel kasutada üles-alla liikumise väljund spektri määratlemiseks. Sarnaselt lainespektris saadaolevale võimsusele (valem L2.16), avaldub keskmine võimsus lihtsalt spektri komponentidega seotud üksikute energiakomponentide liitmisel:

$$P_{\text{ext_avg}} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N b_{PTO} \omega_n^2 z_{a_n}^2 = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N b_{PTO} \omega_n^2 RAO_n^2 \zeta_{a_n}^2 \quad (\text{L2.29})$$

Optimaalsed tingimused regulaarsetes lainetes

Mõningaid süsteemi parameetreid saab kasutaja muuta. Seda tehakse võimalikult suure energia hulga ammutamise huvides. Regulaarsete lainete optimaalsed tingimused on laineenergia tööstuses üldteada.

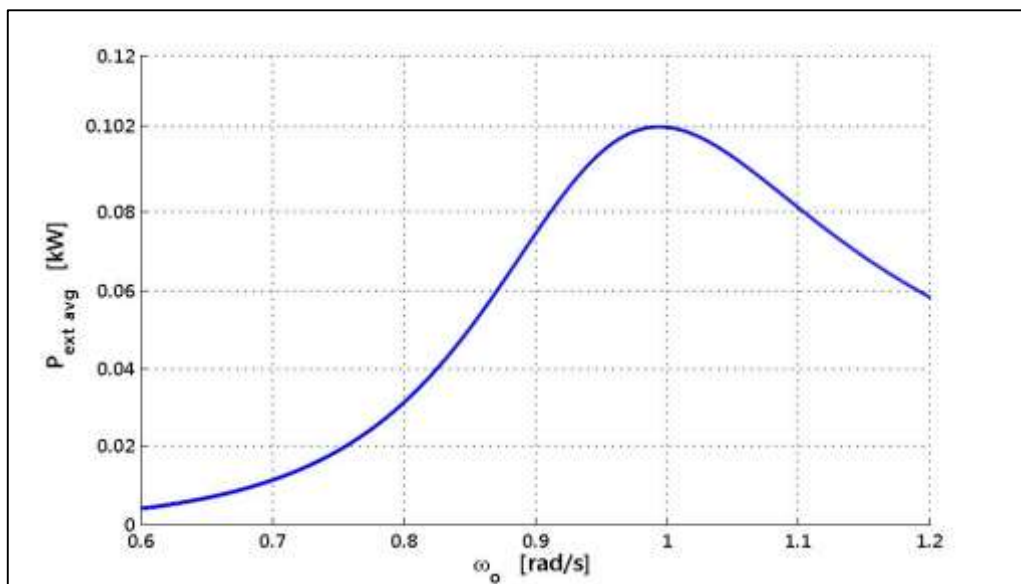
Optimaalse sageduse tingimus

Esimene huvipakkuv optimeerimisparameeter on üles-alla liikuva muunduri sagedus, mida kasutaja saab mehaanilise vedru parameetri abil muuta (k_{spring}). Leiti, et väljundvõimsus on maksimaalne, kui muundur võngub selle sumbumata resonantssagedusel:

$$\omega = \sqrt{\frac{c + k_{\text{spring}}}{m + m_a}} = \omega_0 \quad (\text{L2.30})$$

Resonantsnähtus saavutatakse siis, kui süsteemi loomulik sagedus on täpselt kooskõlas erutusjõuga, milleks antud juhul on lainejõud. Kui iga lainejõu tsüklil on täpselt kooskõlas iga süsteemi tsükliga, siis võnke amplituud kasvab märkimisväärselt ja annab seega suurema väljundvõimsuse.

Näitena valitakse sisendiks regulaarne laine sagedusega 1 rad / s ja määratakse keskmine energiavõimsus sõltuvalt süsteemi loomulikust sagedusest. Välise summutuskoefitsiendi b_{PTO} konstantseks väärtuseks seatakse 1000 tonni / s. Teoreetiliselt peaks energiavõtt olema suurim, kui loomulik sagedus on võrdne sisendlaine sagedusega 1 rad / s (vt Joonis L2.4).



Joonis L2.4 Keskmine võljundvõimsus sõltuvalt süsteemi loomulikust sagedusest regulaarse laine puhul kiirusega 1 rad / s [32]

Joonis L2.4 tähistab x-telg seadme loomuliku sagedust. Ja tõepoolest, maksimaalne võimsuse ülekandmine 0,102 kW toimub siis, kui muunduri loomulik sagedus on 1 rad / s, mis on ka simulatsiooni laine sagedus.

Lisa 3 Teooria kasutatud merelainete muunduri ujukveha modelleerimisel

Optimaalne sumbumisseisund

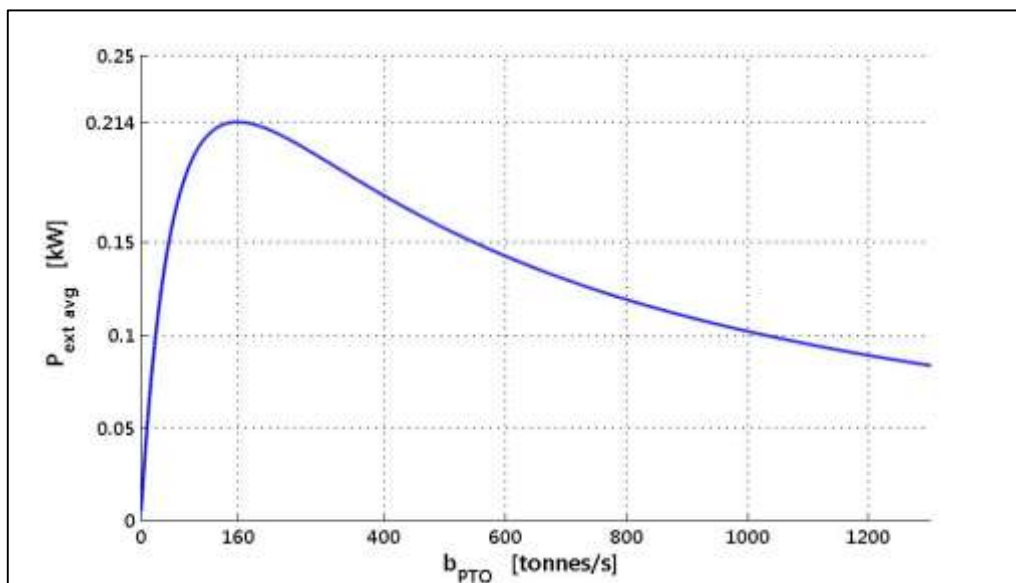
Teine optimeerimisparameeter on mehaaniline sumbumistegur b_{PTO} , mis on osa generaatorist ja mida kasutaja saab muuta. Selleks et määrata b_{PTO} iga sageduse juures, võetakse keskmise võimsuse ülekandmise tuleks välise sumbumisteguri suhtes ja saadakse järgmine tulemus:

$$b_{PTO} = b_{hyd} \quad L3.1$$

See tähendab, et optimaalne väljundvõimsus saadakse kätte, kui muundur võngub loomuliku sagedusega ja mehaaniline sumbumistegur sellel sagedusel on võrdne hüdrodünaamilise sumbumisteguriga.

Esimeses simulatsioonis määrati mehaaniline sumbumistegur väärtuseks 1000 tonni / s. Selles katses seatakse loomulik sagedus väärtusele 1 rad / s ja määratakse eelneva simulatsiooni korral

sama tavalise laine mehaanilise sumbumis teguri funktsioonina energiatarbimine. Tulemused on esitatud Joonis L3.1 peal.



Joonis L3.1 Keskmine energiavõimsus mehaanilise summutuse koefitsiendi funktsioonina [32]

Joonis L3.1 peal on näha, et võimsuse eraldumine suureneb 0,214 kW-ni, kui mehaaniline sumbumistegur on 160 tonni / s. See on märgatav tõus võrreldes esimese katsega Joonis L2.1 peal, kus keskmine energiavõimsus oli 0,102 kW mehaanilise sumbumisteguriga 1000 tonni / s.

Selles simulatsioonis on hüdrodünaamilise sumbumisteguri väärtus kiirusel 1 rad / s võrdne 159,7 tonni / s, mis on peaaegu identne sumbumisteguri väärtusega 160 tonni / s. See kontrollib tuletatud regulaarsete lainete teist optimaalset tingimust, mis tõestab, et maksimaalne võimsuse ülekandmine toimub siis, kui mehaaniline sumbumistegur on võrdsustatud hüdrodünaamilise sumbumisteguriga.