



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Andrus Andritski

**ELEKTRIENERGIA SALVESTAMINE JA OSTU-MÜÜGI
KASUMLIKKUS ERAMUS**

ENERGY ARBITRAGE OPPORTUNITIES IN RESIDENTIAL
BUILDINGS

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2024

Eesti Maaülikool Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Andrus Andriiski		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Elektrienergia salvestamine ja ostu-müügi kasumlikkus eramus			
Lehekülgi: 38	Jooniseid: 12	Tabeleid: 2	Lisasid: 1
<p>Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika</p> <p>4.17 Energeetikaalased uuringud</p> <p>T140 Energeetika</p> <p>Juhendaja: Andres Annuk, <i>PhD</i></p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2024</p>			
<p>Elektrienergia salvestamisel on suur roll taastuenergiaallikate kasutamisel. Taastuenergiaallikad nagu päikesepargid ja tuulepargid muundavad energiat elektrienergiaks sobivatel meteoroloogilistel tingimustel, mille tõttu on parkide tootlus vahelduv ja raskesti prognoositav. Elektrienergia salvestite olemasolu ja töö võrgus balansseerib elektribörsi tipu- ja miinimumhindasid keskmise suunas. Elektrienergia börsihind kujuneb nõudluse ja pakkumise suhtena. Töö eesmärk on analüüsida 2023. aasta elektrienergia börsihindasid, märkida igas ööpäevas tunnid mil elektrienergia hind soosib arbitraaži eesmärgil elektrienergia salvestamist ja võrgusuunalist tühjendamist ja luua mudel hinnamuutuste kasutamiseks, võrrelda kulusid ja tulusid, analüüsida ja hinnata kas selline süsteem on majanduslikult tasuvust. Eesmärgi täitmisel kirjeldati kaasnevat tehnoloogiat ja arvestati võimalike lisakuludega. Analüüsi teel leiti, et energia salvestamine ostu-müügi eesmärgil ei ole kasumlik ja tasuvusaeg ületab süsteemi eluea. Energia salvestamine toimub talvekuudel öösiti ja suvekuudel päeval, millal elektrienergia hind minimaalne. Edasistes uuringutes soovin tähelepanu pöörata liitiumioon akude hinna langustrendile, salvestamisele öösiti ja energia salvestamist taastuenergiaallikatelt.</p>			
Märksõnad: energia salvestamine, elektribörs, elektrienergia arbitraaž, liitiumioon aku, inverter, mikrotootja			

Estonian University of Life Sciences Fr. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Andrus Andritski		Curriculum: Engineering	
Title: Energy arbitrage opportunities in residential buildings			
Pages: 38	Figures: 12	Tables: 2	Appendixes: 1
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17 Energetic Research T140 Energy Research Supervisor: Andres Annuk, <i>PhD</i> Place and date: Tartu 2022			
<p><i>Electrical energy storage plays an essential role in using renewable energy sources. Such sources like solar parks and wind parks largely depend on suitable meteorological conditions to convert solar and wind energy to electrical energy. Reliance on such conditions makes it difficult to forecast the yield of such energy sources. The presence and the work of energy storage devices balance electricity prices towards the average. Energy price is based on the demand and supply of electrical energy. The goal of the thesis is to analyse 2023. electrical energy price, find suitable hours for storing and selling electrical energy, and create a model for exploiting the price differences, comparing the costs and profits and analysing if energy arbitrage in a residential building is profitable. Analysis showed that energy arbitrage is not profitable, and the payback period of such a system exceeds the life span of the energy storage device. Electrical energy prices are lowest during the day in the summer and the lowest during the night in the winter, which affects the energy consumption tax. Future research focuses on the downward trend of lithium-ion battery prices, storing energy during the night to minimise energy consumption tax costs and storing energy directly from renewable energy sources.</i></p>			
Keywords: energy storage, electrical exchange, electricity arbitrage, lithium-ion battery, inverter, micro energy producer			

SISUKORD

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	5
SISSEJUHATUS	6
1. ELEKTRIENERGIA SALVESTAMINE	7
1.1. Taastuenergiaallikate ebastabiilsus	7
1.2. Energiasalvestite liigitus ja põhiparameetrid.....	7
1.3. Pump-hüdroakumulatsioonijaam	9
1.4. Hooratasenergiasalvestid	10
1.5. Liitiumioonaku	10
2. ELEKTRITOOTJA LIITUMINE.....	12
2.1. Elektritootjast üldiselt.....	12
2.2. Nanotootja	13
2.3. Mikrotootja.....	15
2.4. Elektritootja	16
3. ELEKTRIENERGIA SALVESTAMISE KULUD	18
3.1. Elektribörs	18
3.2. Võrguteenus.....	18
3.3. Salvestusseade	19
4. ANALÜÜS	23
4.1. Lühike periood.....	23
4.2. Pikk periood.....	29
KOKKUVÕTE	33
KASUTATUD KIRJANDUS	34
LISAD	37
Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	38

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

C	-	energiasalvesti mahutavus, kWh
P	-	võimsus, kW
t	-	aeg, h
H_{3t}	-	kolme tunni börsihind, €/MWh
$H_{01:00}$	-	määratud tunni börsihind, €/MWh
$E_{salvestatud}$	-	salvestatud elektrienergia kogus, kWh
$H_{salvestamine}$	-	salvestatud elektrienergia maksumus, €
$H_{tühjendamine}$	-	tühjendatud elektrienergia tulu, €
$H_{võrguteenus}$	-	võrguteenuse maksumus, €
$HVT_{päev}$	-	võrguteenuse marginaali päevane maksumus, €
$HVT_{öö}$	-	võrguteenuse marginaali öine maksumus, €
H_{mmk}	-	müügitasu, €
H_{kasum}	-	kasum, €
$t_{tasuvusaeg}$	-	tasuvusaeg, aastat

SISSEJUHATUS

Elektrienergia börsihind on heitlik ja muutub iga tund [1]. Elektri hind kujuneb Põhjamaade ja Baltikumi elektribörsil nõudluse ja pakkumise suhtena [2]. Vaadeldes börsi hindasid kahekümne nelja tunnistes tsüklites on iga päev teatud arv hetki, kus elektrienergia börsihind on kõrge ja tunde, mil elektrienergia börsihind on madal. Oma tarbimist optimeerida vastavalt tundidele, mil elektrienergia hind on madal, on üks võimalus muutliku börsi hinda enda kasuks pöörata, ent see ei ole alati sobilik lahendus. Elektrienergia salvestamiseks on võimalik kasutada energiasalvesteid [3].

Arbitraaž on väärtpaberite, kauba või teenuse ostmine ja hilisem müümine kasumi saamise eesmärgil. Elektrienergia arbitraaž on sisuliselt energia salvestamine salvestisse börsi soodsatel tunni hindadel ja tühjendamine ehk tagasimüümine börsi kõrgetel tunni hindadel. Teema on valitud, et analüüsida, kas arbitraaži eesmärgil on võimalik kasumit teenida arvestades elektri börsihindasid aasta lõikes ja selleks vajamineva süsteemi kulusid. Uuritakse süsteemi tasuvusaega ja eluiga. Antud teema on aktuaalne, mitmed ettevõtted tegelevad ja turundavad energiasalvestite paigaldamist ja süsteemide paigaldamist arbitraaži nimel, ent tasuvusaja kohta on vähe kättesaadavat informatsiooni. Finantsiline ajend tõstaks inimestel huvi paigaldada salvestusseadmeid, mis salvestavad energiat vähese nõudluse ajal ja tühjendavad kõrge nõudluse hetkedel, mis aitavad tasakaalustada elektrienergia börsihindasid vähendades nõudlust tiputundidel.

Töö eesmärk on analüüsida 2023. aasta elektrienergia börsihindasid, märkida igas ööpäevas tunnid mil elektrienergia hind soosib arbitraaži eesmärgil energia salvestamist ja tühjendamist ja luua mudel hinnamuutude ekspluateerimiseks, võrrelda kulusid ja tulusid, analüüsida ja hinnata kas selline süsteem on majanduslikult tasuv. Eesmärgi täitmisel kirjeldada kaasnevat tehnoloogiat ja arvestada võimalike lisakuludega.

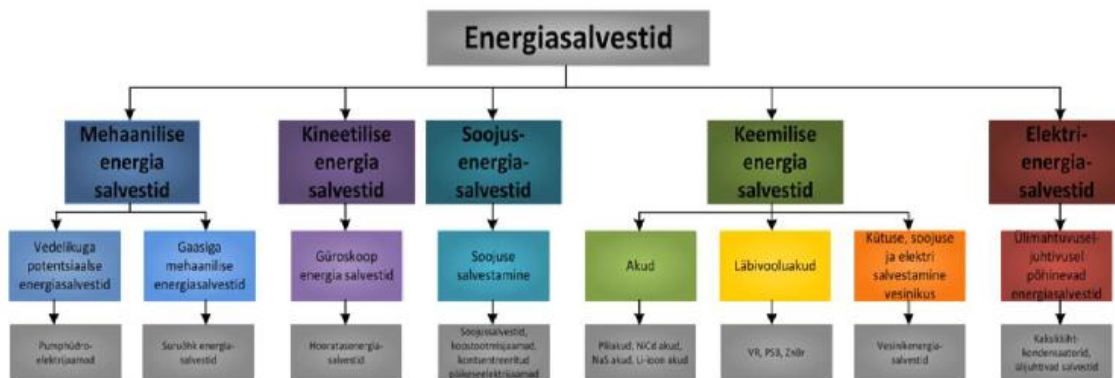
1. ELEKTRIENERGIA SALVESTAMINE

1.1. Taastuenergiaallikate ebastabiilsus

Eesti riikliku energia- ja kliimakavas aastani 2030 on kirjeldatud, et strateegia Eesti 2035 kohaselt on Eesti kliimaneutraalne riik aastaks 2050 ja aastaks 2030 on Eesti elektritarve täies mahus kaetud taastuvelektriga [4]. Üks põhilisi katsumusi taastuvate energiaallikate alal on taastuenergiaallikate ebastabiilsus tootmisel. Päikeseenergiat ja tuuleenergiat saab muundada elektrienergiaks vaid siis, kui meteoroloogilised tingimused seda soosivad. Seda probleemi saab osaliselt lahendada energia salvestamisega. Suuremõõtmelised pump hüdروenergia salvestamise tehnoloogiad, Eestis vähe kasutatud teised gravitatsioonilise energia salvestamise meetodid, laialdaselt levinud liitiumioon ja pliiakud on mõningad võimalused kuidas elektrienergiat salvestada [5]. Taastuenergiaallikate ebastabiilsus on ka osaliselt põhjus miks elektrienergia börsihindadel on nii suured kõikumised – päikesepaistelisel suvisel päeval on elektrienergia börsihind üldjuhul madal, öösel aga võrdlemisi kõrge, sest siis ei saa päikeseenergiat muundada elektrienergiaks.

1.2. Energiasalvestite liigitus ja põhiparameetrid

Energiasalvestusseade tööpõhimõte on elektrienergia allikast, üldjuhul elektrivõrgust, võetud elektrienergia muundada teise energialiiki, mida on lihtne salvestada. Hilisemal hetkel muundatakse energiasalvestis salvestatud energia tagasi elektrienergiaks, mis omakorda suunatakse tagasi elektrivõrku või tarbitakse ära. Energiasalvestite töötükk ei ole täielikult tõhus ja selle tõttu erineb võrku antud elektrienergia võrgust võetud energiast salvestussüsteemi kadude võrra [6].



Joonis 1. Energiasalvestite liigitus [6]

Elektrienergia arbitraaži teostamiseks on kõige otstarbekam energiasalvesti liik - keemiline energia salvesti. Veel võib jagada elektrienergiasalvesteid kolme rühma: lühi- pika ja ülipikaajalised energiasalvestid [6].

Elektrienergiasalvestite põhiparameetrid on:

- Ühikvõimsus (maksimaalne võimsus salvestamisel või tühendamisel)
- Energiamahutavus (salvestusseadme summaarne elektrienergia kogus, mida on võimalik salvestada)
- Kasutegur (energia suhe tühendamisel võrreldes salvestatud energiaga)
- Reageerimiskiirus (aeg, mis kulub energiasalvestil energia võrku andmiseks)
- Elektrikvaliteet (energiasalvesti võime tagada töökindlat elektrienergiat [6].

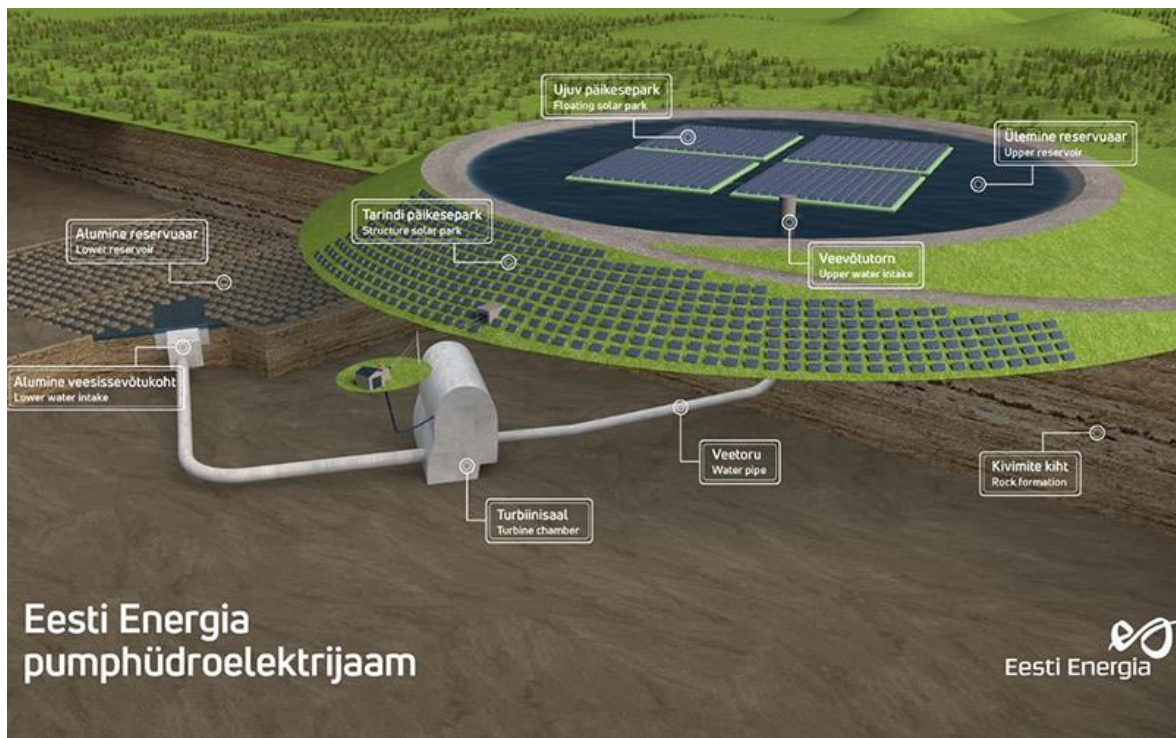
Veel olulisteks parameetriteks on eluiga tsüklites ja aastates. Samuti mängib praktikas suurt rolli energiasalvesti maksumus. Suruõhkenergiasalvestite kasutegur võib olla suhtelist väike, 57-85%, nikkel-kaadmium akude kasutegur on 60-70%, hooratasenergiasalvesti kasutegur jääb vahemikku 70-95%, suur kasutegur on ülikondensaatoritel ja ülijuhtivatel energiasalvestitel, millede on kasutegur on 90-98%, liitiumioonakude kasutegur on vahemikus 85-98% [7].

1.3. Pump-hüdroakumulatsioonijaam

Pump-hüdroakumulatsioonijaam (*pumped hydroelectric energy storage*) või pumpelektrijaam on hüdroelektrienergiat talletav jaam ja mehaanilise energia salvesti. Peamine eesmärk pump-hüdroakumulatsioonijaamal on tarbimise tiputundidel tasakaalustada elektrienergia nõudlust. Energia salvestamine toimub pumbates vett alumisest veehoidlast kõrgemasse, kusjuures pumpamine toimub üldiselt siis, kui elektrienergia on odav s.t vähese tarbimise ajal. Kui nõudlus tõuseb teatud määraneni, lastakse pumbatud vesi kõrgemast veehoidlast läbi hüdroturbiinide, et salvestatud energia muundada tagasi elektrienergiaks [8].

Pump-hüdroakumulatsioonijaamad töötavad tihti koostöös ebastabiilsete taastuvenergiaallikatega, nagu päikese- ja tuuleenergiaallikatega. Sellisel juhul toimub pumpamine alumisest reservuaarist ülemisse reservuaari päikeseparkide efektiivseks töötamiseks sobilike meteoroloogiliste tingimuste korral, tänu millele on elektrienergia hind odav ja nõudlust vähe. Hilisem muundamine elektrienergiaks toimub aga siis, kui tingimused ei ole enam soodsad ja selle tõttu on elektrienergia hind kõrgem ja nõudlus suurem [8].

Energia julgeoleku tagamiseks planeerib Enefit rajada pumphüdroelektrijaama Ida-Virumaale Estonia kaevanduse tööstusalale. 225 MW mahutavusega jaam toimiks kui salvesti, mille ülemine reservuaar ehitatakse aherainetarindile ja suletud kaevandus toimiks kui alumine reservuaar. Kuigi kogu salvestatav energia ei hakka pärinema taastuvenergiaallikatest, on taastuvenergiaallikad suureks põhjuseks miks sellist jaama on mõistlik ehitada. Taastuvenergia toodang on olemuselt muutlik ja selle prognoosimine on keerukas ülesanne. Prognoositud toodang võib suuresti ja tihti erineda sellest, mida päikesepargid või tuulepargid päriselt toodavad. Selliste kõikumistega toime tulemiseks on tarvis elektrisüsteemis tarbimise ja tootmise bilansi tasakaalu hoidmist, sageduse tagamiseks peab olema tootmisvarasid, mis suudavad vastavalt vajadusele reageerida [9].



Joonis 2. Estonia kaevandusse rajatav pumphüdroelektrijaam [9]

1.4. Hooratasenergiasalvestid

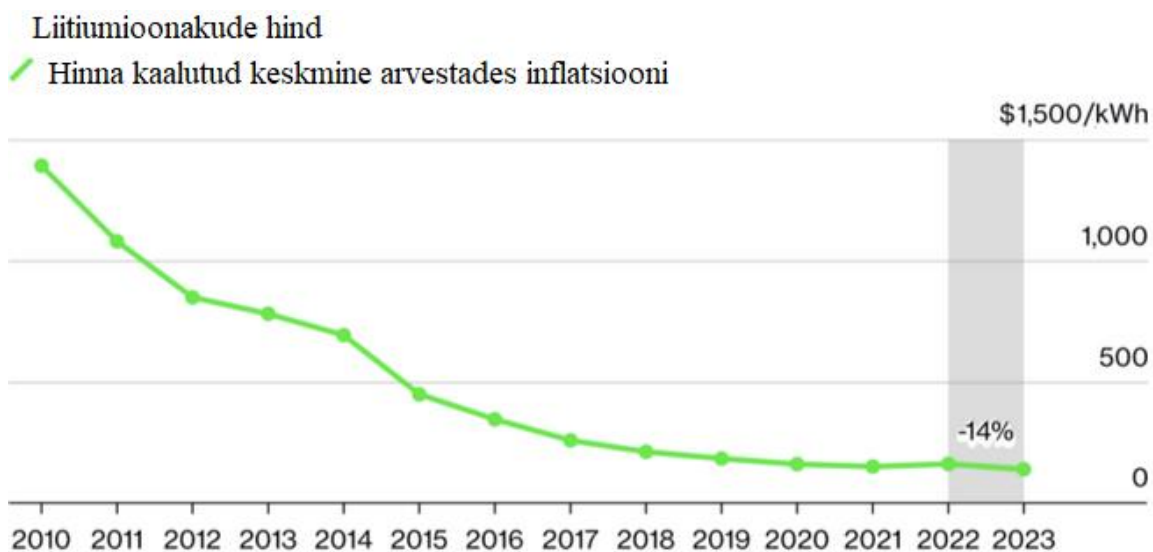
Hooratasenergiasalvesti (*flywheel energy storage*) on kineetilise energia salvesti. Koosneb hoorattast, vastavalt režiimile mootorist või generaatorist ja muundurist. Elektrienergia salvestamine toimub hooratta pöörlevas massis kineetilise energiana. Hooratasenergiasalvestil on väga kiire ja dünaamiline reageerimiskiirus, minimaalsed hooldusvajadused ja on kauakestvad. Taastuvenergiaallikatest on tuuleenergia kõige tihedamini seotud hooratasenergiasalvestitega, mis saavad kompenseerida meteoroloogilistest tingimustest varieeruvat tuulikute energiatoodangut [6].

1.5. Liitiumioonaku

Liitiumioonaku on keemilise energia salvesti [10]. Ioonid on molekulaarüksused, mis tekivad keemilise reaktsiooni tulemusena, mille tagajärjel aatom liidab või loovutab elektrone. Liitiumi ioonid kannavad elektrilaengut ühelt elektrodilt teisele. Kõrge

kasutegur, suur töötsüklite arv, madal sisetakistus, kõrge elemendi nimipinge ja madal isetühjenemise määr iseloomustavad Li-ioon akusid. Liitiumioonakud leiavad rakendust mitmetes valdkondades tänu kõrgele energiatihedusele ja erivõimsusele [12].

Olulisteks puuduseks on ohutus ja hind. Mehaaniline vigastus nagu põrutamine või termiline ebastabiilsus võib põhjustada elemendi süttimist või plahvatust [12]. Kuigi liitiumioonakude hind on olnud langustrendis, on elamu mõistes hinnad ikkagi kõrged. Ameerika ühendriikides oli Li-ion akude hind aastal 2011 pea 1500\$/kWh, aastaks 2023 oli hind langenud 139\$/kWh. Aastatel 2022 ja 2023 oli liitiumioonakude hinnaerinevus -14% [13].



Joonis 3. Liitiumioonakude hind [13]

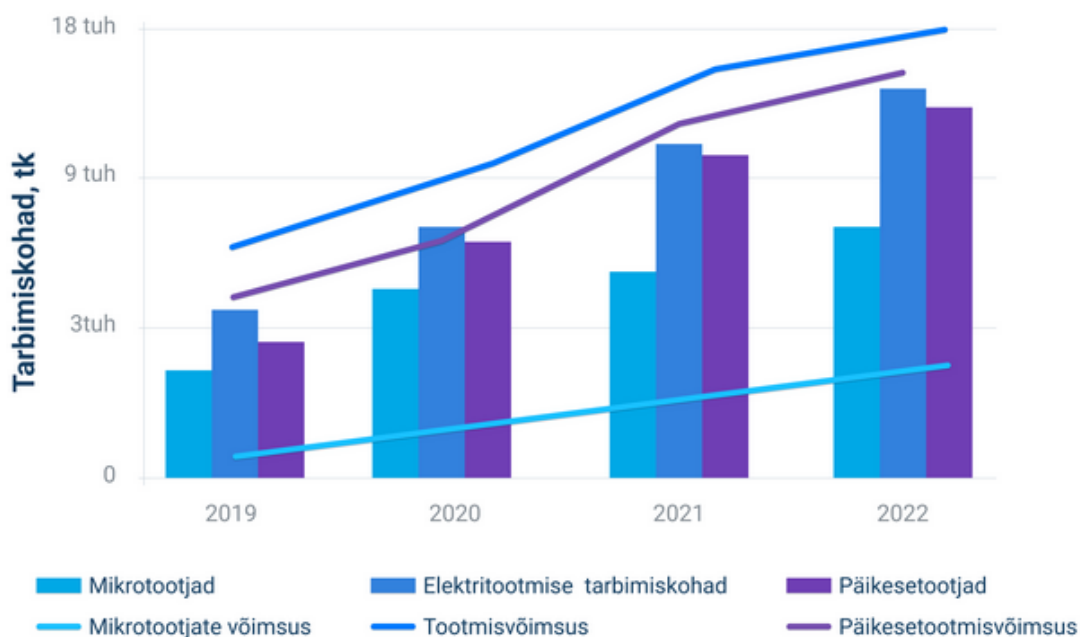
2. ELEKTRITOOTJA LIITUMINE

2.1. Elektritootjast üldiselt

Elektrienergia salvestamine ostu-müügi eesmärgil kõige olulisem eeldus on võrgulepingu olemasolu võrguettevõtjaga. Võrgulepingu olemasolul on võimalik elektrivõrguga liituda kui elektritootjana. Üldjuhul tootjana liitumiseks loetakse olukorda, kus olemasolevale tarbimissuunalisele võrguühendusele taotletakse tootmistingimusi. Tarbija liitumispunkt ehitatakse ümber tootja liitumispunktiks [14].

Tootjana liitumine on kohustuslik, et võrguettevõtja saaks mõõta võrgusuunalist elektrienergia kogust ja veenduda tootmiseadme ohutuses nii tootjale kui ka elektrivõrgule. Elektritootja liitumise ja tingimuste muutmise, nagu näiteks võrgusuunalise tootmisvõimsuse suurendamise tasu sõltub kõige rohkem antud jaama nimivõimsusest, ent tähtis on ka olemasoleva võrgu seisukord [14]. Eesti suurim võrguettevõtte Elektrilevi OÜ, mille halduses on suur osa kogu Eesti elektrivõrgust, klassifitseerib tootjaid vastavalt võrku liidetavale võimsusele [15].

Elektritootjate arvukus on Eestis olnud kasvutrendis. Aastal 2019 oli Elektrilevi võrgus ca 3000 elektritootjat koguvõimsusega 210 MW ja 2022 aasta lõpuks oli elektritootjate arv viiekordistunud ja koguvõimsus kolmekordistunud. Suurel määral mängis tõususe rolli inimeste huvi päikeseelektrijaamade vastu, mille koguvõimsus viiekordistus. Samuti enamik uutest elektrienergiatootjatest olid nimelt päikeseelektrijaamad [18].



Joonis 4. Elektritootjate arvukuse kasv Eestis [18]

2.2. Nanotootja

Nanotootja on tootmismahu ja võrku antava mahu poolest kõige väiksem elektrienergia tootja klass. Antud tootja elektritootmiseseade maksimaalne tootmisvõimsus on 0,79 kW. Nanotootjad kasutavad peamiselt päikesepaneele, et toota elektrienergiat. Elektrienergiat tootva ja ostva elektripaigaldise kaudu ühendatud liitumispunktiga seadme kasutamiseks sõlmitakse võrguleping. Ostjal on võimalik määratleda, kas tarbida nanotootmiseseadme poolt toodetud elektrienergiat täies mahus või mitte – kui tarbitakse, siis elektrienergia võrku andmine ei ole lubatud ja tarbimiskohas jääb kasutusele olemasolev elektrienergia arvesti [16].

Kui on soov nanotootmiseseadmega elektrienergiat võrku suunata, on vaja paigaldada olemasoleva tarbija ühesuunalise arvesti asemele kahesuunaliselt mõõtev arvesti. Ostja elektrikilpi arvesti paigaldamisel tuleb ostjal tagada arvesti nõuetekohase paigaldamise võimalus [16]. Elektritootjana liidetuna on tarvis sõlmida vastavaid tingimusi sisaldav elektrimüügi leping, mille järel elektrimüüjal on võimalik osta toodetud elektrienergiat kui

ka vajadusel müüa tarbitavat elektrit elektrivõrku. Tagasiostmine toimub üldjuhul arvestades tunnipõhist börsihinda, millest on lahutatud tootja klassist sõltuv marginaal [16]. Antud bakalaureusetöö koostamise ajal on võrgusuunalise tootmisvõimsuse müümisel marginaal 0,75 senti / kWh ja võrgusuunalise tootmise liitumisel arvesti vahetuse hind on 639 €.

Katkestuse korral tuleb ostjal tagada nanotootmiseadme eraldamise elektrivõrgust. Võrgusuunalisel tootmisel rohkem kui 0,79 kW, tuleb ostjal tasuda täiendavat võrgutasu [16].



Joonis 5. Kahesuunaline arvesti E360; 1. Arvesti ekraan; 2. Lüliti välja- ja sisselülitamiseks [17]

2.3. Mikrotootja

Mikrotootja on elektritootja, mille ühefaasilise tootmiseseadme nimivõimsus on kuni 5 kW või kolmefaasiline tootmiseseade, mille nimivõimsus on kuni 15 kW. Antud elektritootja sobib kodumajapidamise elektri tarbimise katmiseks või toodetud elektrienergia müümiseks elektrimüüjale. Võrreldes nanotootjaga, mille hind on vajadusel kaheksakuulise arvesti vahetus, sõltub mikrotootja liitumine ka suuresti võrgu seisukorrast [16]. Sarnaselt nanotootja tingimustele on antud bakalaureusetöö koostamise ajal võrgusuunalise tootmisvõimsuse müümisel marginaal 0,75 senti / kWh ja võrgu suunalise elektrienergia müümine lähtub tunnipõhisest börsihinnast.

Mikrotootja liitumise hind kujuneb analüüsides olemasolevaid võimalusi ja vajadusel võrgu rekonstrueerimise kuludest. Maksumus sõltub soovitud tootmistingimustest, asukohast ja teistest olemasolevatest elektritootjatest. Arvestades võrgu olukorda võib uue mikrotootja liitmine või tarbija muutmine mikrotootjaks pakkumine sisaldada madalpingeliinide, keskpingeliinide või mõlema rekonstruktsiooni, alajaamas seadmete asendamist või uue alajaama ehitamist. Erinevalt elektritootjast üle 15 kW nimivõimsusega, ei sisalda mikrotootja liitumismaksumus põhivõrgu poolt seatud kulusid [18].

Elektrienergia salvestamisel ostu-müügi eesmärgil mängib suurt rolli tasuvusaeg. Kui tasuvusaeg läheb pikaks, võib ületada see süsteemi eluiga, millal ei ole see enam majanduslikult mõttekas. Kuna nanotootja tootmiseseadme maksimaalne võimsus on kuni 0,79 kW, on autor arvamusel, et see ei ole sobilik tootja klass ostu-müügi eesmärgiks. Samuti on üldiselt meedias kajastatud elektrienergia salvestite paigaldamist just mikrotootjatele. Tarbija muutmine mikrotootjaks maksumus mängib sel juhul väga suurt rolli – kui tootja liitumiseks on tarvis vahetada alajaamas trafo või tugevdada keskpingeliini võib olla üpris kindel, et süsteemi tasuvusaeg on pikem kui salvestamissüsteemi eluiga ja seega pole sellel enam finantsilist ajendit.



Joonis 6. Mikrotootja päikesepark nimivõimsusega 12 kW viilkatusel [19]

2.4. Elektritootja

Elektritootja on tootmismahu ja võrku antava mahu poolest kõige suurem elektrienergia tootja klass. Elektritootja elektritootmisseadme nimivõimsus on üle 15 kW. Suur erinevus elektritootja ja mikrotootja liitumisel on, et elektritootja pakkumises on ostjale lisaks ehitustöödele ka põhivõrgu ehk Eleringi võrgu tugevdustööd. Bakalaureusetöö kirjutamise ajal on põhivõrgu kuludeks kindlasti menetlustasu 1600 €, toimingutasu 3300 € ja lisanduda võib ehitustööde maksumus [20].

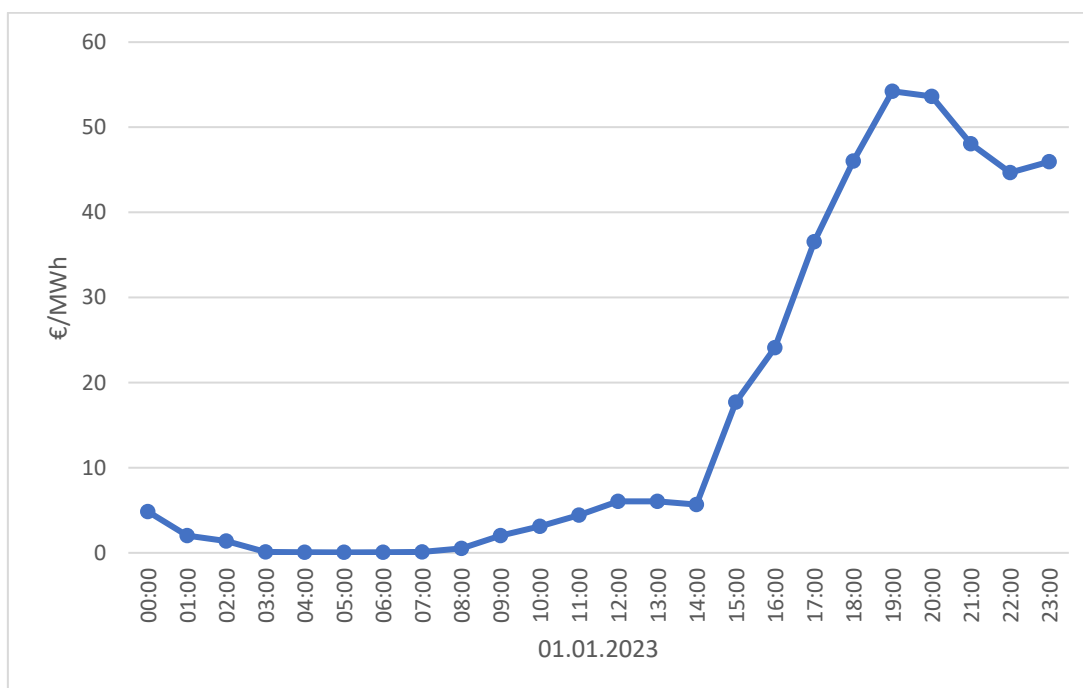
Liitumistaotluse alusel esitatakse ostjale indikatiivne hinnapakumine. Kui indikatiivse hinnainfo põhjal soovib ostja siduvat liitumispakkumist, tuleb tasuda tagatisraha 38 € / kW. Tagatisraha tasumise asemel on võimalik esitada garantiikiri, mis peab kehtima minimaalselt 3 aastat või kuni tootmise kasutusele võtuni [20].

Energia arbitraaži raames oleks parameetrite poolest elektritootja kõige sobilikum elektritootja klass, ent võimalike kulude tõttu võib tasuvusaeg minna mittedobilikuks. Lisaks jaotusvõrgu kuludele võivad lisanduda ka põhivõrgu kulud. Üle 15 kW nimivõimsusega tootmismoodulid sobivad pigem suurtematele ettevõtetele kui kodumajapidamistele ja eramutele. Analüüsisid elektriennergia ostu-müügi tasuvust lähtun seega mikrotootja parameetritest ja maksumusest.

3. ELEKTRIENERGIA SALVESTAMISE KULUD

3.1. Elektribörs

Elektrienergia tarbimisel börsipaketiga kujuneb elektrienergia hind börsihinnast koos käibemaksuga. Elektri hind oleneb börsil kauplemisest ja vastavalt nõudlusele ja tootlusele muutub hind iga tund. Iga järgmise päeva elektrienergia börsihind avalikustatakse kell 13:00 [21]. Börsihinna kujunemise väga oluline osa on see, et taastuv- ja tuumaenergia võimsused pääsevad turule esimesena. Kui taastuv- ja tuumaenergiavõimsused katavad nõudluse ära, on elektrienergia hind üldjuhul madal. Kui aga nõudlus on suurem, lisanduvad turule ka põlevkivielektri ja gaasielektri jaamad. Fosiilkütustel põhinevatest elektri jaamadest toodetud elektrienergia on kallim kasutatava kütuse kui ka süsihappegaasi emissioonitasu tõttu [22].



Joonis 7. Elektrienergia börsihind 1. jaanuaril 2023 [1]

3.2. Võrguteenus

Võrguteenus on elektrienergia taristu kasutamise maksumus. Võrgutasu katab kulud elektrivõrgu ülalpidamiseks ja uuendamiseks, nagu näiteks liinikoridoride hooldus, uue

elektrivõrgu ehitamine või vana elektrivõrgu tugevdamine, seadmete hooldus, seadmete ülalpidamine, elektrivõrgu juhtimine. Bakalaureusetöö kirjutamise ajal on eraisikutel võimalik valida viie erineva võrgupaketi vahel, mis määravad erinevalt võrguteenuse hinda. Hind sõltub elamu tüübist ja peakaitsme suurusel, tarbimise mahust ja iseloomust. Eristatakse öist ja päevast elektrienergia tarbimist [23]. Võrgupaketid erinevad tarbimise mahust ja tarbimisajast. Võrgupaketti nimetusega „Võrk 1“ on võimalik kasutada väiksema tarbimise, kuni 1300 kWh aastas, puhul. Suurema tarbimise puhul on võimalik kasutada võrgupaketti nimetusega „Võrk 4“ [24].

Elektrienergia salvestamise ostu-müügi eesmärgil on sobilik võrgupakett nimetusega „Võrk 4“. Seda paketti iseloomustab suurem tarbimine, üle 2900 kWh, aastas. Võrguteenuses on fikseeritud kuu hind, 7,80 €, millele lisandub sõltuvalt tarbimise mahust võrgutasu. Kui toimub päevane tarbimine, lisandub 4,50 senti / kWh, öise tarbimise ajal 2,56 senti / kWh. Salvestamise puhul sobib just see pakett tarbimise suurest mahust.

3.3.Salvestusseade

Salvestusseadmete maksumus erineb vastavalt salvestusseadme nimivõimsusest, mahutavusest ja tüübist. Bakalaureusetöö kirjutamise ajal on võimalus taotelda Ettevõtluse Arendamise Sihtasutuses (EAS) ja KredExi ühendasutusest toetust Elektrilevi võrguga liitumisel, mis võib katta salvestusseadme kulud kuni 50% ulatuses [25]. Hilisemas analüüsis keskendub autor salvestusseadme maksumuse tegelikele kuludele, kuna toetuse saamine või mittesaamine sõltub suurelt välistest teguritest.

Autor kontakteerus energeetikaga tegeleva suurettevõttega peale antud ettevõtte kodulehel artikli lugemist, mis kirjeldas energia salvestamise ostu-müügi tulukust. Autor päris 15 kW nimivõimsusega, 45 kWh mahutavusega salvestusseadmehinnapakkumist. Hinnapakkumine sisaldas 15 kW inverterit, akuräkki, räkitavaid akusid, ühenduskaablit ja juhtmoodulit. Juhtmooduli eesmärk on interneti vahendusel jälgida elektrienergia börsihinda ja sellest sõltuvalt muuta töörežiimi – elektrienergia salvestamine või tühjendamine.

Tabel 1. Energiasalvestussüsteemi hinnapakumine

Seadme kirjeldus	Kogus	Müügihind €
HVB750V/100A-EU HV AKU JUHTMOODUL BOS-G AKUDELE	1	650
BOS-G.CABLE BOS-G ÜHENDUSKAABEL 5M	1	165
SUN-15K-SG01HP3-EU HV INVERTER SEINAMUDEL 15kW	1	2200
3U-HRACK AKURÄKK KÕRGE 13-SAHTLIT	1	390
BOS-G (EU) HV AKU RÄKITAV 5kWh	9	1440

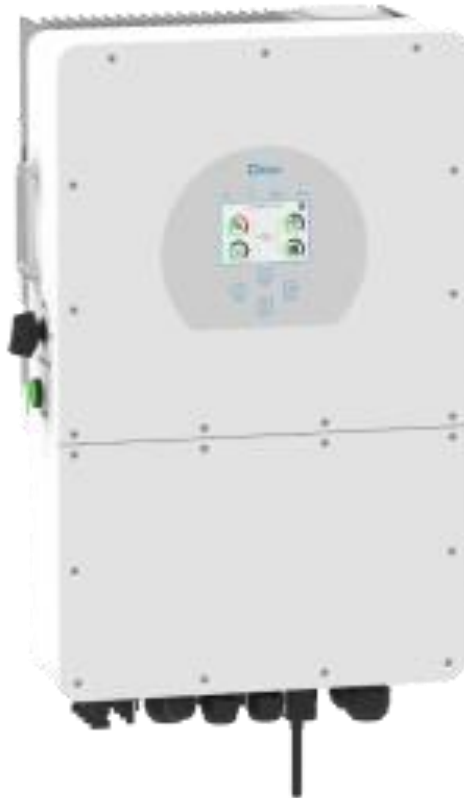
Energiasalvestussüsteemi nimivõimsusega 15 kW, energiamahutavusega 45 kWh maksumus on 16 365 €, millele lisandub käibemaks 22%. Koos käibemaksuga on energiasalvestussüsteemi kogumaksumus ca 20 000 €. Autor kontrollis räkitava aku ja inverteri maksumust ka teiste ettevõtete pakkumistega ja veendus, et tegemist on korrektse, turule vastava hinnaga.



Joonis 8. BOS-G (EU) HV räkitava aku süsteem mahutavusega 60 kWh [26]

Tegemist on keemilise energiasalvestusseadmega. Aku on LiFePO₄ tüüpi. Mooduli mahutavus 5.12 kWh (100 Ah) ja nominaalpinge 51.2 V. Soovituslik tühjenemise maht on 90% täismahust, s.t. jäämahtuvus on 10 %. Salvestamise ja tühjendamise voolutugevus on

soovituslikult 50 A, maksimaalselt 100 A. Töötemperatuur laadimisel vahemikus 0 – 50 °C, tühjendamisel -22 – 55 °C. Kaitseaste IP 20, korpus kaitseb 12,5 mm läbimõõduga ja suuremate vöörkehade sattumise eest seadmesse ja korpus ei kaitse seadet vedelike või niiskuse eest. Kasutuskoht on kuni 2000 meetrit merepinnast. Eluiga on kuni 6000 tsüklit. 9 akuga räkise mõõtmed on 580 × 590 × 1615 mm [26].



Joonis 9. SUN-15K-SG01HP3-EU HV inverter [27]

Kolmefaasilise hübriidinverteri aku laadimise ja tühjendamise voolutugevus on 37 A. Maksimaalne alalisvoolu võimsus 19,5 kW ja maksimaalne alalisvoolu pinge 1 kV. Lülituspinge 180 V, täiel koormusel alalisvoolupinge vahemikus 420 – 850 V. Vahelduvvoolu väljundvõimsus 16,5 kW, vahelduvvoolu väljund voolutugevus 22,8/21,8 A. Maksimaalne kolmefaasiline väljundvool 30 A. Väljund pinge ja vool 50/60 Hz; 220/380, 230/400 V. Kasutegur 97,6% [27].

Inverteriga on võimalik liita olemasolev elektrigeneraator, akud, päikeseenergia inverter või tuulik. Inverteriga on võimalik vastavalt soovile suunata üleliigset toodangut ja määratleda võrgust ostetava elektrienergia hulka [27].

Sellise süsteemi elektrienergia salvestamiseks saab arvutada valemiga:

$$t = \frac{C}{P \times \eta_i \times \eta_a} \quad (1)$$

kus C – energiasalvesti mahutavus, kWh;

P – inverteri võimsus, kW;

t – salvestamiseks kuluv aeg, h

η_i – inverteri kasutegur, %;

η_a – aku kasutegur, %

$$t = \frac{45}{15 \times 0,976 \times 0,95} = 3,29 \text{ h}$$

Tootja poolt on soovitatud energiasalvesti tühjenemise maht 90%. Tühjenemiseks kuluv aeg on vastavalt valemile 1:

$$t = \frac{0,9 \times C}{P \times \eta_i \times \eta_a} = \frac{0,9 \times 45}{15 \times 0,976 \times 0,95} = 2,99 \text{ h}$$

Edaspidisteks tsükliteks jääb tühjenemise maht 90% peale. Arvestades kadusid salvestatakse 40,5 kWh energiat kolme tunniga. Tegemist on mingil määral lihtsustatud ja optimistliku järeldusega – reaalselt sõltub akude töö ka aku temperatuurist, tsüklite sagedusest, vanusest, laadimis- ja tühjendamisprofiilidest, ent autor arvab, et antud bakalaureusetöö raames nii süvitsi pole vaja minna. Eesmärk on uurida laiemalt, kas elektrienergia salvestamine ostumüügi eesmärgil võib olla finantsiliselt tasuv või mitte.

4. ANALÜÜS

4.1. Lühike periood

Eesti elektribörsi elektrihind NPS Eesti (*Nord Pool Spot*) pärineb Elering AS kodulehelt [1]. Valides vahemikuks 1. jaanuar 2023 – 31. detsember 2023 on elektrienergia börsihind nähtav valimikku sisaldavale 8760 tunnile. Analüüsi teostamiseks kasutas autor tarkvara *Microsoft Excel*.

Analüüsi eesmärk on luua mudel elektribörsi muutuvate hindade mõju elektrienergia arbitraaži tulemuslikkusele.. Arvestada salvestatud ja tühjendatud elektrienergia kogust võrguteenuse ja müüгимarginaali leidmiseks, võimalike süsteemi – ja liitumiskulusid ja leida, kas elektrienergia salvestamine ostu-müügi eesmärgil on majanduslikult mõistlik.

Lihtsuse mõistes lähtuda valemist 1.

$$t = \frac{0,9 \times C}{P \times \eta_i \times \eta_a} = \frac{0,9 \times 45}{15 \times 0,976 \times 0,95} = 2,99 \text{ h}$$

Tühjendamise määr 90% piirab salvestusseadme mahutavuse efektiivselt 40,5 kWh-ni. Kolme tunniga on võimalik akusüsteemi salvestada ja tühjendada 40,5 kWh elektrienergiat.

Salvestamise korral on tähtis asjaolu, et salvestamine toimuks järjestikuliselt odavatel tundidel akude kestvuse optimeerimiseks. Kui vaadelda kahekümne nelja tunnist tsüklit, võib olla kõige odavam tund eraldiseisev ja sellele järgnev või eelnev tund hoopis kallim. Kolme minimaalse hinnaga tunni summa leidmine näitab, mis ajavahemikus on elektrienergia salvestamine kuluefektiivseim valemiga

$$H_{3t} = H_{01:00} + H_{02:00} + H_{03:00} \quad (2)$$

kus H_{3t} – kolme tunni börsihind (€/MWh);

$H_{01:00}$ – börsihind kell 01:00 (€/MWh);

$H_{02:00}$ – börsihind kell 02:00 (€/MWh);

$H_{03:00}$ – börsihind kell 03:00 (€/MWh);

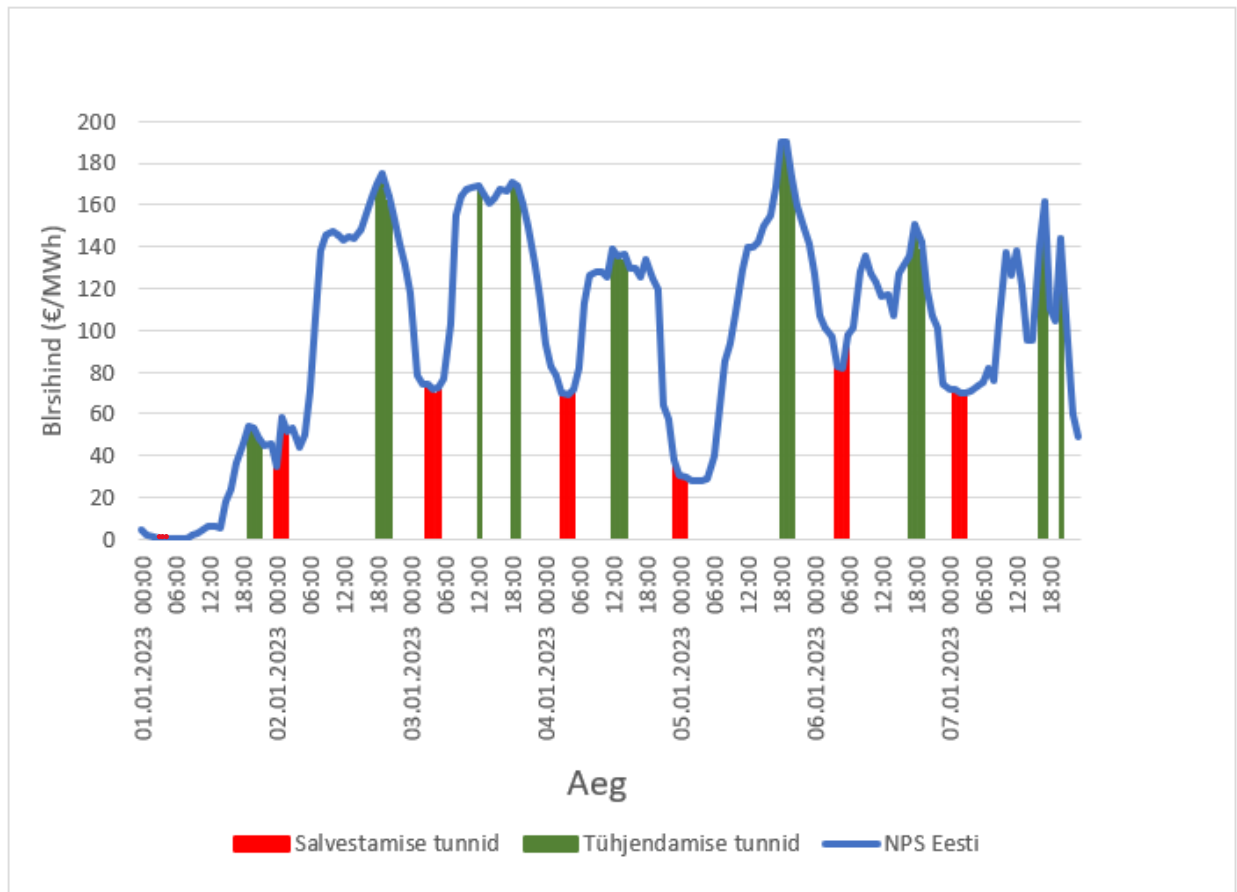
Tabel 2. Elektrienergia börsihind 01.01.2023 [1]

Kuupäev (Eesti aeg)	NPS Eesti (€/MWh)	Kolme tunni hind (€/MWh)
01.01.2023 00:00	4,84	8,23
01.01.2023 01:00	2,01	3,48
01.01.2023 02:00	1,38	1,55
01.01.2023 03:00	0,09	0,22
01.01.2023 04:00	0,08	0,21
01.01.2023 05:00	0,05	0,22
01.01.2023 06:00	0,08	0,7
01.01.2023 07:00	0,09	2,65
01.01.2023 08:00	0,53	5,66
01.01.2023 09:00	2,03	9,56
01.01.2023 10:00	3,1	13,59
01.01.2023 11:00	4,43	16,55
01.01.2023 12:00	6,06	17,8
01.01.2023 13:00	6,06	29,45
01.01.2023 14:00	5,68	47,5
01.01.2023 15:00	17,71	78,36
01.01.2023 16:00	24,11	106,68
01.01.2023 17:00	36,54	136,8
01.01.2023 18:00	46,03	153,89
01.01.2023 19:00	54,23	155,91
01.01.2023 20:00	53,63	146,36
01.01.2023 21:00	48,05	138,69
01.01.2023 22:00	44,68	125,64
01.01.2023 23:00	45,96	138,87

Leides järjestikuse kolme tunni minimaalse elektribörsi hinna selguvad ühtlasi ka tunnid, mil salvestada elektrienergiat. Tabelis 2 on kolme tunni minimaalne hind 0,21 €/MWh, millisel juhul toimub salvestamine tundidel 04:00, 05:00 ja 06:00. Tühjendamise puhul

tundide järjestikus ei oma tähtsust, lähtutakse ööpäeva kolmest elektribörsi kõige kallimast tunnist. Tühjendamine ei saa toimuda enne salvestamist.

Joonisel 10 on elektrienergia börsihind 1.1.2023 00:00 – 07.01.2023 23:00. Kasutades kolme tunni börsihinna valemit leiti igale ööpäevale elektrienergia salvestamiseks soodsad tunnid ja ööpäeva maksimaalsetest börsihinna tundidest tühjendamiseks sobilik aeg.



Joonis 10. 01.01.2023 – 07.01.2023 elektrienergia börsihind salvestamis- ja tühjendamisega

Salvestamiseks kulunud elektrienergia maksumus leitakse korrutades tunni börsihinna inverteri nimivõimsusega. Teisel jaanuaril salvestati elektrienergiat tundidel 00:00, 01:00 ja 02:00, mil NPS Eesti oli vastavalt 35 €/MWh, 57,91 €/MWh ja 51,67 €/MWh.

$$H_{salvestamine} = \frac{(H_{00:00} \times P) + (H_{01:00} \times P) + (H_{02:00} \times P)}{1000} \quad (3)$$

kus $H_{salvestamine}$ – elektrienergia salvestamise hind (€);
 $H_{00:00}$ – börsihind kell 00:00 (€/MWh);
 $H_{01:00}$ – börsihind kell 01:00 (€/MWh);
 $H_{02:00}$ – börsihind kell 02:00 (€/MWh);
 P – inverteri nimivõimsus (kW)AA

$$H_{salvestamine} = \frac{(35 \times 15) + (57,91 \times 15) + (51,67 \times 15)}{1000} = 2,17 \text{ €}$$

Elektrienergia maksumus salvestamisel 2,17 €. Samal kuupäeval leiti, et kõige kõrgemad börsihinnad elektrienergia tagasimüümiseks on tundidel 18:00, 19:00 ja 20:00, mil NPS Eesti oli vastavalt 170 €/MWh, 174,74 €/MWh ja 164,45 €/MWh. Tagasimüümise tunnid ei pea olema järjest. Tagasimüümise tulu leitakse korrutades tunni börsihinna ühes tunnis tühjendatava elektrienergia hulgaga.

$$H_{tühjendamine} = \frac{(H_{18:00} \times \frac{E}{t}) + (H_{19:00} \times \frac{E}{t}) + (H_{20:00} \times \frac{E}{t})}{1000} \quad (4)$$

kus $H_{tühjendamine}$ – elektrienergia tagasimüümise hind (€);
 $H_{18:00}$ – börsihind kell 18:00 (€/MWh);
 $H_{19:00}$ – börsihind kell 19:00 (€/MWh);
 $H_{20:00}$ – börsihind kell 20:00 (€/MWh);
 E – salvestatud elektrienergia kogus (kWh);
 t – tühjendamiseks kuluv aeg (h);

$$H_{tühjendamine} = \frac{(170 \times \frac{40,5}{3}) + (174,74 \times \frac{40,5}{3}) + (164,45 \times \frac{40,5}{3})}{1000} = 6,87 \text{ €}$$

Võrguteenuse summa koosneb tarbimise mahust, ajast ja kuumaksest. Arvestades, et kuumakse on ca 8 €, pole ühe laadimis- ja tühjendamistsükli analüüsimisel mõistlik kuumakset arvestada. Võrguteenus on arvutatav salvestamiseks kulunud elektrienergia hulga ja ajast sõltuva marginaali korrutisega.

$$HVT_{\ddot{o}\ddot{o}} = \frac{H_{\ddot{o}\ddot{o}} \times t \times P}{100} \quad (5)$$

- kus $HVT_{\ddot{o}o}$ – võrguteenuse hind (€);
 $H_{\ddot{o}o}$ – võrguteenuse öine marginaal (senti/kWh);
 t – aeg (h);
 P – inverteri nimivõimsus (kW);

$$HVT_{\ddot{o}o} = \frac{2,56 \times 3 \times 15}{100} = 1,15 \text{ €}$$

Kui salvestamine toimub päeval, on valem:

$$HVT_{p\ddot{a}ev} = \frac{H_{p\ddot{a}ev} \times t \times P}{100} \quad (6)$$

- kus $HVT_{p\ddot{a}ev}$ – võrguteenuse hind (€);
 $H_{p\ddot{a}ev}$ – võrguteenuse päevane marginaal (senti/kWh);
 t – aeg (h);
 P – inverteri nimivõimsus (kW);

Võrgusuunalise elektrienergia müümisel on mikrotootjatel müüгимarginaal 0,75 senti / kWh. Korrutades tühjendatud elektrienergia kogust müüгимarginaaliga leitakse maksumus.

$$H_{mmk} = \frac{H_{m\ddot{u}gimarginal} \times E_t}{100} \quad (7)$$

- kus H_{mmk} – müüгимarginaal kokku (€);
 $H_{m\ddot{u}gimarginal}$ – mikrotootja müüгимarginaal (senti/kWh)
 E_t – tühjendatud elektrienergia hulk (kWh);

$$H_{mmk} = \frac{0,75 \times 40,5}{100} = 0,30 \text{ €}$$

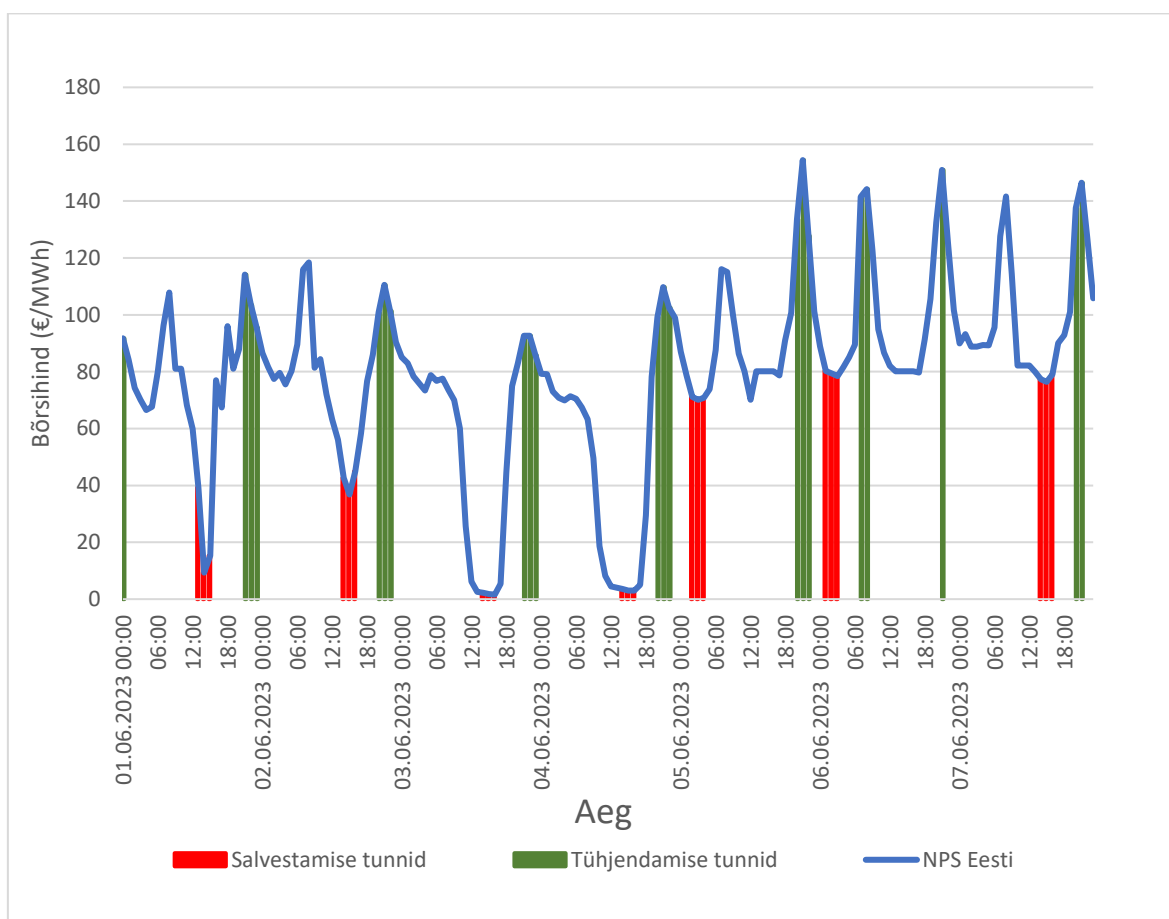
Kasum leitakse, kui lahutada tühjendamisest saadud summa salvestamiseks kulunud summaga, võrguteenuse ja müüгимarginaali summaga.

$$H_{kasum} = H_{t\ddot{u}hjendamine} - H_{salvestamine} - H_{v\ddot{o}rguteenus} - H_{mmk} \quad (8)$$

$$H_{kasum} = 6,87 - 2,17 - 1,15 - 0,3 = 3,25 \text{ €}$$

Teisel jaanuaril energia arbitraaž eelnevalt kirjeldatud seadmete parameetritega teeniks kasumit 3,25 €.

Kui talvekuudel elektrienergia salvestamine toimub öösiti ja tühjendamine päeval, siis suvekuudel on see vastupidi. Suvekuudel on tarbimist vähem kui talvel ja võrgus on elektrienergiat tootvad taastuvenergiajaamad.



Joonis 11. 01.06.2023 – 07.06.2023 elektrienergia börsihind salvestamis- ja tühjendamisaegadega

Joonisel 11 ajavahemikus on salvestamise kulu vastavalt valemile 3:

$$H_{salvestamine} = 13,29 \text{ €}$$

Valemi 4 kohaselt on tühjendamise eest saadud summa:

$$H_{tühjendamine} = 32,89 \text{ €}$$

Valemi 5 ja 6 järgi on võrguteenuse maksumus:

$$HVT = 12,42 \text{ €}$$

Valemi 7 järgi on:

$$H_{mmk} = 2,22 \text{ €}$$

Valemi 8 järgi on:

$$H_{kasum} = 4,96 \text{ €}$$

Kuna suvekuudel toimub elektrienergia salvestamine peamiselt päevasel ajal, mil võrguteenuse marginaal on pea poole korra kallim, siis nädalas teenitud tulu on ca 5 eurot. Energiasalvestite kasutamist ostu-müügi eesmärgil on mõistlik salvestada elektrienergiat võrguteenuse marginaali odavatel tundidel.

4.2. Pikk periood

2023 aasta analüüsis esines päevi, mil elektrienergia päevase keskmise hind oli niivõrd lähestikku päeva maksimaalsete ja minimaalsete tunnihindadega, et elektrienergia salvestamine ei oleks mõistlik. Eemaldades sellised päevad jäi aastasse 330 tsükli. Pikk periood on jaanuari kuu ja 2023. aasta.

Analüüsidest pikemat perioodi, 1 kuu või enam, on võimalik hinnata süsteemi tasuvust. Lähtuvalt peatükis 4.1. kirjeldatud meetodikale, oli 2023. aasta jaanuaris 28 tsükli. Energiat oleks salvestatud 1260 kWh, millest võrku tühjendatud 1093,5 kWh.

Jaanuaris salvestamiseks mineva elektrienergia maksumus on arvutatav valemiga 3:

$$H_{salvestamine} = 65,8 \text{ €}$$

Valemi 4 kohaselt on tühendamise eest saadud summa:

$$H_{\text{tühendamine}} = 170,9 \text{ €}$$

Valemi 5 ja 6 järgi on võrguteenuse maksumus koos kuumaksuga:

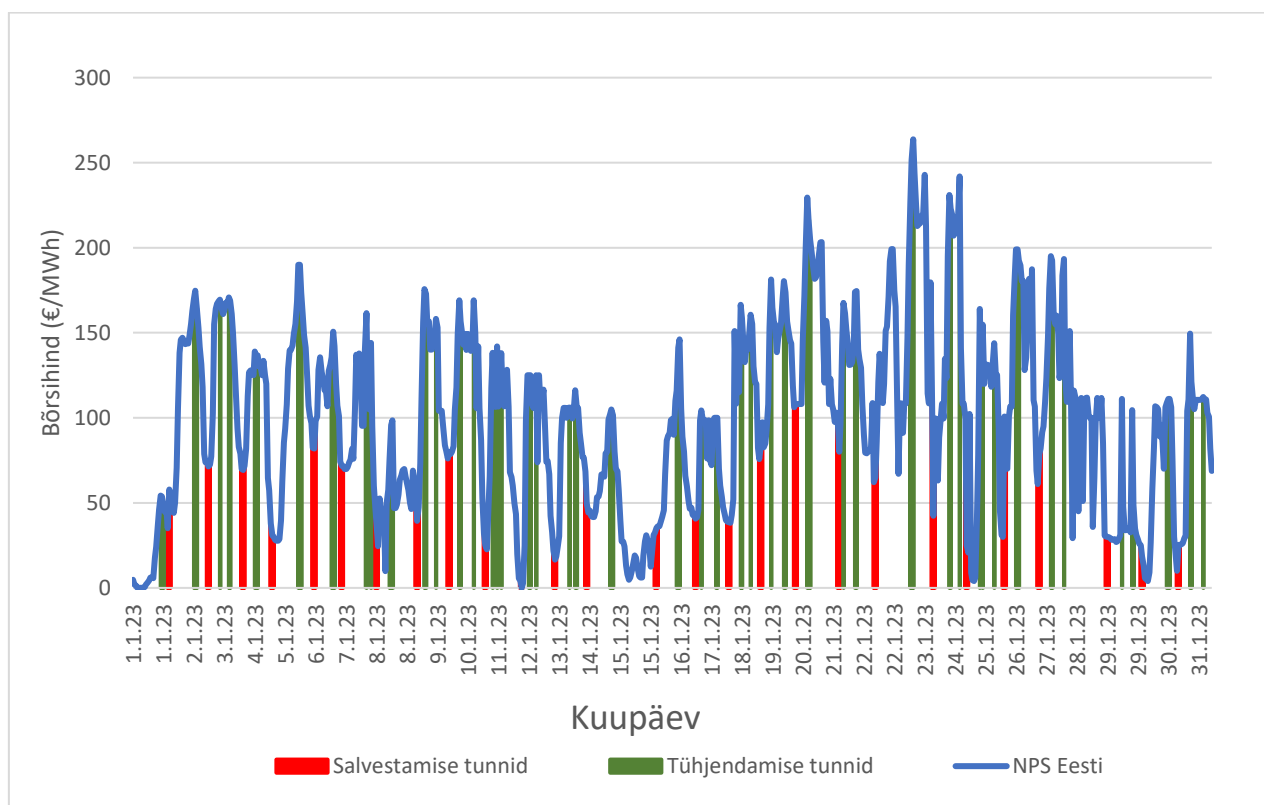
$$HVT = 39,8 \text{ €}$$

Valemi 7 järgi on:

$$H_{\text{mmk}} = 8,19 \text{ €}$$

Valemi 8 järgi on:

$$H_{\text{kasum}} = 56,63$$



Joonis 12. 2023 jaanuari elektrienergia börsihind salvestamis- ja tühendamisaegadega

Terve aasta lõikes oleks olnud energiasalvestussüsteemil 330 tsükli. Salvestatud energia kogus 14850 kWh, võrku müüdud energia kogus 13365 kWh. Valemi 3 kohaselt on salvestamiseks kulunud elektrienergia maksumus:

$$H_{salvestamine} = 692,6 \text{ €}$$

Valemi 4 kohaselt on tühjendamise eest saadud summa:

$$H_{tühjendamine} = 1965 \text{ €}$$

Valemi 5 ja 6 järgi on võrguteenuse maksumus koos kuumaksuga:

$$HVT = 509,32 \text{ €}$$

Valemi 7 järgi on:

$$H_{mmk} = 100,2 \text{ €}$$

Valemi 8 järgi on:

$$H_{kasum} = 662,8$$

Arvestades mikrotootja lepingu tasuna minimaalset, kahesuunalise arvesti paigalduse hinda, inverteri ja energiasalvestussüsteemi maksumust, on võimalik arvutada tasuvusaeg

$$t_{tasuvusaeg} = \frac{H_{leping} + H_{Inverter} + H_{Aku} + H_{rakis} + H_{kaabeldus} + H_{juhtmoodul}}{662,8} \quad (9)$$

$$t_{tasuvusaeg} = \frac{639 + 2200 + 12960 + 390 + 165 + 650}{662,8} = 26,6 \text{ aastat}$$

2023. aasta elektri börsihindade juures ei ole elektrienergia salvestamine ostu-müügi eesmärgil eramus kasumlik. Kui soovitud tootmisvõimsusega mikrotootja liitumiseks on vajalik tasuda võrgu rekonstruktsiooni kulusid, näiteks keskpinge liini tugevdamise või alajaamas trafo vahetamise kulusid, läheb tasuvusaeg selle võrra pikemaks.

Kui energiasalvestussüsteemi maksumust vähendada poole võrra tänu toetusele, on tasuvusaeg vastavalt valemile 9:

$$t_{\text{tasuvusaeg}} = \frac{639 + 8821,5}{663,6} = 14,2 \text{ aastat}$$

Energiasalvestussüsteemi eluiga on 6000 tsükli. Kui iga päev salvestada ja tühjendada akusid möödub tasuvusaja lõpuks 5183 tsükli. Elektrienergia salvestamine ostu-müügi eesmärgil ei ole kasumlik ka siis, kui salvestussüsteemi maksumust vähendada 50% võrra.

Tasuvusaeg sõltub suuresti võrguteenusest. Kui jätta võrguteenus arvestamata, oleks 2023. aasta kasum 1173 €. Valemi 9 kohaselt oleks tasuvusaeg:

$$t_{\text{tasuvusaeg}} = \frac{639 + 2200 + 12960 + 390 + 165 + 650}{1173} = 14,5 \text{ aastat}$$

Kui arvestada 50% määrase toetusega, oleks tasuvusaeg ca 7,25 aastat. Sellise tasuvusajaga oleks elektrienergia salvestamine ostu-müügi eesmärgil tõenäoliselt kasumlik. Edasistes uuringutes pöörata tähelepanu võrguteenuse arvestusele.

Liitiumioon akude hind on jätkuvas langustrendis. Energia arbitraaži eramus võib muutuda tulusaks salvestussüsteemide hinna langemisel. Suur osa müügitulust läheb võrguteenuse tasumisele. Võrguteenuse tasu langemisel võib samuti energia salvestamine ostu-müügi eesmärgil muutuda kasumlikuks. Bakalaureusetöö jätkuks võib uurida elektrienergia salvestamist päikesepaneelidelt ja müüki börsi tiputundidel.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöös uuriti energiasalvestusseadmeid ja elektrienergia salvestamist ostu-müügi eesmärgil eramus. Elektribörsi hind muutub iga tund vastavalt nõudlusele, börsi hinna odavatel tundidel on nõudlus väike, kõrgetel tundidel nõudlus suurem. Energiasalvestite kasutamine hinnamuutuste leevendamiseks balanseerib võrgus nõudlust, vähendades pikemas perspektiivis tiputundide hindasid. Võrgusuunalise tootmisvõimsuse müümisel eristatakse tootjad kolme erinevasse klassi: nanotootja, mikrotootja ja elektritootja. Loodi mudel kasutades 2023 aasta elektribörsi hindasid, et analüüsida kas energiasalvestus seadme ostmine energia arbitraaži eesmärgil oleks tulukas. Vastavalt mudelile oleks aastal 2023 salvestatud elektrienergiat 14850 kWh, millest võrku müüdud 13365 kWh. Kasum arvutati teenitud müügitulust, lahutades elektri müügist saadud tulust maha salvestamiseks kulunud elektrienergia maksumuse, võrguteenuse ja müügitasu. Aasta 2023 andmete põhjal on sellise süsteemi tasuvusaeg 26,6 aastat, mis ületab süsteemi eluea. Bakalaureusetöö jätkuks on võimalik uurida energiasalvestite kasutamist ostu-müügi eesmärgil madalatel võrguteenuse marginaali tundidel ja elektrienergia salvestamist päikesepaneelidelt ja müüki tiputundidel.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Elering AS börsihinnad Eesti ajas, EET.EEST [veebiallikas]
<https://dashboard.elering.ee.et.nps.price?interval=minute&period=days&start=2024-05-04T21:00:00.000Z&end=2024-05-05T20:59:59.999Z>
(05.05.2024)
2. Enefit AS infoleht [veebiallikas] <https://www.energia.ee.abi.hinnad-ja-paketid> (05.05.2024)
3. Enefit AS Energiasalvestid [veebiallikas]
https://www.energia.ee.era.taastuvenergia.paikesepaneelid.energiasalvestid?tabgroup_1=tellimine
(05.05.2024)
4. Eesti riikliku energia- ja kliimakava aastani 2030 ajakohastamise versiooni kavand [veebiallikas]
[https://commission.europa.eu.system.files.2023-08.Estonia_Draft_Updated_NECP_2021-2030_ee.pdf](https://commission.europa.eu/system/files/2023-08/Estonia_Draft_Updated_NECP_2021-2030_ee.pdf) (05.05.2024)
5. Kuidas toimib moodsa tehnoloogiaga energia salvestamine? Vaata energiasalvestamise telgitagustesse!, Eesti Energia [veebiallikas] [https://rohe.geenius.ee.blogi/eesti-energia-blogi.kuidas-toimib-moodsa-tehnoloogiaga-energia-salvestamine-vaata-energiasalvestamise-telgitagustesse](https://rohe.geenius.ee/blogi/eesti-energia-blogi/kuidas-toimib-moodsa-tehnoloogiaga-energia-salvestamine-vaata-energiasalvestamise-telgitagustesse). (05.05.2024)
6. **A.Rosin, S.Link, I.Drovtar**, Energiasalvestid ja salvestustehnoloogiad, TTÜ, Tallinn 2013
[veebileht]https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala.8.86.Rosin%2C_A.%2C_Link%2C_S.%2C_Drovtar%2C_I._Energia_lokaalse_tootmise_anal%3BC%3BCs_b%3BCroohoonele_Energiasalvestid_ja_salvestustehnoloogiad._Anal%3BC%3BCs2013.pdf (5.5.2024)
7. Elektrienergia salvestamine [veebileht] [https://energiatalgud.ee.Elektrienergia_salvestamine](https://energiatalgud.ee/Elektrienergia_salvestamine)
(5.5.2024)
8. Pumpelektrijaam [veebileht] [https://et.wikipedia.org/wiki.Pumpelektrijaam](https://et.wikipedia.org/wiki/Pumpelektrijaam) (11.5.2024)
9. Eesti Energia valmistab ette energiajulgeolekut tagada aitava pumphüdroelektrijaama ehitust
[veebileht] [https://www.energia.ee.uudised/avaleht.-newsv2.2022.08.09.eesti-energia-valmistab-ette-energiajulgeolekut-tagada-aitava-pumphydroelektrijaama-ehitust](https://www.energia.ee/uudised/avaleht.-newsv2.2022.08.09.eesti-energia-valmistab-ette-energiajulgeolekut-tagada-aitava-pumphydroelektrijaama-ehitust) (6.5.2024)
10. Liitiumioonaku [veebileht] [https://et.wikipedia.org/wiki.Liitiumioonaku](https://et.wikipedia.org/wiki/Liitiumioonaku) (11.5.2024)
11. Ioonid [veebileht] [https://www.taskutark.ee.ioonid-2](https://www.taskutark.ee/ioonid-2). (11.5.2024)

12. R.Sell, E.Pettai, Mikrovõrgu energiasalvesti uurimine ja katsetamine, Tallinna-Tehnikaülikool, Tallinn 2018

13. **P.S.Molina**, Battery prices down 14% this year, says BloombergNEF [veebileht] <https://www.pv-magazine.com/2023/12/01/battery-prices-down-14-this-year-says-bloombergnef>. (vaadatud 6.5.2024)

14 K.Oja, Energia tagasimüük – kellele ja kuidas? [veebileht] <https://kodus.ee/artikkel/energia-tagasimuuk-kellele-ja-kuidas> (08.05.2024)

15. Elektritootja liitumine, Elektrilevi OÜ, [veebileht] <https://elektrilevi.ee/et/liitumised/elektritootja-liitumine> (08.05.2024)

16. Nanotootmiseseadme kasutamise tingimused, Elektrilevi OÜ, [veebileht] <https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141.8650198.nanotootmiseseade-tingimused.pdf> (08.05.2024)

17. Elektriarvesti E360 kasutusjuhend, Elektrilevi OÜ, [veebileht] https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141.8657579.elektriarvesti_e360_kasutusjuhend_est.pdf (08.05.2024)

18. Kuidas on elektritootjate hulk võrgus muutunud, Elektrilevi OÜ [veebileht] <https://elektrilevi.ee/et/liitumised/elektritootja-liitumine/mikrotootja> (08.05.2024)

19. Päikesepaneelid viilkatusel 10 kW [veebileht] <https://www.e-systems.ee/tooted-ja-teenused/naidispakkumised>. (9.5.2024)

20. Elektritootja, Elektrilevi OÜ [veebileht] <https://elektrilevi.ee/et/liitumised/elektritootja> (9.5.2024)

21. Kuidas kujuneb elektri börsihind? [veebileht] <https://www.elektrum.ee/ee/eraklient/elekter/elektrihinnad> (9.5.2024)

22 Selgitame lähemalt, kuidas kujuneb elektri hind? [veebileht] <https://energiatarkus.energia.ee/hetkel-oluline/selgitame-lahemalt-kuidas-kujuneb-elektrihind>. (9.5.2024)

23. Võrguteenus, Elektrilevi OÜ [veebileht] <https://elektrilevi.ee/et/vorguleping/vorguteenus> (9.5.2024)

24. Võrgupaketid, Elektrilevi OÜ [veebileht] <https://elektrilevi.ee.et.vorguleping.vorgupaketid> (9.5.2024)

25. Avasta, kuidas Kredexi toetusrahadega energiakuludelt võita [veebileht] https://balticindustrial.com.paikesepaneelid-kredexiga.?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6PGxBhCVARIsAlumnWaQhTVjns5EV-dvGX9Y7uROE_cAmES0V9oH3F0RimSWDb2ie7OnXKgaAi7PEALw_wcB (9.5.2024)

26. BOS-G (EU) HV AKU RÄKITAV 5kWh [veebileht] <https://www.weg.ee.bos-g-eu-hv-aku-rakitav-5kwh-2341325> (9.5.2024)

27. SUN-15K-SG01HP3-EU HV INVERTER SEINAMUDEL 15kW [veebileht] <https://www.weg.ee.sun-15k-sg01hp3-eu-hv-inverter-seinamudel-15kw-2341322> (9.5.2024)

LISAD

Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Andrus Andritski, sünniaeg 3.13.1999,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö „Elektrienergia salvestamine ja ostu-müügi kasumlikus eramus“, mille juhendaja on Andres Annuk,

1.1 salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2 digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3 veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Andrus Andritski (allkirjastatud digitaalselt)

Tartu, 31.05.2024

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk

(allkirjastatud digitaalselt)

31.05.2024