



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KODUTARBIJATE ELEKTRISALVESTITE TASUVUS JA MÕJU ELEKTRISÜSTEEMI KOORMUSGRAAFIKULE

PROFITABILITY OF HOUSEHOLD BATTERY DEVICES AND THEIR IMPACT ON ELECTRICITY SYSTEM LOAD CURVE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleks Tabo

Üliõpilaskood: 194017

Juhendaja: Reeli Kuhi-Thalfeldt, vanemlektor

Tallinn 2022

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20.....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Aleks Tabo

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kodutarbijate elektrisalvestite tasuvus ja mõju elektrisüsteemi koormusgraafikule, mille juhendaja on Reeli Kuhi-Thalfeldt,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2022

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Aleks Tabo

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Kodutarbijate elektrisalvestite tasuvus ja mõju elektrisüsteemi koormusgraafikule

Kuupäev:
18.05.2022

59 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): vanemlektor Reeli Kuhi-Thalfeldt, professor Argo Rosin

Töö konsultant (konsultandid): puuduvad

Sisu kirjeldus:

Lõputöö raames uuritakse ühe eramu näitel aku mõju elektrivõrgu koormusgraafikule ning teostatakse tasuvusanalüüs. Kliimaeesmärkide tõttu vajatakse üha enam akusid, et juhtida päikesepaneelide ja elektrituulikute toodetud elektrienergiat. Eesmärgiks on jõuda järeldusele, kas akud on praegusel hetkel tasuvad ning kas ja kui palju vähendavad salvestuslahendused elektrivõrgu koormusgraafikut. Töös analüüsitakse kahte erinevat aku tüüpi – pliiaku ja liitium-ioonaku. Võrreldakse mitut erineva tootja poolt pakutud aku tüüpi ning tehakse valik tsükli hinna ja tsükliite arvu järgi. Tsükliite järgi selle tõttu, et liitium-ioonaku ja pliiaku sarnaneksid võimalikult palju.

Uurimus koostatakse 10 aasta kohta, kuna see on eeldatav aku eluiga. Analüüs viiakse läbi kasutades energyPRO modelleerimistarkvara, kus strateegiaks valiti neto tootmiskulude minimeerimine. Nii pliiaku kui ka liitium-ioonaku kasutatavus oli üle poole võimalikust kasutatavusest, mis tähendab, et aku potentsiaali ei kasutatud täielikult ära. Akude installeerimine kodumajapidamisele eeldab tulevikus tehnoloogia odavnemist, toetuseid või veelgi muutlikumaid energiahindasid, et akude soetamine kodumajapidamisele kasumlikuks muutuks. Tulemustest selgub, et akud ei ole tasuvad, nende kõrge hinna tõttu.

Märksõnad: energyPRO, aku, salvesti, tasuvusanalüüs, koormusgraafik, bakalaureusetöö.

ABSTRACT

<i>Author:</i> Aleks Tabo	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Profitability of household battery devices and their impact on electricity system load curve	
<i>Date:</i> 18.05.2022	59 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> Senior Lecturer Reeli Kuhi-Thalfeldt, Professor Argo Rosin	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> <p>In this dissertation the author analyzed battery devices impact on the electricity system load curve and the profitability of it based on one private household consumption. Due to accelerating climate change rate, there is an increasing demand for batteries in order to control and manage the renewable energy. The goal of this dissertation is to come to an inclusion if batteries are profitably at this stage and if storage solutions can have effect on electricity system load curve. The author analyses two types of batteries – lead and lithium-ion battery. The comparison is based on two factors, the first being the cycle price and the second cycle life. Cycle life is used to make the two batteries more similar to have a more accurate analysis.</p> <p>The period used in the analysis is 10 years because it is the life expectancy of a battery. The analysis was done in energyPRO software, where the strategy is minimizing net production cost. As the usage reached only slightly over half of the possible amount, neither battery reached its full potential. The installation of batteries to regular households requires the technology to become either more affordable, have government aid or the market to have more fluctuating energy prices in order for the batteries to become profitable. The conclusion of the dissertation is that the batteries do not pay off currently because they are too expensive.</p>	
<i>Keywords:</i> energyPRO, battery, storage, cost-benefit analysis, load curve, bachelor thesis.	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Kodutarbijate elektrisalvestite tasuvus ja mõju elektrisüsteemi koormusgraafikule
Lõputöö teema inglise keeles:	Profitability of household battery devices and their impact on electricity system load curve
Üliõpilane:	Aleks Tabo, 194017
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Reeli Kuhi-Thalfeldt
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	Argo Rosin
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2021/2022 Kevad
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2022

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Lõputöö teema on välja pakutud Elektrilevi OÜ poolt. Teema on oluline Elektrilevile, kuna salvestusseadmete kasutamine mõjutab elektri koormusgraafiku kuju ja seeläbi ka jaotusvõrgu juhtimistööd ning võib edasi lükata investeeringuid elektrivõrkudesse.

Taastuenergiast elektri tootmine on Eestis kasvutrendis ning seda soosib ka praegune Euroopa Liidu poliitika. Aastaks 2030 soovib Euroopa vähendada kasvuhoonegaase 55% võrreldes aastaga 1990 ning juba aastaks 2050 soovitakse olla täielikult kliimaneutraalne. Elektri tootmise süsinikuvabaks muutmisel plaanitakse aga peamiselt rajada tuule- ja päikeseelektrijaamasid, mille toodang sõltub ilmastikust ning seetõttu on varasemast keerukam hoida elektri tootmist ja tarbimist tasakaalus.

Salvestusseadmed toetavad Euroopa kliimaneutraalsusesse jõudmist, sest nad võimaldavad üleliigse tuule- ja päikeseelektrijaamade toodangu salvestada, et seda siis kasutada ajal, kui tarbimise katmiseks elektrijaamade toodangust ei piisa. Leedus on rajamisel 200 MW akupark. Eestis sedavõrd suurt akudel põhinevat salvestussüsteemi veel plaanis rajada pole, kuid salvesteid on paigaldanud enda kodudesse mõned eratarbijad.

Markus Merilai lõputöö „Salvestustehnoloogiate mõju elektrisüsteemi tervikule“ tulemustest selgus, et jaotusvõrgu erinevatesse sõlmedesse paigutatud akupangad võimaldaksid siluda koormusgraafiku kuju ja vähendada koormustippe. Parimaid tulemusi annaks liitiumioonakude kasutamine nende kõrge energiatiheduse ja kasuteguri ning kiire reageerimisaja tõttu. Kuid siiani ei ole veel uuritud selliste salvestite mõju, mis asuksid tarbija paigaldises. Jaotusvõrgu ootus oleks, et salvestusseadmed ühtlustavad koormust, kuid kuna tarbijate salvestite kasutus sõltuks pigem rahalisest kasust, võib selle mõju koormusgraafikule olla veidi teistsugune.

2. Töö eesmärk

Töö peamine eesmärk on hinnata ühe eramaja näitel salvestusseadmete tasuvust ja nende mõju elektrisüsteemi koormustippude katmiseks energyPRO tarkvara abil.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Milline on praegu pakutavate salvestite maksumus?
- Millisel juhul oleks salvesti omanikul tasuvam ise salvestist energiat tarbida ning millisel juhul otse elektrivõrgust?
- Milline oleks kodutarbija salvestusseadmete mõju koormusgraafiku kujule?
- Kas kodutarbija salvestusseadmed aitaksid vähendada koormustippe?

4. Lähteandmed

Põhilised andmed salvestusseadmete kohta saadakse varasemalt koostatud aruannetest, uurimistöödest, internetiartiklitest ning salvestusseadmeid tegelevate ettevõtete kodulehtedelt. energyPRO tarkvara sisendandmeteks on eramaja elektri tarbimise mõõteandmed, elektrituru hinnad ning salvesti töö modelleerimiseks vajalikud tehnilised andmed ja tasuvuse hindamiseks majanduslikud andmed.

5. Uurimismeetodid

Töö teoreetilise osa koostamiseks kasutatakse kirjanduse analüüsi. Töö tulemusteni jõudmiseks modelleeritakse eramaja elektri tarbimist ning salvesti kasutust ja tasuvust energyPRO tarkvaras. Vajadusel kasutatakse täiendavaks analüüsiks statistilist analüüsi ja Excelit.

6. Graafiline osa

Peamisteks graafikuteks on elektri tunnipõhine tarbimine, salvesti laadimine ja kasutamine, elektrituruhind. Koostatakse tabelid lähteandmete ja ka tulemuste kohta.

7. Töö struktuur

Lõputöö lühikokkuvõte

Lõputöö ülesanne

Sisukord

Eessõna

Sissejuhatus

1. Salvestid

2. Modelleerimistarkvara energyPRO

3. Salvesti tasuvuse analüüs

4. Salvestite kasutamise mõju koormusgraafikule

5. Järeldused

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Töös kasutatakse erialast kirjandust, internetist leitavaid aruandeid ja statistikat:

1. Energiatalgud. Elektrienergia salvestamine;
https://energiatalgud.ee/Elektrienergia_salvestamine

2. Rosin, A., Link, S., Hõimoja, H., Drovtar, I. Energiasalvestid ja – salvestustehnoloogiad
3. Markus Merilai. Salvestustehnoloogiate mõju elektrisüsteemi tervikule. Bakalaureusetöö, 2021
4. Vitali Navross. Energiasalvestiga elektrialajaama arendamine ja uurimine. Magistritöö, 2016
5. Danish Energy Agency, Energinet. Tehnology data – Energy storage
6. McKindsey ja Company. Net-zero power – Long duration energy storage for a Renewable grid

9. Lõputöö konsultandid

Lõputöö konsultandid hetkel puuduvad

10. Töö etapid ja ajakava

Lõputöö ülesande esitamine (01.11.2021)
Kirjanduse läbitöötamine (30.01.2022)
Teoreetilise osa kirjutamine (21.03.2022)
Modelleerimise teostamine (04.04.2022)
Tulemuste kirjeldamine (17.04.2022)
Järelduste kirjutamine, kokkuvõtte koostamine (19.04.2022)
Töö esimese versiooni juhendajale läbilugemiseks saatmine (21.04.2022)
Paranduste sisseviimine (04.05.2022)
Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (11.05.2022)
Kaitsmistaotluse esitamine (09.05.2022)
Töö lõplik versioon valmis (16.05.2022)
Lõputöö esitamine (18.05.2022)
Kaitsmise esitluse faili esitamine (03.06.2022)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
SISSEJUHATUS	12
1. SALVESTID	14
1.1 Kodutarbijale paigaldatavad elektrienergia salvestid	16
1.1.1 Elektrienergia salvestite tüübid	17
1.2 Akumulaatorid	18
1.2.1 Pliiakud	18
1.2.2 Nikkel-kaadmiumakud	19
1.2.3 Väävel-naatriumakud	20
1.2.4 Liitium-ioonakud	21
2. MODELLEERIMISTARKVARA ENERGYPRO	24
2.1 EnergyPRO lähteandmed	26
2.1.1 Pliiaku valik	29
2.1.2 Liitium-ioonaku valik	31
3. SALVESTI TASUVUSE ANALÜÜS	36
3.1 Pliiaku tasuvus	37
3.2 Liitium-ioonaku tasuvus	40
4. SALVESTITE KASUTAMISE MÕJU KOORMUSGRAAFIKULE	45
4.1 Pliihappeaku mõju koormusgraafikule	46
4.2 Liitium-ioonaku mõju koormusgraafikule	49
5. JÄRELDUSED	54
KOKKUVÕTE	56
6. Kasutatud kirjandus	58

EESSÕNA

Käesoleva töö idee pakkus välja Elektrilevi OÜ. Antud teema on väga aktuaalne tulenevalt 2021. aastal kõrgedest elektrihindadest. Samuti võimaldavad salvestid tarbida ja juhtida roheenergiat ajal, millal seda ei toodeta ning salvestitel on oma panus maailma liikumisel süsinikuneutraalsuse poole. Töö teema vajalikkust kinnitas Haja- ja taastuvenergeetika õppeaines läbitud teemad ning selgeks õpitud modelleerimistarkvara energyPRO, kus vaadeldi erinevaid hajatootmise ja taastuvenergeetikaga seotud raskusi.

Detailsemalt uurin eramaja tarbimist ja salvestuslahenduse valikut. Akusid valin vastavalt tasuvusele nii, et leiaks kõige tasuvama aku ning seejärel koostan valitud akuga analüüsi, milles vaatan mõju koormusgraafikule.

Soovin tänada oma juhendajat Reeli Kuhi-Thalfeldti ja kaasjuhendajat Argo Rosinat konkreetse ja positiivse koostöö eest.

SISSEJUHATUS

Ilma elektrita ei ole tänapäevane elu enam ette kujutatav. Mida aeg edasi seda suuremaks läheb nõudlus elektrienergia järele. Üha enam võetakse kasutusele elektriautosid, samuti liitub igal aastal järjest enam inimesi ise elektrienergia tootmisega peamiselt läbi päikesepaneelide. Kui tarbimine on madal ja tootmine on kõrge võivad tekkida nii jaotus- kui ka põhivõrgus pingeprobleemid.

Pingeprobleeme aitab vähendada lisainvesteeringud võrku, läbi suuremate trafode. Teiseks võimaluseks oleks elektrienergia otsene salvestamine lõpptarbija poolt ning selle ära kasutamine, misjärel võrgu tugevdusi tegema ei peaks. Samuti aitaks lokaalne tarbimine ära hoida kulusid võrgutasudelt.

2021. aastal purustas elektri börsihind Nord Pool Eesti mitmeid kordi ajaloorekordeid. Tõustes üle 1000 €/MWh kohta. [1] Elektrihindade kasv tuli eelkõige CO₂ emissioonide hinna kallinemisest. [2] Samuti oli 2021. aastal tunde, kus energia elektri börsihinnad langesid alla nulli piiri. Sellest tulenevalt on akude kasutus muutunud päevakohaseks teemaks, et odava energiahinna korral saaks akusid laadida ning kõrge energiahinna puhul akust seda tarbida.

Energiasalvestite teema on muutunud aktuaalseks tänu mitmele erinevale asjaolule. Esiteks on elektritarbimine ajalooliselt kasvanud, seda nii rahvastiku kasvu ja tehnoloogia arengu tõttu. Elektritarbimise kasvu tõttu on koormustipud suuremad ning alati ei pruugi olla võimalik nii palju toota, kui tahaks tarbida. Teiseks põhjuseks on kliimaeesmärgid, mis on seotud taastuenergia laialdasema kasutuselevõetuga. Tuulikute ja päikesepaneelide toodang sõltub ilmaoludest, seetõttu vajame nende poolt toodetud energia kontrollimiseks salvesteid, mis aitavad meil ööpäevaringselt energiat tarbida.

Elektrienergia salvestitel on ajalooliselt olnud kolme peamist eesmärki. Nendeks on: koormustippude kompenseerimine, varustuskindluse ja elektrikvaliteedi tagamine. [3] Suurema nõudluse tõttu on hädavajalik tagada ka suurem töökindlus elektrivõrgus. Elektrienergia puhul on olulise tähtsusega tootmise ja tarbimise tasakaal. Kui tarbimine on suurem tootmisest siis võivad osad tarbijad jääda ilma elektrist. Samas, kui tootmine on suurem tarbimisest siis saab tarnida elektrit läbi põhivõrgu sinna, kus on tarbimine suurem. Teiseks võimaluseks suure tootmise korral on elektrienergia salvestamine.

Eesmärk saavutada süsinikuneutraalne primaarenergia osakaal aastaks 2050 on pannud elektrisüsteemid raskesse olukorda. Raskused tekivad nii tootmises kui ka elektrienergia ülekandmises tootjatelt tarbijateni. Samuti on süsinikuneutraalsed tootmisvõimalused ettearvamatud, kuna tuulikud ei saa toota elektrit ilma tuuleta ega päikesepaneelid ilma päikeseta. Salvestusseadmete kalliduse tõttu ei ole võimalik iga tarbija juurde salvestit rajada, kuid viimaste arengute tulemusena on salvestusseadmed odavnenud ning loodetavasti muutuvad varsti igale majapidamisele kättesaadavaks.

Elektrisalvestite peamiseks kasutus eesmärgiks on lahendada probleeme, mis võivad elektrivõrgu töös ette tulla. Peamisteks probleemideks on: koormuste haldus, ülekandevõrkude ja elektrijaamade uuendamise/arendamise edasilükkamine, lõpptarbija rakendustes, tarbimise juhtimiseks, tipukoormuse vähendamiseks ja taastuenergiaallikate integreerimiseks. [3] Töös keskendutakse kodutarbijatele saadaolevatele salvestusseadmetele, koormuste katmisele, mille hulgas vaadeldakse mõju koormustippudele ning salvestite tasuvusele.

Antud lõputöös on uuritud erinevate salvestusseadmete maksumust, salvestite majanduslike mõjusid kodutarbijatele ning koormustippude graafikuid. Töö eesmärgiks on anda väljund hetkel olemasolevate salvestite kasulikkusest kodutarbija rahakotile ning vaadelda, kuidas salvestid toetaksid jaotusvõrku erinevates olukordades. Käesoleva töö raames on võetud eramaja tarbimisandmed Ülenurmes, Kambja vallas asuva 16 A peakaitsme suurusega tarbijalt. Maja peamiseks energia allikateks on maagaas ja elekter.

Töös vaadeldakse kahte erinevat stsenaariumit. Ühe stsenaariumi korral keskendutakse salvestusseadme tasuvusele, ilma võrku tagasi müümata. Kui elektri hind on päeva madalaim, siis tarbitakse elektrit võrgust. Kuid kõrge hinna puhul ehk päeva maksimaalse hinna korral tarbitakse elektrit võrgust ning laetakse akut.

Teise stsenaariumi korral vaadeldakse lisaks eelmisele stsenaariumile ka võrku tagasi müümise võimalust. See tähendab siis seda, et kui elektri hind on päeva kõrgeim siis müüakse akus olev energia tagasi võrku, kui ei ole vajadust seda tarbida ning kui hind on päeva madalaim laetakse akut täis ja tarbitakse ise ka võrgust. Energia kasutamise vajaduse näeb ette modelleerimistarkvara energyPRO.

1.SALVESTID

Käesolevas peatükis antakse ülevaade erinevatest salvestustehnoloogiatest ning kirjeldatakse lähemalt kodutarbijatele olemasolevaid salvestusseadmeid. Lisaks analüüsitakse olemasolevaid tehnoloogiaid lähemalt ning vaadeldakse ka tuleviku perspektiivi.

Energiasalvestite tööpõhimõte on lihtne, elektrivõrgust võetud energia muundatakse elektrienergiast mingisse teise energialiiki ning vajamineval momendil võetakse salvestatud energia ja muundatakse tagasi elektriks. Salvestusseadmete kasutamisel tekivad samuti kaod, mis tähendab, et salvestisse suunatud energiat ei saa ümber konverteerida 100% tõhususega. Tabel 1.1 on välja toodud energiasalvestite liigitus nende salvestusmetoodika järgi. Energiasalvestid jagunevad peamiselt viite erinevasse kategooriasse, mis on moodustatud salvestusseadmete tööpõhimõtte järgi. [4]

Tabel 1.1 Energiasalvestite liigitus [4]

Energiasalvestid						
Mehaanilise energia salvestid		Kineetilise energia salvestid	Soojusenergia-salvestid	Keemilise energia salvestid		Elektrienergia-salvestid
Vedelikuga potentsiaalse energia-salvestid	Gaasiga mehaanilise energia-salvestid	Güroskoop energia salvestid	Soojuse salvestamine	Akud	Läbi-voolu-akud	Kütuse, soojuse ja elektri salvestamine vesinikus
Pumphüdroelektrijaamad	Suruõhk energia-salvestid	Hooratasenergia-salvestid	Soojussalvestid, koostootmisjaamad, konsentreeritud päikeselektrijaamad	Pliiakud, NiCd akud, NaS akud, Li-ioon akud	VR, PSB, ZnBr	Vesinikenergia-salvestid
						Ülimahtuvusel-juhtivusel põhinevad energia-salvestid
						Kaksikiht-kondensaatorid, ülijuhtivad salvestid

Mehaanilise energia salvestite alla käivad nii pumphüdroelektrijaamad, kui ka suruõhk energiasalvestid. Mõlemal korral on tegu väga mahuka ja kalli tehnoloogiaga ning sellised lahendused kodutarbijale ei sobi. Pumphüdroelektrijaamad vajavad lisaks suurele investeringule ka jõgede, järvede, veekogu olemasolu, ning kõrguste vahet.

Suruõhu energiasalvestid vajavad samas suuri reservuaare, tihtipeale kasutatakse looduses olevaid õõnsusi, mis võimaldavad salvestada suuremas koguses suruõhu mahtu. [4]

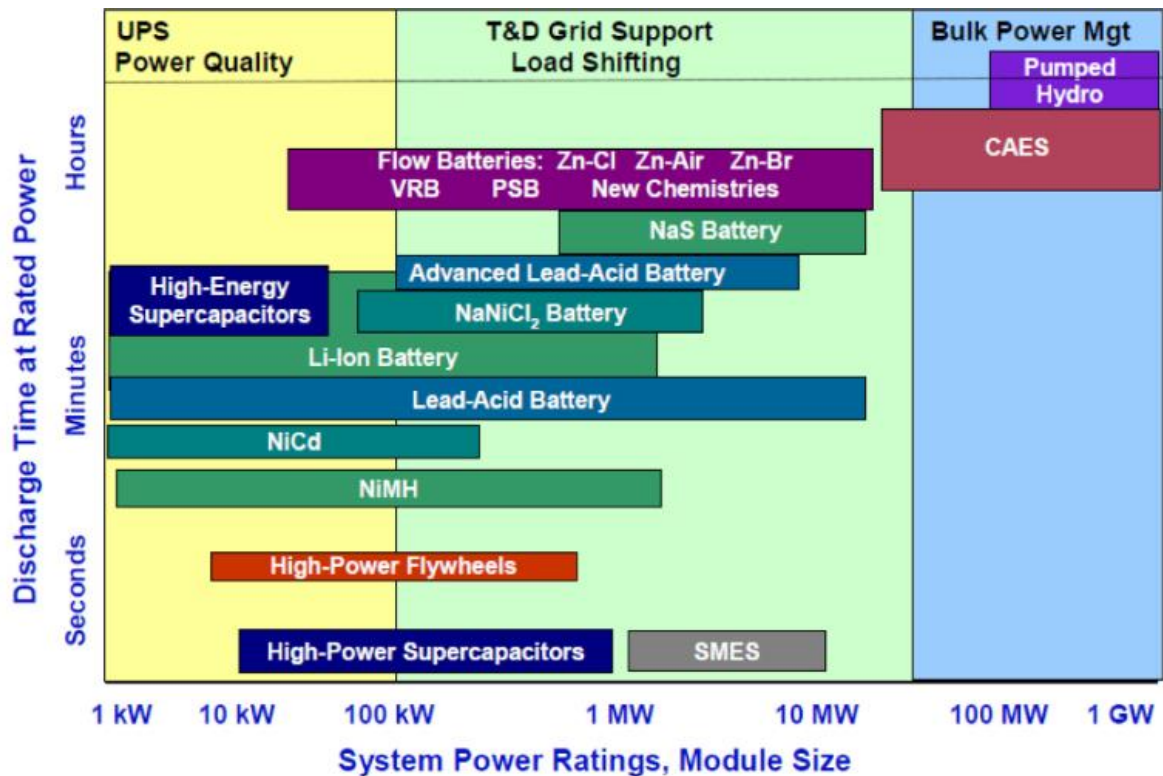
Kineetilise energia salvestite alla kuulub hooratas. Hooratas on viimastel aastatel teinud suure arengu, hooratta süsteeme kasutatakse elektriautodes, et auto pidurdamisel tekkivat energiat ära kasutada. Kuid hooratta peamiseks miinuseks loetakse enese tühjaks laadimist, sest ilma kiirenduseta langeb rootori kiirus pidevalt hõõrdekadude tõttu. Samuti on tegu kalliga tehnoloogiaga võrreldes akudega. [4]

Soojusenergia salvestite alla kuuluvad soojussalvestid (boilerid), koostootmisjaamad ja kontsentreeritud päikeseelektrijaamad. Soojussalvestid nagu näiteks boiler salvestab enda energia sooja veena, mis järel saab seda kasutada. Koostootmisjaamad ja kontsentreeritud päikeseelektrijaamasid kasutatakse vaid väga suure võimsusega päikeseelektrijaamades. [3]

Keemilise energia salvestite alla kuuluvad mitmesugustest erinevatest ainetest koosnevad akud. Kõige paremini kättesaadavad akud on hetkel pliiaku ja liitium-ioon akud. [3]

Energiasalvestid erinevad teineteisest parameetrit ja tunnuste poolest, kuid kõigil salvestitel on ka ühiseid näitajaid. Tähtsaim parameeter salvestite valikul on mahtuvus. Mahtuvus näitab maksimaalset elektri salvestamise võimekust, mahtuvuse mõõtühikuks on ametlikult megavatt-tund (MWh) või kilovatt-tund (kWh). Teiseks vaadeldavaks parameetrikaks on ühikvõimsus. Ühikvõimsus näitab maksimaalset kestvat võimsust, mida salvesti suudab arendada, ühikvõimsuse mõõtühikuks on megavatt (MW) ja kilovatt (kW). Samuti saab võrrelda erinevate seadmete kasutegurit. Kasutegur näitab, kui tõhus on salvestusprotsess protsentides. [4]

Elektrienergia salvestusseadmeid saab kategoriseerida funktsioonipõhiselt, reageerimisaja või salvestusmahu järgi, eristatav joonis on toodud allpool (Joonis 1.1). Funktsioonid jagunevad kolme suuremasse kategooriasse, milleks on UPS ehk katkematu võrgu toide ja elektri kvaliteet, elektrivõrgu toetamine ja koormuse nihutamine ning suureulatuslik koormustippude katmine. [5]



Joonis 1.1. Energia salvestamise tehnoloogiate positsioneerimine [5]

Joonis 1.1 on toodud erinevad salvestusseadmed vastavalt nende kasutustegurile. Joonise vertikaalteljel on toodud tüjendusaeg nimivõimsusel ning horisontaalteljel on süsteemi võimsus. Joonisel näidatud kollasesse kasti kuuluvad salvestid, mida kasutatakse katkestuste vältimiseks ning toite kvaliteedi parendamiseks. Rohelisse kasti kuuluvad energiasalvestid, millega saab toetada elektrivõrgu tööd ning sinises kastis on suurimad salvestid, mida kasutatakse koormuse katmiseks.

1.1 Kodutarbijale paigaldatavad elektrienergia salvestid

Kodutarbijatele on oluline, et energiasalvetus seade oleks paigaldatav ka nende enda koju. Peamisteks kriteeriumiteks lõpptarbijatele on salvestusseadme maksumus ja suurus, seetõttu ei ole paljudel majapidamistel võimalik ehitada hüdroakumulatsioonijaama selle suuruse ja geograafiliste vajaduste tõttu.

Tulenevalt salvestusmeetodikast on erinevatel salvestustehnoloogiatel iseärasused, mistõttu kõik salvestustehnoloogiad ei sobi igasse rakendusse. Adolfo Gonzalez on oma uuringus välja toonud erinevate tehnoloogiate sobivuse vastavalt rakendusest. [3]

Kõige olulisem tarbija vaates on katkematu ja avarii toide, mis aitab elektrivõrgu rikke korral. Tabel 1.2 väljatoodud tehnoloogiate valikus on sellisteks tehnoloogiateks erinevad akud ja vesinik-kütuseelemendid ja -mootor.

Tabel 1.2 Elektrisalvestuse tehnoloogiate sobivus eri rakendustesse [3]

	Hüdroakumulatsioon	Maa-alune hüdroakumulatsioon	Suruõhk-salvestid	Plii-happe akud	Teised akud	Läbivooluakud	Hoorattad	Ülikondensaatorid	Üijjuhtivad energisalvestid	Vesinik-kütuseelemendid	Vesinikmootor
Lühiste läbimisvõime parandamine (lühisejärgsete pingelohkude silumine)				X		X	X	X	X	X	
Katkematu toide				X	X	X	X			X	X
Avariitoide			X	X	X	X				X	X
Süsteemi stabiliseerimine ja pinge reguleerimine				X		X			X	X	
Koormuste ühtlustamine	X	X	X	X	X	X				X	X
Koormuste järgimine				X	X	X				X	X
Tipu katmine	X	X	X	X	X	X	X			X	X
Kiiretoimeline reserv				X	X	X	X			X	X
Tavaline reserv	X	X	X	X	X	X	X			X	X
Taastuenergiaallikate integreerimine	X	X	X	X	X	X	X			X	
Taastuenergiaallikate reserv	X	X	X	X	X	X				X	

1.1.1 Elektrienergia salvestite tüübid

Kodutarbijate salvestite tüübi valikul lähtutakse salvesti parameetritest ning rakendustest. Salvesti peab võimaldama tarbida energiat kohe, kui seda on vaja ning tagama vähemalt ühepäevase elektritarbimise. Teiseks tähtsaks teguriks on salvestusseadme maksumus, mis arvutatakse välja kilovatti kohta.

Tulenevalt ülevaltoodud põhjustest on kodutarbija vaates kõige mõistlikum kasutada akut ehk akumulaatorit. Järgnevalt analüüsitakse erinevaid akude tüüpe ning tehakse järeldus, milline aku sobib kõige paremini kodutarbijale.

1.2 Akumulaatorid

Akud ehk akumulaatorid koosnevad mitmesugustest erinevatest ainetest. Elektri salvestamine toimub läbi elektrikeemilise muundamise, mistõttu kutsutakse akusid ka elektrokeemilisteks salvestiteks. Õige aku liigi valikul, tuleb teha kompromisse vastavalt vajadusele, sest eri tüüpi akudel on erinevad omadused. Peamisteks nõueteks aku valikul on maksumus ning laadimis- ja tühjenemistsükli arv. [3]

Elektrokeemiline energiasalvestus on üha atraktiivsem, kuna tegemist on kompaktsel, hõlpsasti kasutatava, ökonoomse ja pakub võimalusel koheselt akust energiat tarbida. Akude tüüpe on erinevaid ning neid jaotatakse tavaliselt kemikaalsete omaduste järgi. [6]

Tänapäeval kasutatavad akud saab jagada nelja alamrühma:

1. Pliiakud
2. Nikkel-kaadmiumakud
3. Väävel-naatriumakud
4. Liitium-ioonakud

Tööpõhimõtte järgi sarnanevad ülaltoodud akud tavaliste akudega, kuid neid saab kasutada suurematel võimsustel ja neil on suuremad mahtuvused. Elektrokeemilisel reaktsioonil aitab toimuda kaks elektroodi, mis on sukeldatud elektrolüüti.

1.2.1 Pliiakud

Pliiakud olid ühed esimesed akutüübid, mida kasutati elektrivõrkude arendamise algusaegadel. Pliihappeakusid kasutati algselt lühiajaliseks energiasalvestiks ning tipukoormuste katmiseks [6]. Tänu sellele, et pliihappeakud on ühed esimesed akud, mis kasutusele võeti ligi 150 aasta tagasi on nad olnud kaua aega arendustöös. See omakorda on taganud edukuse, mis on muutnud pliiakud odavamaks, kauem kestvamaks, kiirema reageerimisaja ning madala isetühjenemise määraga seadmeteks. Pliiakude üheks suureks plussiks on nende paindlikkus, neid saab kasutada nii lühiajaliselt, mõneks sekundiks, kui ka pikaajaliseks protsessiks, kuni 8 tundi ja rohkem [3]. Keskmiselt on pliiakude eluiga 15 aastat või 2000 laadimis-tühjenemistsükli, mis sõltub tühjenemissügavusest. Lisaks loetakse pliiakude kasuteguriks 85%. [6]

Pliiakud jagunevad veel omakorda kaheks. Ühed on uputatud pliiakud ning teised ventiilreguleeritavad akud. Mõlemad akud koosnevad nii pliist, kui ka pliioksiidist. Uputatud pliiaaku on sukeldatud lahusesse, mis koosneb veest (65%) ja väävelhapest (35%). Samas on ventiilreguleeritud pliiakud suletud õhku reguleerivate ventiilidega. Ventiilide mõte on see, et need ei lase õhul pääseda akumulaatorisse ning ei lase vesinikul akumulaatorist väljuda. Vähem hooldust nõuavad ventiilreguleeritud akud, kuid nende hind on kallim ja eluiga lühem. [3]

Rakendused ja omadused

Pliiakusid kasutatakse peamiselt kahel otstarbel:

1. Sisepõlemismootorite käivitamiseks
2. Katkematu ja tagavaratoiteallikana või suure tühjendamissügavusega rakendustes.

Tabel 1.3 Pliihappeaku eelised ja puudused [7]

Eelised	Puudused
Pikk eluiga	Keskkonna laiaulatuslik mõju
Madal kapitalikulu	Madal energiatihedus ruumala ühiku kohta
Suur ühikvõimsus	Sagedased ja sügavad tühjendamised vähendavad eluiga oluliselt
Väga hea katkematuks võrgutoiteks	Limiteeritud tsükliline eluiga

Investeering

Investeeringu maksumus pliiakude puhul on vahemikus 110...190 €/kWh. [8]

1.2.2 Nikkel-kaadmiumakud

Nikkel-kaadmium akud olid pliiakude kõrval põhilised suurte impulssvõimsuste korral kasutatavad akud tänu suuremale erivõimsusele ja elektrienergiale, kuni täiuslikumate tehnoloogiate ilmumiseni. Tänapäeval eelistatakse nikkel-kaadmiumakude asemel metallhübriid ja liitium-ioonakusid, kuna kaadmium on mürgine ning kõnealune tehnoloogia on tunduvalt kallim. [3]

Rakendused ja omadused

Nikkel-kaadmiumakusid kasutatakse peamiselt sülearvutites, videokaamerates, puurides ja muudes väiksemates akuga töötavates seadmetes, mis nõuavad ühtlast voolutühjendust. [7]

Tabel 1.4 on toodud välja nikkel-kaadmiumaku peamised eelised ja puudused. Antud hetkel on aku tehnoloogias puuduseid rohkem kui eeliseid ning seetõttu ei ole aku

leidnud väga laialdast kasutust. Kuigi akul on olemas mitmeid väga häid omadusi ei ole see kodutarbijale sobilik, sest kaadmium on mürgine metall ning seetõttu ei ole mõistlik antud akutüüpi endale koju panna.

Tabel 1.4. Nikkel-kaadmiumaku eelised ja puudused [7]

Eelised	Puudused
Vastupidav, kõrge tsüklite arv nõuetekohase hooldusega	Kallis alginvesteering
Võimaldab ülikiiret laadimist	Kaadmium on mürgine metall
Hea energiatihedus	Uuemate süsteemidega võrreldes suhteliselt madal
Pikk eluiga, kuni 20 aastat	Kõrge isetühjenemine
	Madal elemendipinge, kõrgema pinge saamiseks on vaja palju elemente
	Vajab ohutuse tagamiseks juhtimissüsteemi

Investeering

Nikkel-kaadmiumakud on pliiakudest kallimad, nende alginvesteering jääb 400...500 €/kWh vahele. Kuid võrreldes teiste akude tüüpidega on hoolduskulud NiCd akudel väiksemad. [3]

1.2.3 Väävel-naatriumakud

Võrreldes pliiakudega on väävel-naatriumakudel kolm korda suurem energiatihedus, lisaks pikem eluiga ja väiksem hooldusvajadus. Samuti on NaS akul suur kasutegur, mis jääb 86-92% vahele. Kuid nende kõrge töötemperatuuri tõttu, mis jääb 300-350°C juurde ei saa kasutada neid tavatarbija seadmetes, vaid üheks kasutusviisiks on elektrivõrgu energia salvestamisel. [7]

Rakendused ja omadused

Väävel-naatriumakude parim omadus on võime arendada püsivat väljundvõimsust või impulssvõimsust, mis on kuni viis korda suurem püsivast nimivõimsusest. Samuti on

aku võimeline arendama impulssvõimsust ka pikaajalise tühjaks laadimise protsessi käigus, mistõttu on nad perspektiivikad koormuste juhtimiseks ja energia kvaliteedi tagamiseks. [3]

Tabel 1.5. Eelised ja puudused väävel-naatrium akul [7]

Eelised	Puudused
Potentsiaalselt odav toota, kuna antud toorained on odavad	Vajab kõrget töötemperatuuri, üle 300°C
Pikk eluiga, kuni 4000 tühjenemisladimistsükli	Ohtlik, tänu kõrgele reaktsioonivõimega metallilisele naatriumile, mis on veega kokkupuutel põlev
Hea energia- ja võimsustihedus	Ranged kasutus- ja hooldusnõuded
Kõrge kasutegur, kuni 92%	Piirdekonstruktsiooni ehitamise lisakulud, et vältida leket

Investeering

Investeeringu maksumus jääb 600 €/kWh juurde, kuid tehnoloogia laiemale kasutuselevõtule ennustatakse odavnemist üle 33%. [3]

1.2.4 Liitium-ioonakud

Viimaste aastatega üha enam populaarsust kogunud liitium-ioonakud on kasutusel nii elektriautodes kui muudes energiat vajavates seadmetes. Liitium-ioonakud on niivõrd populaarsed tänu kõrgeimale energiatihedusele ning peetakse ohutuks võrreldes teiste akuliikidega. [7]

Liitium-ioonakudel on võrreldes teiste akumulaatoritega kõrge elemendi nimipinge, tänu millele hoitakse kokku elementide arvus jadaühenduses. Näiteks saab kolm NiCd elementi, elemendi pingega 1,2 V asendada ühe Li-ioonaku elemendiga. Teine väga suur eelis teiste akude ees on eeldused suureks hinnalanguseks masstoodangu puhul ning kõrge energiatihedus. Akumulaatori teeb ainulaadseks see, et aku peab vastu nii kiirele kui aeglasele tühjendamisele. Ajaperiood võib jääda seal alates sekunditest kuni nädalateni. Peamine võrdlus käib plii-happeaku ja liitium-ioonaku vahel, kuna mõlema korral on võimalik lühike tühjendamise aeg. [3]

Rakendused ja omadused

Liitium-ioonakud jaotatakse viite gruppi, vastavalt elektrolüütidele ja positiivselt laetud elektrodidele. Nendeks viieks gruppiks on: liitium-koobaltoksiid, liitium-nikkel-mangaan-koobaltoksiid, liitium-raudfosfaat, liitium-titanaat ja liitium-polümeer. Tänapäeval on liitium-ioonakud peamine akutüüp suure erieneergia ja erivõimsust vajavates rakendustes nagu näiteks elektriautod. [3]

Liitium-koobaltoksiid aku koosneb koobaltoksiidkatoodist ja grafiidist süsinikandoodist. Tühjenemise ajal liiguvad liitiumioonid anoodilt katoodile. Vool pöördub laadimisel tagasi. Liitium-koobaltoksiid aku puuduseks on suhteliselt lühike eluiga, madal termiline stabiilsus ja piiratud koormusvõime. [7]

Liitium-nikkel-mangaan-koobaltoksiid aku on üks edukamaid liitiumioonsüsteeme. Aku arhitektuur moodustab kolmemõõtmelise spinellstruktuuri, mis parandab ionide voolu elektrodile. Selle tulemuseks on väiksem sisetakistus ja täiustatud voolu käsitlemine. Struktuuri eelis on kõrge termiline stabiilsus ja suurem ohutus, kuid eluiga ja tsüklite arv on piiratud. Liitium-nikkel-mangaan-koobaltoksiid akud võivad töötada nii energia- kui ka võimsuselementidena. [7]

Liitium-raudfosfaat aku tagab hea elektrokeemilise jõudluse madala takistusega, seda tänu nanomõõtmelise fosfaatkatoodi materjaliga. Aku peamiseks eeliseks on kõrge voolutugevus ja pikk tööiga, hea termiline stabiilsus ja ohutus. [7]

Liitium-titanaat akud asendab tüüpilises liitiumioonaku anoodis grafiidi liitium-titanaadiga ja materjal moodustub spinellstruktuuriks. Katoodiks võib olla kas liitium-mangaanoksiid või nikkel-mangaan-koobalt. Liitium-titanaadi elemendi nimipinge on 2,4 V ning seda saab kiirlaadida. See annab suure tühjendusvoolu mis võib olla kuni 10 korda suurem nimivõimsusest. Teiseks eeliseks on suurem tsüklite arv, kui tavalisel liitium-ioonakul. Liitium-titanaat on ohutu, ning selle mahtuvus -30 °C juures on 80%. [7]

Tabel 1.6. Eelised ja puudused liitium-ioonakul [7]

Eelised	Puudused
Kõrge eriennergia ja suur erivõimsus	Kaitseahela vajadus, et vältida soojuskadu
Pikk tühjenemistsükkel ja säilivusaeg, hooldusvaba	Aku kõrge temperatuur kõrge koormuse korral
Kõrge kasutegur 90...98%	Külmas võimatu kiirelt laadida
Lihtne laadimisalgoritm ja lühike laadimiseaeg	Palju regulatsioone suurtes kogustes transportimisel

Liitium-ioonakudes kõige populaarsem elektrolüüt on liitium-polümeer sool, mis on lahustatud etüleenkarbonaadi lahustisegus. Liitium-polümeer kaitseb ja passiveerib alumiiniumi, mis on katoodi voolukollektori materjal. Etüülkarbonaadil on kõrge dielektriline konstant, mis tagabioonjuhtivuse. [9]

Investeering

Investeeringu maksumus liitium-ioonakude puhul jääb 300 €/kWh kohta. Tehnoloogia edasisel arendamisel ennustatakse hinna langemist 150 €/kWh juurde. [7]

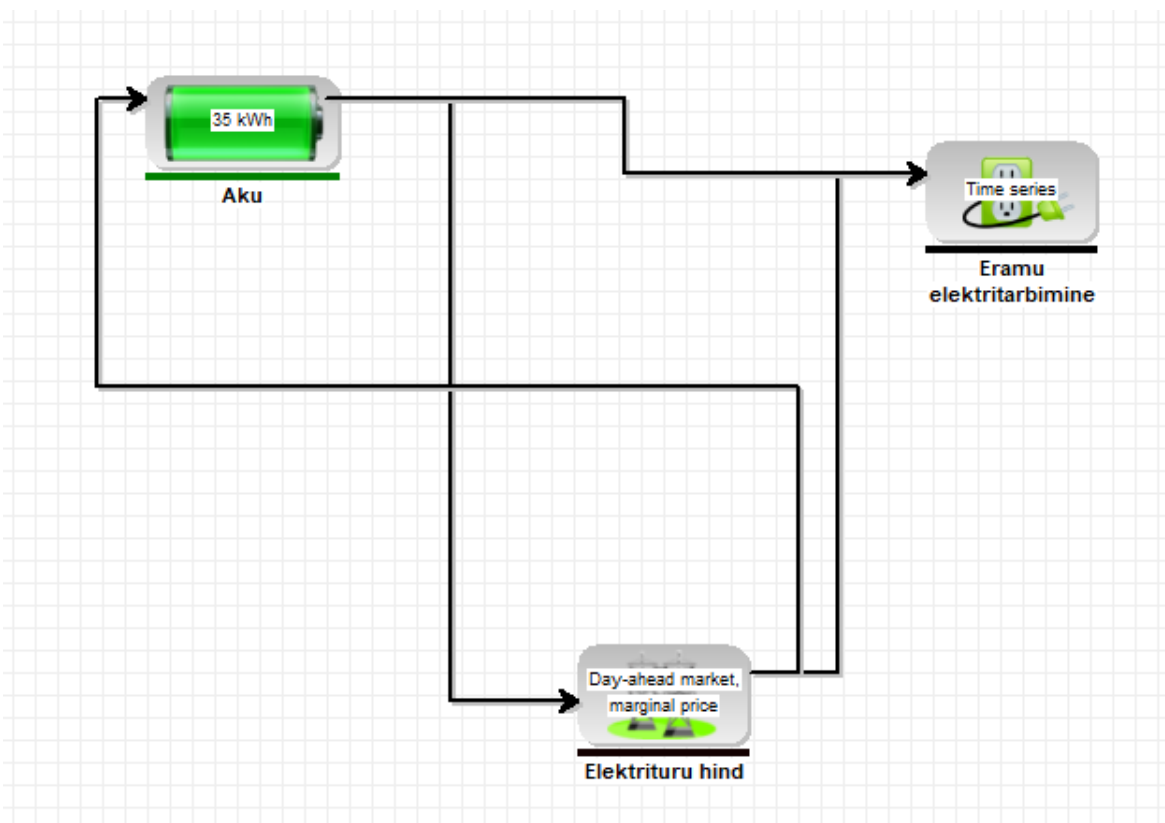
Töö analüüsi osas kasutatakse kahte erinevat aku tüüpi, milleks on valitud pliiaku ja liitium-ioonaku. Tänapäeval võrreldakse plii- ja liitium-ioonakusid omavahel kõige enam tänu nende ühistele omadustele, milleks on kiire aku tühjendamise aeg ja periood, kaua suudavad nad katkematut toidet anda. Samuti on investeering samas suurusjärgus, mis on kodutarbijale suurimaks aspektiks akumulaatori soetamisel. Võrreldes väävel-naatriumakudega on hind 2-3 korda odavam.

Nikkel-kaadmiumaku ei ole kodumajapidamistes valikus selle mürgisuse tõttu ning samuti on selle hind oluliselt kallim kui pliiakul. Väävel-naatriumaku puhul on tegu väga areneva tehnoloogiaga, kuid kuna hind langeb tulevikus siis on selle praegune hind veel liiga kallis. Samuti on väävel-naatriumakul väga ranged hooldus- ja kasutusnõuded. Liitium-ioonaku puhul on oluliseks kriteeriumiks väga hea energiatihedus ning hinnaklass sarnane pliiakuga.

2. MODELLEERIMISTARKVARA ENERGYPRO

Käesoleva peatüki eesmärk on tutvustada energyPRO modelleerimistarkvara ja selle erinevaid funktsioone. Samuti kirjeldatakse erinevaid sisendandmeid ning mudelit, mida töös kasutatakse.

EnergyPRO on modelleerimistarkvara, mida kasutatakse keeruliste energeetika projektide analüüsimiseks, koos elektri- ja soojusenergiaga. EnergyPRO-s saab vaadelda detailselt nii tehnilist kui ka finantsanalüüsi. Tarkvara on loodud võimalikult kasutajasõbralikult, pakkudes kasutajale väga selget ülevaadet. Tarkvara pakub laias valikus majanduslikke ja tehnilisi aruandeid, mille hulgas on simuleeritud mudeli graafiline esitus, mis annab põhjaliku ülevaate keerukast energiasüsteemi dünaamikast. [10]



Joonis 2.1 Mudeli skeem modelleerimistarkvaras energyPRO

EnergyPRO võimaldab kasutajal valida kahe erineva strateegia vahel – neto tootmiskulude minimeerimine ja kasutaja poolt loodud strateegia. Antud lõputöös on kasutatud neto tootmiskulude minimeerimis strateegiat. Strateegia võtab vaatluse alla kasutaja poolt sisestatud andmed, mis on sisestatud tegevuskulude alla. Antud mudeli puhul on nendeks – elektri hind, taastuvenergia tasu, aktsiis ja võrgutasud. [11]

EnergyPRO mudelis kasutatakse energiat akust siis, kui hind on päeva kõrgeim. Kuid aku laetakse täis päeva kõige madalamate hindade juures. Samuti võtab energyPRO arvesse laadimise ja tühjakslaadimise efektiivsust. [11]

Töös uuritakse eramut, millele on juurde lisatud salvestuslahendus. Salvestuslahendusteks on valitud ainult akumulaatorid, nagu 1. peatükis on väljatoodud. Töös kasutatavad akud on järgmised:

- plii-happeaku;
- liitium-ioonaku.

Akudele vajaminevad sisendandmed on järgmised:

- võimsus (kW);
- mahtuvus (kWh);
- kasutegur (%);
- kasutatavusmäär (%);
- eluiga (tsüklite arv);
- maksumus.

The screenshot shows the 'Liitiumioonaku' configuration window. The 'Name' field is set to 'Liitiumioonaku'. The 'Power and capacity units' are set to 'kW/kWh'. There is an unchecked checkbox for 'Non availability periods'. The 'Battery' section contains the following values: 'Max Capacity' is 33,6 kWh, 'Utilization' is 90,0 %, and 'Capacity' is 30,2 kWh. The 'Charging / Discharging' section has a table with the following data:

	Capacity	Efficiency
Charging Power	5.0 kW	100.0 %
Discharging Power	5.0 kW	95.0 %

Joonis 2.2. Salvesti redigeerimisaken

Lisaks akuandmetele on vaja programmis nii tasuvuse hindamiseks kui ka akude mõjust koormustippudele tunnipõhiseid andmeid. Mudeli koostamisel on arvestatud allpool toodud parameetritega:

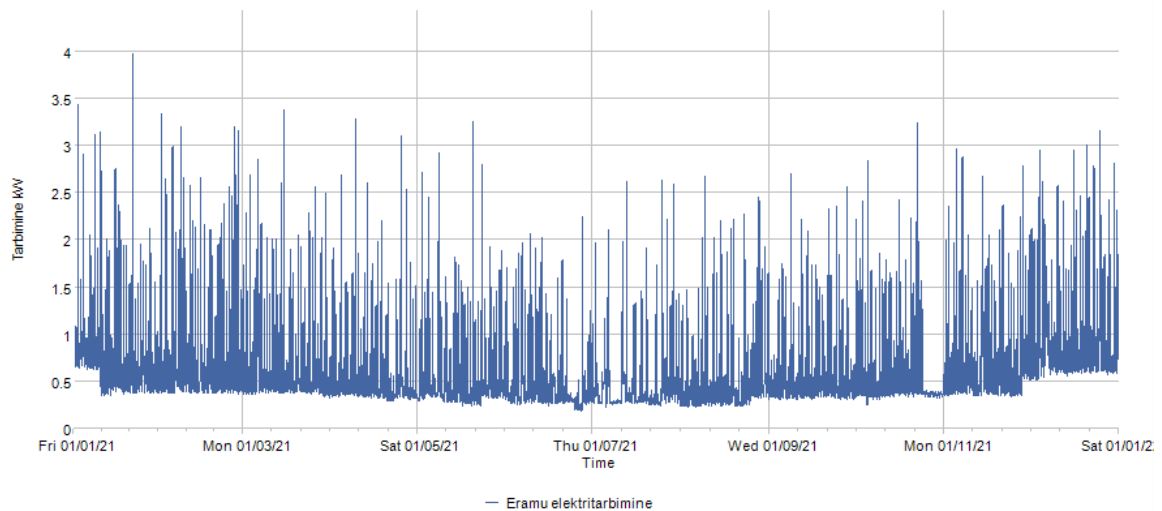
- elektrienergia börsihind aastal 2021 (€/MWh);
- võrgutasu tariif (öösel ja päeval);
- taastuvenergia tasu (€/kWh);
- aktsiis (€/kWh);
- peakaitsme suuruse tasu (€/kuus);
- eramaja elektritarbimine aastal 2021 (kWh).

Jaotusvõrgus toimub igal aastal ka katkestusi (rikkelased ja plaanilised) ning nende katkestusaegadega arvestatakse ka antud uurimistöös. Seda selliselt, et võetakse keskmine eramu, kus on kaks elatist teenivat täiskasvanut inimest ning eesti keskmise aastapalga järgi arvutatakse välja inimese ühe tunni tasu. See on võetud eeldusel, et ilma elektrita ei saaks inimene midagi teha, eriti maailmas, kus kodukontoris olemine aina populaarsust kogub.

Lõputöös koostatud energyPRO mudel on modelleeritud kasutades järgnevaid komponente: elektritarbimine, elektriturg ja aku. Need süsteemid on omavahel ühendatud nii, et salvestist saab katta elektritarbimist ja müüa võrku.

2.1 EnergyPRO lähteandmed

Joonis 2.1 toodud komponentidel on sisestatud tunnipõhiselt reaalsed lähteandmed. Lisatud on 2021. aasta Kambja vallas eramaja tunnipõhine elektritarbimine ja NordPool 2021. aasta hinnad €/kWh kohta [12]. Ülejäänud lähteandmed on valitud iseseisvalt või ajaloo keskmiste näitajate kohta.



Joonis 2.3. Eramu 2021. aasta elektritarbimine

Joonis 2.3 on uurimisobjekti 2021. aasta elektritarbimise koormusgraafik. Joonisel 2.3 on näha oktoobris praktiliselt horisontaalset joont ning see tähistab seda aega, kui majapidamine oli inimestest tühi ning oli vaid eramu baastarbimine. 2021. aasta suurim tarbimine jäi detsembrisse, kui kasutati 689 kWh elektrienergiat. Kõige madalama tarbimisega kuu oli juuli, millal oli tarbimine 333 kWh. Aasta keskmine ööpäevane tarbimine oli 14,8 kWh. Seitsmel kuul on keskmine ööpäevane tarbimine alla aasta keskmise ning ülejäänud viiel kuul üle keskmise. Majapidamise ööpäevane tarbimine on 2021 aastal kõige suurem 23. detsembril, millal kasutatakse 32,95 kWh elektrienergiat ning väikseim 25. juunil 6,28 kWh.

Aku valiku tegemisel lähtutakse eelkõige kolmest peamisest suurusest. Esimeseks kriteeriumiks on aku mahtuvus, see näitab maksimaalset energia hulka, mida elektrisalvesti suudab endas talletada. Antud projektis on oluline, et valitud aku kataks ära keskmise ööpäevase elektrienergia tarbimise ehk vähemalt 14,8 kWh. Teiseks oluliseks määrajaks aku valikul on nimivõimsus, mis näitab, kui palju on akumulaator võimeline korraga energiat tarbimiseks tagasi andma. Kolmas vaadeldav parameeter on kasutegur, seda eriti antud projektis, kus olulisel kohal on tasuvus. Kasutegur näitab, kui suur osa tühjendamise energiast on kasulik ehk kui suure osa mahtuvusest on võimalik realselt ära tarbida.

Suurim tarbimine eramus ühe tunni jooksul oli 4 kWh. Käesolevas projektis vaatame, et akud oleksid võimelised väljastama vähemalt 5 kW võimsust korraga tarbimisse. Võimsust saab mõjutada nii nimipinge tõstmise kui ka nimivoolu tõstes.

Antud projektis valitakse välja kaks erinevat akut. Üheks akutüübiks on liitium-ioonaku ning teiseks vaadeldavaks akuks on pliiaku. Üldiselt on akude andmete lehel antud nimipinge voltides (V) ja aku mahutavus amper-tundides (Ah), mille järgi saab arvutada aku energiamahutuvuse järgenva valemi (2.1) abil:

$$E = U \cdot C \quad (2.1)$$

kus, E – aku energiamahutuvus, Wh,
 U – nimipinge, V,
 C – mahutavus, Ah.

Valemiga (2.1) saab teada aku kogumahutuvuse. Antud valemis ei ole arvestatud kasuteguriga, mis aku on võimeline eraldama tarbimiseks. Akumulaatori kasutatava energia arvutamiseks kasutatakse eelnevas valemis saadud tulemust ning korrutatakse see kasuteguriga:

$$E_{kasulik} = E_{kogu} \cdot \mu \quad (2.2)$$

kus, $E_{kogu} = E$ – aku energiamahutuvus, Wh,
 μ – kasutegur, %.

Lisaks mõjutab reaalselt kasutatavat energiat aku tühjendamissügavus, see on toodud erinevate akude andmelehel koos tsüklite arvuga. Akude eluea pikaajalises säilitamisel on oluline, et akusid ei laetaks täiesti tühjaks. Samuti mõjutab see investeeringu suurus akusse, sest tuleb arvestada mahutuvusega, mis aku on võimeline väljastama peale tühjendamismääraga arvestamist. Optimaalse tühjendamissügavusega aku kasutatav energia võrdub valemiga:

$$E_{kasutatav} = E_{kasulik} \cdot DoD \quad (2.3)$$

kus, DoD – tühjendamissügavuse määr, %.

Akusid saab ühendada nii jadamisi kui ka rööbiti. Rööbiti ühendades muutub akudel mahutavus, mis liidetakse kokku, kuid akude nimipinge ei muutu. Samas jadamisi ühendatud akudel muutub nimipinge. Jadamisi ühendatud akude nimipinged liidetakse omavahel, kuid mahutavus jääb akudel samaks.

Samuti on oluline, et akul oleks piisavalt võimsust, et anda vajaminev energia akust tarbimisele. Selleks tuleb välja arvutada aku maksimaalne tühjenemisevõimsus, milleks on vaja nimipinget ja nimivoolu. Nimipinge on teada, kuid nimivoolu saab arvutada:

$$I = \frac{Ah}{h} \quad (2.4)$$

kus, A – nimivool, A.

Nüüd kui on teada nimivool saab välja arvutada väljundvõimsuse, selleks korrutame nimivoolu ja nimipinge omavahel:

$$P = U \cdot I \quad (2.5)$$

kus, P – võimsus, W.

Akude võrdlemisel on oluline jälgida, et kõik summad ja tehnilised parameetrid oleksid võrreldavad. Näiteks on vajalik erinevate akude hinna võrdlemiseks arvutada hind tsükli kohta. Selle järgi saab teada, kui palju maksab ühe tsükli hind akus. Samuti näitab tsükli hind ära, millal on mõistlik akut kasutada. Kui aku tsükli hind on 0,1 €/kWh kohta, siis on mõistlik akut kasutada alles siis, kui energiahindade päevane muutus ületab 0,1 €/kWh kohta. Tsükli hinda arvutatakse akudel järgnevalt:

$$\text{Tsükli maksumus} = \frac{\text{Hind}}{\text{Mahutavus} \cdot \text{tühjendamise s\u00fcgavus} \cdot \text{ts\u00fcklite arv}} \quad (2.6)$$

V\u00f6rrandis (2.6) toodud arvutus annab tulemiks lisaks akude v\u00f6rdlusele ts\u00fckli hinna mis näitab \u00e4ra, millal on mõistlik akut kasutada. Kui aku ts\u00fckli hind on 0,1 €/kWh kohta, siis on tasuv akut kasutada alles siis, kui energiahindade p\u00e4evane muutus \u00fcletab 0,1 €/kWh kohta.

2.1.1 Pliiaku valik

Pliiaku valiku alampeat\u00fckis v\u00f6rreldakse erinevaid pliiakusid ning tehakse anal\u00fc\u00fcs, millist akut on mõistlik meie mudelis kasutada. Vaadeldakse nelja erinevat pliiakut ning koondatakse akude omadused tabelisse. \u00dcheks valiku kriteeriumiks pliiaku puhul on see, et tootja oleks p\u00e4ris Euroopast, sest Aasia toodanguga ei saa kindel olla, et andmed on t\u00f6esed.

Oluliseks valiku kriteeriumiks pliiaku puhul on ts\u00fcklite arv vastaval optimaalsele t\u00fcjendamiss\u00fcgavusele. Mida v\u00e4iksem on t\u00fcjendamiss\u00fcgavus, seda rohkem ts\u00fckleid on v\u00f6imeline aku tegema. Kogukasuteguriks v\u00f5etakse Energiasalvestid ja -salvestustehnoloogias v\u00e4lja toodud 85%.

Esimene valitud aku on Accurat Traction T160 Versorgungsbatterie 160 Ah. Tegemist on plii-happeakuga, mille nimipinge on 12 V ja mahtuvus on 160 Ah. 30%

tühjendamissügavusega on tootjapoolt andmelehel kirjas, et aku on võimeline tegema 750 täistsükli ning 100% tühjendamismääraga 180 tsükli. Samuti on andmelehel kirjas, et maksimaalne aku laadimisvool on 28 A, samas tühjendusvool lühiajaliselt ehk 5 sekundit võib kerkida kuni 1412 A-ni. [13] Aku hind on 178 € koos 19 protsendilise käibemaksuga ehk 144,1 € ilma käibemaksuta. [14]

Teiseks võrdluseks on valitud plii-happeaku GreenAkku Zyklusfeste Lead Carbon Batterie 12 V 150 Ah [15], mille nimipinge on 12 V ja nimivõimsus 150 Ah. Aku eluiga on vastavalt tühjendamissügavusele 30% - 90% 2000 - 600 tsükli. Maksimaalne laadimisvool on 36 A ning soovituslik 15 A. Maksimaalne lühiajaline tühjendusvool on 1800 A. Aku hind on 351 € koos 19 protsendilise käibemaksuga ning ilma käibemaksuga 284,6 €.

Kolmandaks pliiakuks on valitud plii-happeaku Accurat Industrial I195 8V 195Ah Versorgungsbatterie. Aku nimipinge on 8 V ja laengumahtuvus 195 Ah. Akumulaatori tsükliline eluiga on alates 350 kuni 2550, seda vastavalt tühjendamissügavusele, kus 350 tsükli on võimeline aku tegema 100 protsendilise ning 2550 10 protsendilise tühjenemismääraga. [16] Aku hinnaks koos käibemaksuga on 195 € ning ilma käibemaksuta 157,6 €. [17]

Neljandaks pliiakuks on valitud geelaku GreenAkku Zyklusfeste GEL Batterie 12V 100Ah, mille nimipinge on 12 V ja laengumahtuvus 100 Ah. Geelaku eluiga on 30% tühjendamissügavusega 2500 tsükli ning 50% tühjendamissügavusega 1400 tsükli. Maksimaalne tühjendusvõimsus on 500 A. Hinnaks on akul koos käibemaksuga 269 € ning ilma 217,9 €. [18]

Tabel 2.1 on toodud võrdlus nelja erineva pliiaku kohta, kus on võrreldud nende hindasid ja tehnilisi näitajaid, et valida kõige optimaalsem lahendus eramajale. Kasutades eelpool toodud valemid, arvutatakse välja vastavad tehnilised parameetrid.

Tabel 2.1. Pliiakusid võrdlev tabel

Aku	Accurat Traction T160	GreenAkku Lead Carbon Batterie	Accurat Industrial I195	GreenAkku GEL Batterie
Nimipinge, V	12	12	8	12
Laengu- mahtuvus, Ah	160	150	195	100
Tsüklite arv 30% tühjendus- sügavusega	750	2000	1600	2500
Mahtuvus, kWh	1,92	1,8	1,56	1,2
Kasutegur, %	85	85	85	85
Kasutatav energia, kWh	1,63	1,53	1,33	1,02
Hind, €	178	351	195	269
Hind tsükli kohta, €/kWh	0,485	0,382	0,305	0,352

Kõige odavama tsüklihinnaga aku on Accurat Industrial I195, kuid tsüklite arv 30% tühjendus-sügavusega on 1600 tsükli, mis võib tähendada, et 10 aastase perioodi juures tuleb soetada uued akud. Odavuselt teine aku on ainuke geelaku ning samuti on selle tsüklite arv suurim. Seetõttu valitakse kodumajapidamise pliiakuks GreenAkku GEL Batterie.

2.1.2 Liitium-ioonaku valik

Liitium-ioonaku alampeatükis analüüsitakse nelja erinevat liitium-ioonakut ning valitakse välja kõige sobilikum aku, mis oleks võimalikult odav ning heade tehniliste parameetritega. Samuti hinnatakse, kas on vaja kasutada mitme eri tootja poolt valmistatud akusid või leidub üks kindel mudel, mis kataks keskmise tarbimise.

Esimene valitud liitium-ioonaku on Pylontech Hochvolt LiFePO4 Powercube 14,4kWh, tegu on liitium-raudfosfaat akuga, mille ühe aku mooduli nimipinge on 48 V ja laengumahtuvus 50 Ah. Maksimaalne laadimis- ja tühjenemisvõimsus on 4,8 kW. Aku mooduli tühjenemissügavus on 80% ja tsükliline eluiga ulatub 3500 tsüklini. Samuti on tootja poolt kinnitatud eluiga vähemalt 10 aastat. Akumooduli efektiivsus on 96% ning maksumus koos käibemaksuga 9119 €. [19]

Teiseks akuks on valitud LG Chem RESU13, mille nimipinge on 48 V ja kogu mahtuvus 13,1 kWh, millest kasutatakse 12,4 kWh. Aku eluiga on 80% tühjenemismääraga 6000 tsükli või kuni 10 aastat. Maksimaalne võimsus on 5 kW ning mooduli efektiivsus on 95%. Seadme maksumus on 5590 € koos käibemaksuga. [20]

Kolmandaks liitiumakuks on valitud RCT Power Batterie, mille nimivõimsus on 9,6 kWh. Aku eluiga 80% tühjenemismäära juures on 5000 tsükli. Maksimaalne võimsus kuni 5 kW ning efektiivsus 90%. Mooduli hind on 7751 € koos käibemaksuga. [21]

Neljandaks liitiumakuks on valitud Tesla Powerwall, mille nimivõimsus on 13,5 kWh ning kasutegur 90%. Aku eluiga on kuni 10 aastat, kusjuures 100% tühjaks laadimise juures on aku võimeline tegema 3200 tsükli. Aku on võimsus on 5 kW ning lühiajaliselt kuni 7 kW. Mooduli hind on 7360 € koos käibemaksuga. [22]

Tabel 2.2 on toodud eelpool mainitud akude võrdlus, mille järgi tehakse lõplik otsus, millist akut on kõige mõistlikum kasutada. Võrreldakse erinevaid tehnilisi ja majanduslikke parameetreid, et valida kõige optimaalsem lahendus eramajale. Erinevalt pliiakudest, on liitiumakud seeriates, kus erinevatel moodulitel on tehnilised parameetrid samad välja arvatud mahtuvus. Töös kasutatakse vajadusel valituks osutunud akuga samas seerias olevaid akusid, et säästa alginvesteeringu arvelt.

Tabel 2.2. Liitiumakusid võrdlev tabel

Aku	Pylontech Hochvolt LiFePO4 Powercube	LG Chem RESU13	RCT Power Batterie	Tesla Powerwall
Nimipinge, V	48	48	300...432	
Laengu- mahtuvus, Ah	50	273	32	
Tühjenemis- määr, %	80	90	80	100
Tsüklite arv vastavalt tühjenemis- määrale	3500	6000	5000	3200
Mahtuvus, kWh	14,4	13,1	9,6	13,5
Kasutegur, %	96	95	90	90
Kasutatav energia, kWh	13,82	12,4	8,64	12,52
Hind, €	9119	5590	7751	7360
Hind tsükli kohta, €/kWh	0,236	0,0835	0,224	0,183

Tabel 2.2 selgub, et kõige odavam investeering LG Chem seeria akusse, kus ühe tsükli maksumus on 0,094 €/kWh kohta. Pylontech Hochvolt Powercube ja RCT Power Batterie akud on tsükli maksumuse poolest rohkem kui kaks korda kallimad ja Tesla Powerwall peaaegu kaks korda kallim.

Nüüd, kui on teada, millist liitium-ioonakut ja pliiakut kasutatakse saame arvutada mitu akut on kummagi versiooniga vaja, et suudaksime katta ära keskmise ööpäevase elektrienergia tarbimise antud eramus. Antud töös ei arvestata iseseisva tühjenemisteguriga, kuna eeldatakse, et aku on pidevas kasutamises.

Nii nagu eelnevalt mainitud oli suurim päevane energiatarbimine 33 kWh. Selleks, et teada, mitu akut on vaja osta tagamaks majale ühe ööpäevane elektrienergia vajadus on vaja jagada maksimaalne ühepäevane elektrienergia kasutus aku kasuliku

energiamahtuvusega ehk selle saame jagades maksimaalse päevase tarbitava energia aku kasuliku energiaga, mis on pliiaku puhul järgmine:

$$i = \frac{32,952}{1,02} = 32,31 \text{ akut}$$

Antud projektis ümardame akude arvu alati ülespoole, sest akut ei ole võimalik poolitada ning võib tekkida olukord tulevikus, kus tarbitakse veel rohkem. Ehk pliihappeakusid on kokku vaja 33 tükki. Ühe pliihappeaku hinnaks on 269 €, mis teeb akudele minevaks investeeringuks kokku $investeering = 33 \cdot 269 \text{ €} = 8877 \text{ €}$.

Liitiumakuks osutus valituks LG Chem Resu13 ja LG Chem Resu10 [20]. Allpool tabelis on välja toodud eelnevalt tehtud arvutuste põhjal liitium-ioonaku ja pliihappeaku võrdlus. Valitud on kaks erinevat liitium-ioonakut, et säästa investeeringutelt ning mitte üledimensioneerida vajaminevat akut.

Lisaks tehnilistele parameetritele on mudelis arvestatud ka majanduslike parameetritega. Nimelt kasutatakse Eesti keskmist palka [23], et arvestada aastas tekkiva kahju üle, kui inimesel puudub elekter. Eesti keskmine palk mehel on 2021. aasta neljanda kvartali seisuga 1737 € ning naistel 1438 €. Leibkonna peale teeb see kokku 3175 €/kuus. Teiseks kasutatakse 2019. aasta Elektrilevi poolt väljastatud andmeid, kui palju oli katkestusi ning mis oli katkestuste keskmine aeg tarbimiskoha kohta. [24] Tekkiva kahju suuruseks on vaja teada, kui palju maksab kahe keskmist palka teeniva inimese tund, mis arvutatakse järgneva valemiga:

$$Tunni hind = \frac{12 \cdot 3175}{8760} = 4,35 \text{ €/h} \quad (2.7)$$

Peale inimese tunnihinna teada saamist saab korrutada katkestatud aastase elektrikatkestuse aja leibkonna keskmise tunnihinnaga, mis 2019 aasta Elektrilevi poolt avaldatud andmete järgi on:

$$Riketest tekkiv kahju = 4,35 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 4,48 \text{ h} = 19,5 \text{ €} \quad (2.8)$$

Lisaks kasutatakse Elektrilevi OÜ võrguteenuse paketti „Võrk 2“, mis hakkab kehtima 01.06.2022 ning mille elektrienergia päevane ja öine edastamine maksab vastavalt Tabel 2.3 toodule . Lisaks on igal võrguteenuse paketil ka tasu vastavalt paikaitse suurusele. Erasmus on hetkel paigaldatud 16 A suurune peakaitse. [25] Samuti kehtib tarbimisel ka elektriaktsiis [26] ja taastuvenergia tasu [27], mis on samuti toodud Tabel 2.3. Järgnevalt on tabelis väljatoodud erinevad konstantsed suurused, mida kasutatakse antud mudelis.

Tabel 2.3 Muutumatud suurused

Inflatsioon	3%
Keskmine palk majapidamise kohta	3175 €/kuus
Katkestusaeg ühe eramu kohta aastas	269 minutit
Võrgutasud päev	7,31 senti/kWh
Võrgutasu öö	4,25 senti/kWh
Peakaitsme tasu	2,79 €/kuus
Elektriaktsiis	0,1 senti/kWh
Taastuenergia tasu	1,13 senti/kWh

Tabel 2.3 on väljatoodud erinevad konstantsed suurused, mida kasutatakse antud mudelis. Kõik suurused sisestatakse energyPRO mudelis kulureale, misjärel tarkvara arvutab välja kogu aastase kulu ning samuti väljastab kuidas mõjutas mudel koormusgraafikuid.

3.SALVESTI TASUVUSE ANALÜÜS

Käesolevas peatükis vaadeldakse kahe erineva aku tasuvust võrreldes ilma akuta olukorraga. Salvesti tasuvusanalüüs teostatakse ühe aku eluea kohta. See tähendab, et energyPRO mudelis vaadeldakse erinevaid perioode pliihappeaku ja liitium-ioonaku puhul. Selline taktika on valitud selliselt, et näha kas akule minev investeering muutub tasuvaks või mitte. Mudelis ei arvestata akuhindade odavnemisega ega akutehnoloogia arenguga. Samuti ei arvestata võrgu arenguga, mis tähendab, et igal aastal on rikete kestus sama. Lisaks vaadeldakse antud peatükis, milline aku on eramule sobivam hetke olukorras, kas liitium-ioonaku või pliihappeaku.

Lähteparameetriteks arvestatakse 3% inflatsiooniga, mis mõjutab võrgutasude hindasid. Elektri hind püsib samasugune terve 10 aasta jooksul. Projekt rahastatakse täielikult omafinantseeringuga, kuid vaadeldakse, millised võiksid olla toetused akulahenduse soetamisel, et aku soetamine oleks elanikule kokkuvõttes null investeering juhul kui see on ilma toetusteta negatiivne. Pliihappeaku elueaks on tootja poolt hinnatud 2000 tsüklit, kui akut kasutada maksimaalselt 30% ulatuses ning liitium-ioonaku elueaks on hinnatud 6000 tsüklit, kui akut kasutatakse 90% ulatuses iga tsükkel ära. Kuna elektri hinnad määratakse ette, siis on need teada eelneva päeva kella 13:00-ks Eesti ajajärgi ning selle järgi saab vaadelda, millal on mõistlik akut laadida ning millal on mõistlik akust võrku müüa [1]. Samuti teeb energyPRO ise enda kalkulatsioonide järgi arvutused, millal on mõistlik kasutada akut ja millal on mõistlik osta võrgust.

Võrgutasu on vaja maksta jaotusvõrgule, et nad hooldaksid ning uuendaksid elektrivõrku pidevalt. Tänu võrgutasule peaksid vähenema katkestused igal aastal. Nii nagu eelnevas peatükis mainitud, on antud projektis valitud võrguteenus pakett „Võrk 2“. Võrguteenuse paketid erinevad teineteisest hinna ja peakaitsme suuruse poolest. Pakett „Võrk 2“ sobib antud eramule, kuna eramu peakaitsmeks on 16 A ja antud pakett pakub kõige soodsamat võrgutasu. [25] Tarbitud elektrienergia eest tuleb maksta ka veel elektriaktsiisi, antud makse suurus on määratud maksu- ja tolliameti poolt. [26]

Kui akulahendust majapidamine ei kasutaks oleks eramul ainult elektritarbimisest tulenev kohustus elektri eest maksta vastavalt börsihinnale. Majapidamise aastane elektritarbimisele kuluv summa on 956 €, mis jaotub järgnevalt: elektrienergia ostule 537 €, võrgutasudele 320 €, taastuvenergia tasule 61 €, elektriaktsiisile 5 € ja peakaitsme tasu 33 €. 10 aasta kogukulu on ilma akuta lahenduseta 10019 €. Summad on energyPRO tarkvara poolt ümardatud täisarvudeni. See summa võetakse aluseks, et analüüsida kahe erineva akutüübi tasuvust ja mõju aastasele elektri hinnale. Kas akust

tarbimine on kasumlik või mitte. Samuti pööratakse tähelepanu sellele, kui palju vähenevad iga aastased elektrienergia arved.

3.1 Pliiaku tasuvus

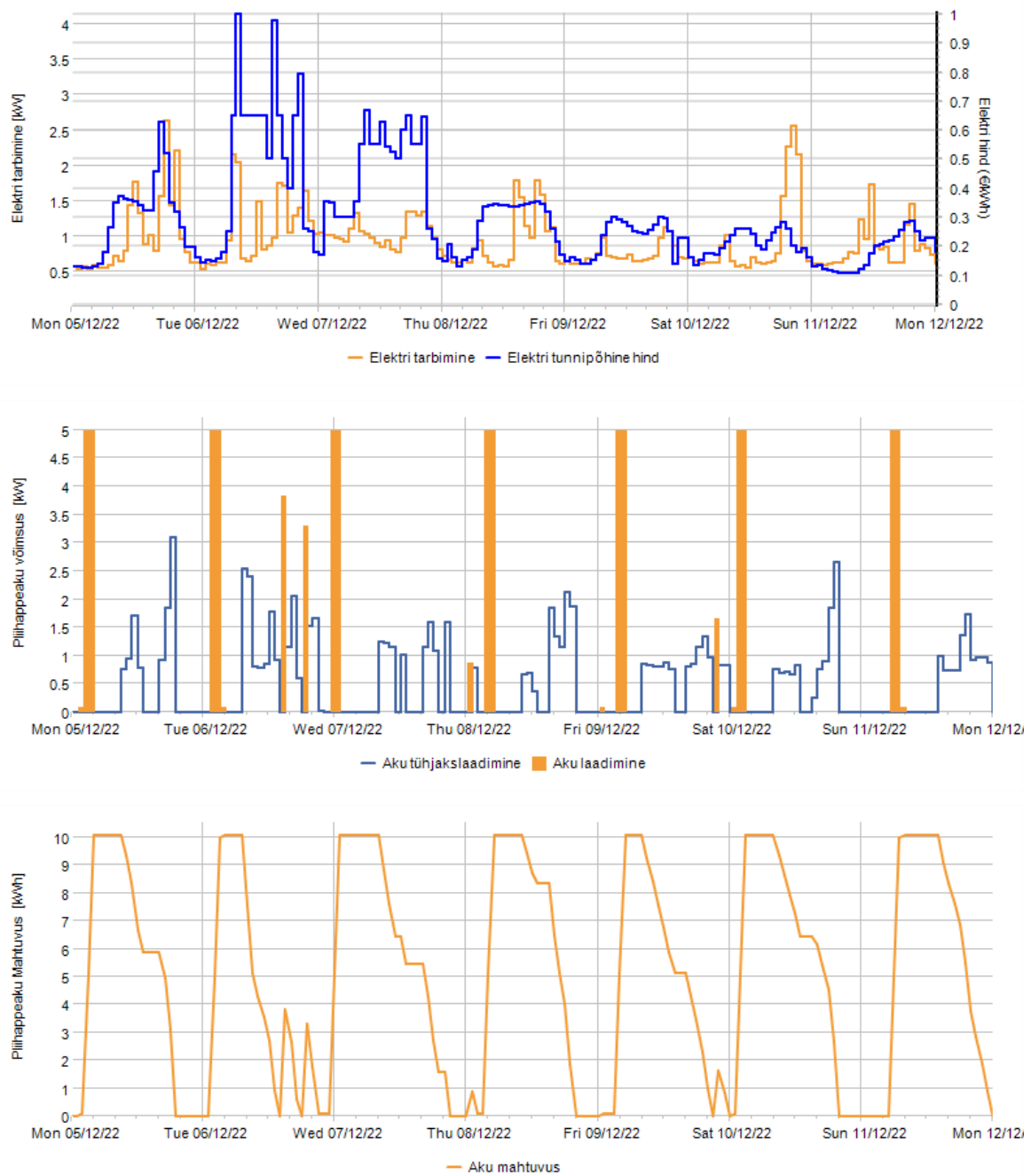
Pliiaku tasuvusanalüüsi mudeli lähteandmeteks on vastavalt GreenAkku GEL Batterie aku andmetelehele valitud andmed. [18] Lisaks on valitud geelaku kogu efektiivsus, mis on 85% ning tühjenemissügavus on 30%, sest suurema tühjenemise korral on eluiga tunduvalt väiksem. Aku eluiga on 30% tühjenemismäära korral 2500 tsüklit. 10 aastase perspektiiviga on akul võimalus teha igal aastal kuni 250 tsüklit, et analüüsitava aja jooksul ei peaks uut akut ostma. Majanduslikud andmed geelaku korral on aku enda investeering, mis on 8877 €.

Tabel 3.1. Pliiaku tasuvusanalüüs

Alginvesteering	8877 €
2022. aasta elektriarve	757 €
Kogu kulud peale 10 aastat	16848 €
Pliihappeaku kasumlikkus võrreldes ilma akuta lahendusega	-6829 €

Tabel 3.1 selgub, et pliiaku lahendus on võrreldes ilma akuta olukorraga 6829 € võrra kahjumlikum. Kuid võttes arvesse ka aja tundidest, millal majas elektrit ei ole, saame, et pliihappeaku on peale 10. aastat kahjumlik investeering 6634 € võrra, võrreldes olukorraga, millal eramus energiasalvestus lahendust ei ole.

Joonis 3.1 on näha, kuidas käitub pliiaku vastavalt elektri hinnale. Kui hind läheneb päeva tipule, siis tarbitakse kõik saadavalolev energia akust. Samal ajal, kui on tegu vastupidise olukorraga ehk hind on päeva madalaim siis laetakse akut täiel võimsusel. Samuti on näha, et akut ei laeta alati täiel võimsusel vaid täpselt nii palju, kui vaja on, et oleks kõige soodsam akut kasutada. Lisaks tuleb jooniselt välja, et akul pole piisavalt mahtuvust, et saaks terve kõrge hinna ajal energiat akust tarbida.



Joonis 3.1. Pliiaku käitumine vastavalt elektri hinnale

EnergyPRO mudeli järgi toimub esimesel aastal 97 täistsükli ning 10 aasta peale teeb aku 960 täistsükli. See tähendab, et aku ei kasuta ära enda täieliku potentsiaali, sest 30% tühjenemissügavusega on aku võimeline tegema kuni 2500 täistsükli. Peale 10 aastat on pliihappeaku lahendus toonud eramule kogukulu summas 16848 €. See tähendab, et 10. aasta keskmine kulu aastas pliiaku lahendusega on 1684,8 €.

2022. aastal oli ühe kWh keskmine hind pliiakuga lahenduse korral 0,140 €/kWh kohta. Kuna akuga lahendusel tarbiti võrgust 493,1 kWh rohkem siis see tähendab, et

keskmiste hindade juures maksti kadudele 69 €. 10 aasta perspektiivis tuleb kadude eest maksta majapidamisel 690 €. Mis on praktiliselt majapidamise ühe aasta kulu. Võrgutasudele kulus 2022 aastal 278 €, mis on 42 € võrra vähem kui ilma akuta lahendusega ning see tuleneb öisest võrgutasu hinnast.

Kokkuvõttes on pliihappeaku lahendus kallim, kuid aastatel, millal ei ole vaja akule investeerida on kulu 757 €, millest 374 € on kulu elektritarbimisele, võrgutasu koos taastuvenergia tasu ja aktsiisiga on 351 € ja peakaitsme tasu on samamoodi 33 €, kuna peakaitsme suurust ei muudeta. Kui ajastada elektritarbimist ja tarbida õigel hetkel akust, siis on võimalik säästa ligi 200 € lihtsalt selle pealt, et laetakse öösel aku täis ning kasutatakse seda energiat päeval, kui elektri hind on oluliselt kallim. Lisaks säästetakse 42 € võrgutasude pealt, kuna aku laadimine toimub öösel, kui võrgutasu on rohkem kui poolteist korda odavam. Samuti tuleb arvestada, et ilma akuta lahenduse korral on võrgus ka rikked, mis tekitavad inimesele kahju elektri äraoleku ajal aastas 19,5 €, mis teeb 10 aasta peale 195 €.

Kuna selgus, et aku potentsiaali ei kasutata täielikult ära siis vaadeldakse olukorda, kus tühjenemissügavus on 30% asemel 50% ning, kas ja kui palju see mõjutab tasuvust. Samuti vaadeldakse teise alternatiivina seda, kas majapidamisel on vaja niivõrd suurt akut, kui tegelikkuses on vaid ühel päeval nii suur tarbimine ning aasta keskmine tarbimine on rohkem kui kaks korda väiksem ehk 14,8 kWh. Vastused on esitatud allpool toodud koondtabelis (Tabel 3.2)

Tabel 3.2. Tundlikusanalüüs

Variant	33,66 kWh installeeritud mahtuvus ja 30% tühjenemis- sügavus	33,66 kWh installeeritud mahtuvus ja 50% tühjenemis- sügavus	14,8 kWh installeeritud mahtuvus ja 30% tühjenemissügavus
Alginvesteeringu suurus, €	8877	8877	4035
10 aasta kogukulu, €	16848	16296	12874
Võrreldes ilma akuta lahendusega, €	-6829	-6277	-2855

Teise variandi puhul, kus installeeritud võimsus on 33,66 ning tühjenemissügavus on 50% saame tasuvuse üle 500 € võrra paremaks. Iga aastane elektriarve on selle variandi puhul 704 € 2022 aastal, millest 333 moodustab elektritarbimise hind, võrgutasud koos aktsiisi ja taastuenergiatasuga on 337 € ning peakaitse eest tuleb tasuda jällegi 33€ aastas. Lisaks sellele muutub ka tsüklite arv, mis antud juhul on 125 täistsüklit 2022 aastal ning 1244 tsüklit 10 aasta vältel. Elektritarbimine kasvab, kuid kWh hind langeb 0,117 €/kWh kohta. Kaod akudes suurenevad 633,4 kWh-ni ning seetõttu tuleb ka kadude eest maksta 74,1 €.

Kolmanda variandida vaadeldakse akude investeeringu vähenemist vastavalt akude arvu vähenemisele. Analüüsitakse, kuidas ja kui palju mõjutab akude vähenemine tasuvust. Vähendatakse akude mahtu nii, et aku installeeritud mahtuvus oleks aasta keskmine päevane tarbimine ehk 14,8 kWh. See tähendab praeguselt kolmekümnekolmelt akult vähenemist viieteistkümne akuni, mis vähendab investeeringu suurust 4035 €-ni.

Kolmas variant on kolmest erinevast variandist kõige soodsam. Käesoleva variandi aastane elektriarvete kogumaksumus on 841 €, mis on ilma akuta variandist 115 € soodsam. Kolmanda variandi puhul tehakse 2022 aastal kokku 122 tsüklit ning kaod akus on 285 kWh, mille eest makstakse keskmiselt 0,148 €/kWh kohta – see on kolmest variandist suurim keskmine energia maksumus. Kokku tuleb kadude pealt maksta 42 €.

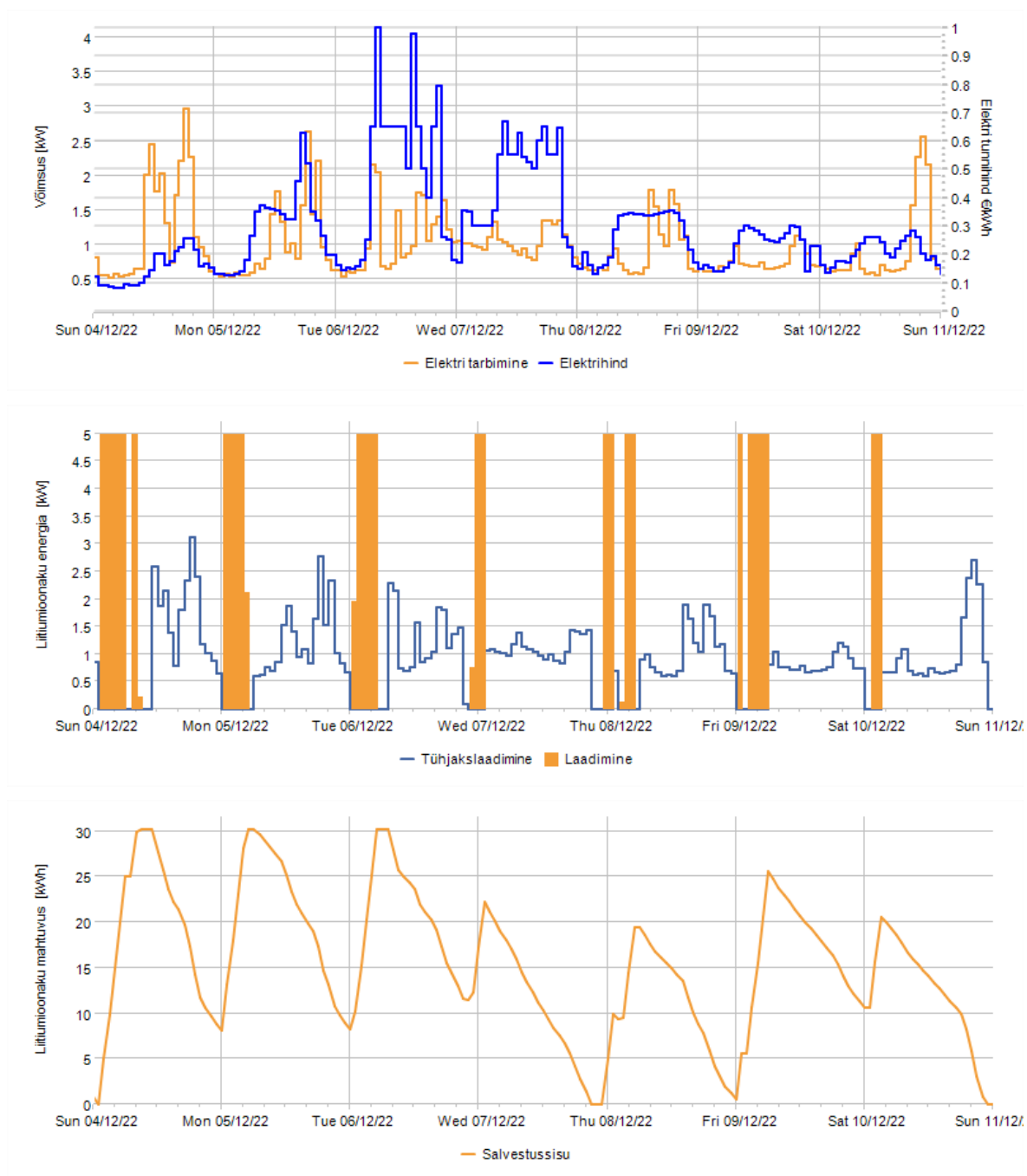
3.2 Liitium-ioonaku tasuvus

Liitium-ioonaku tasuvusanalüüsi tegemisel arvestatakse LG Chem Resu10 ja Resu 13 andmelehtedel oleva infoga [20]. Lisaks on optimaalne tühjenemissügavus 90%. Esimene investering akusse on 15618 € ning aku elueaks on hinnatud 6000 tsüklit või 10 aastat.

Tabel 3.3 Liitium-ioonaku tasuvusanalüüs

Alginvesteering	15618 €
2022. aasta elektriarve	614 €
Kogu kulud peale 20 aastat	22105 €
Liitium-ioonaku kasumlikkus võrreldes ilma akuta lahendusega	-12086 €

Peale 10. aastast perioodi on liitium-ioonaku lahenduse kogukulu 22105 €. Iga-aastane kulu on järelilikult 2210,5 €. $\frac{3}{4}$ kogukulust moodustab juba akule mõeldud investeering, mis on 15618 €. Liitium-ioonaku lahendus on küll kokkuvõttes kõige kallim, kuid aastad, millal uut akut ostma ei pea on elektritarbimisele minev kulu 614 €. Võrgutasud on veelgi rohkem odavamaks muutunud, esimesel aastal on võrgutasud 241 €.



Joonis 3.2. Liitium-ioonaku käitumine vastavalt elektrihinnale

2022. aasta keskmine energiahind on 0,109 €/kWh kohta. Kuna kaod akus on 239 kWh siis tuleb kadude eest maksta 26 €. Esimesel aastal teeb liitium-ioonaku 142 täistsükli,

kuid 10 aastase perspektiiviga teeb aku 1410 täistsükli. Sellest võib järeldada, et aku on alakasutuses, sest aku on võimeline tegema kuni 6000 täistsükli.

Joonis 3.2 on näha, et aku on pidevas alakasutuses, mis tähendab, et süsteemis on üledimensioneerimine. Seetõttu vaadeldakse alternatiive, kus vähendatakse aku mahtuvus ning seetõttu väheneb ka investeering akusse. Esimese alternatiivina kasutatakse aasta keskmist päevast tarbimist, et hinnata, kas ja kui palju aku tasuvus muutub. Selleks valitakse LG Chem RESU13 ja LG Chem RESU3.3, mille kogu installeeritud võimsus ulatub 16,3 kWh-ni ning alginvesteering 7939 €-ni. Ülejäänud tehnilised parameetrid on LG seerial samasugused välja arvatud mahtuvus.

Tabel 3.4. Liitium-ioonaku tundlikusanalüüs

Variant	LG Chem RESU13 ja RESU3.3	LG Chem RESU13	LG Chem Resu10
Alginvesteeringu suurus, €	7939	5590	4438
10 aasta kogukulu, €	14859	12776	12037
Võrreldes ilma akuta lahendusega, €	-4840	-2757	-2018

Tabel 3.4 on toodud erinevad alternatiivid, kuidas on võimalik maksimeerida kasumlikkust. Esimese alternatiivi puhul, kus kasutatakse LG Chem RESU13 ja RESU3.3 akusid on tasuvus parem, kui esialgsel variandil. Esimesel aastal teeb aku 264 täistsükli ning kaod akus on 215 kWh. Keskmise energiahind antud aastal on 0,117 €/kWh kohta. Kulu kadude katteks on 2022. aastal 25 €. Samuti tekib ka selle alternatiiv korral aku mitte täielik ära kasutamine. 10. aasta jooksul teeb aku kokku 2616 tsükli, mis on parem võrreldes algse lahendusega, kuid siiski jääb veel tegemata üle 3000 tsükli.

Teiseks alternatiiviks vaadeldakse ühe LG Chem RESU13 kasutamist majapidamises. Antud lahenduse installeeritud võimsus on 13,1 kWh ja alginvesteeringu suurus 5590 €. Alternatiivi vaadeldava perioodi kogukulu on 12776 €, mis on ikkagi veel 2757 € kallim, kui ilma akuta tekkiv kogukulu. Antud alternatiivi iga-aastased jooksev kulud on 683 €. Aku teeb esimesel analüüsi aastal 301 täistsükli, ning kaod akus on 197,4 kWh. Keskmiseks energiahinnaks on 2022 aastal 0,122 €/kWh ning kadude tarbeks tuleb maksta 24 €. Vaadeldava perioodi jooksul teeb aku kokku 2978 täistsükli, mis on suurim aku kasutatavus, kuigi akus jääb veel kasutamata ligi 3000 tsükli.

Viimase alternatiivina kasutatakse LG Chem RESU10 akut üksikult, mis tähendab, et installeeritud mahtuvus on 9,8 kWh ning alginvesteering akusse on 4438 €. Selle alternatiivi 10 aasta kogukulu on 12037 €, mis on veelgi odavam võrreldes eelnevate variantidega. 2022. aasta jooksevkulud on 722 €, millest võrgutasu moodustab 265 €. Esimesel aastal teeb aku 353 tsüklit ning kaod akus on 172,8 kWh. Keskmine energiahind antud aastal on 0,130 €/kWh kohta. Kadude eest tuleb maksta 22,5 €. Selle alternatiivi korral kasutatakse akut veelgi enam, kui varasemate alternatiivide korral. Analüüsitava perioodi vältel teeb aku kokku 3479 täistsüklit, kuid siiski jääb kasutamata ligi 2500 tsüklit.

Allpool toodud Võrreldakse, milline aku on tasuvam, ning analüüsitakse reaalselt tsükli maksumust. on toodud majanduslikult kõige tasuvam lahendus nii pliiaku kui liitium-ioonaku kohta. Võrreldakse, milline aku on tasuvam, ning analüüsitakse reaalselt tsükli maksumust.

Tabel 3.5. Plii- ja liitium-ioonakut võrdlev tabel

Variant	Pliiaku, installeeritud mahtuvus 15,3 kWh	Liitium-ioonaku, installeeritud mahtuvus 9,8 kWh
Investeering akule, €	4035	4438
Tsüklite arv 10 aasta jooksul	1193	3479
Reaalne tsükli hind €/kWh	0,72	0,145

Võrreldakse, milline aku on tasuvam, ning analüüsitakse reaalselt tsükli maksumust. tuleb välja, et pliiaku kasutatavate tsüklite hind on 10 aastase perioodi peale 0,72 €/kWh kohta. See tähendab, et pliiakust on majanduslikult kasumlik tarbida siis, kui päevase kõrgeima ja madalaima hinna vahe on rohkem kui 0,72 €/kWh kohta. 2021 aasta hindade järgi on selliseid päevasid väga vähe, sest tunde, kus hind ületas 0,72 €/kWh kohta oli 3 tundi ning kõik need tunnid olid 07.12.2021.

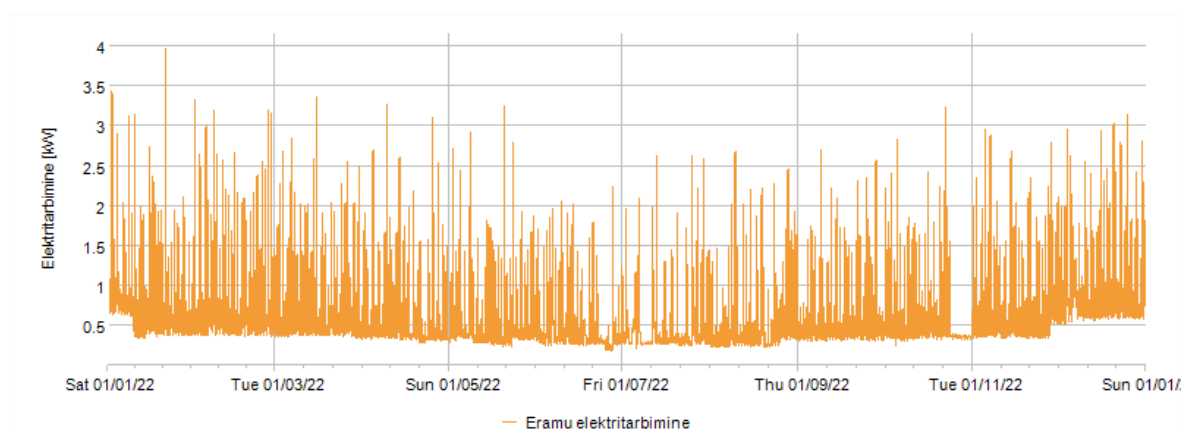
Tabel 3.5 selgub, et liitium-ioonaku puhul on akust võetav energia selljuhul tasuv, kui päevane elektrihinna muut ületab 0,145 €/kWh ehk 145 €/MWh kohta. 2021 aasta hindade põhjal juhtus seda mitmel korral ning akust võetav energia oli rohkem kui 10 korda odavam, kui börsihinnaga ostetud elektrienergia maksumus.

Tasuvust on võimalik parandada, kui kõik salvestatav energia tuleks alternatiivsest allikast, mitte elektrivõrgust. Nimelt, kui päikesepaneelid või elektrituulik täidaks aku, siis saaks veelgi enam säästa elektrienergia ostu pealt ning võrgutasude ja aktsiisi pealt, kuid see eeldaks täiendavat investeeringut ning seda antud uurimistöös ei vaadelda.

Liitium-ioonaku on väga suures arengus ja ennustatakse suurt hinnalangust, siis ühel hetkel võib muutuda liitium-ioonaku lahendus kasumlikuks ka kodutarbijatele. Seda sellisel juhul, kui elektri hinnad jäävad 2021. aastaga võrreldes samasse suurusjärku ja on sarnaselt kõikuvad. Antud hindade juures ei ole pliihappeakud ega liitium-ioonakud tasuvad ning sellist investeeringut ei ole mõistlik kodutarbijal teha. Akusse minev investeering muutub soodsaks siis, kui aku hind langeb või kalendriline eluiga pikeneb.

4.SALVESTITE KASUTAMISE MÕJU KOORMUSGRAAFIKULE

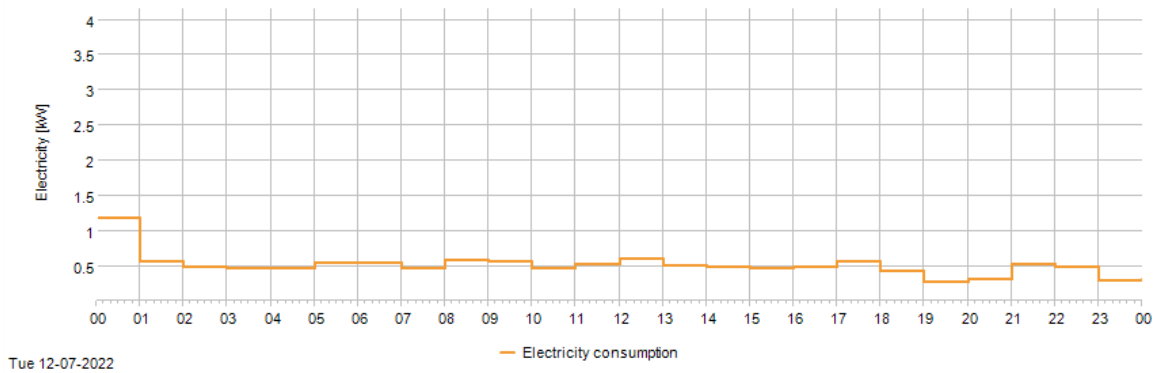
Vaadeldava peatüki fookuses on, kuidas mõjutavad erinevad akud elektrivõrgu koormusgraafikut. Kasutatakse pliihappe- ja liitium-ioonakut ning vaadeldakse, mis tulemused kummagi aku puhul tulevad. Kasutatakse eelmises peatükis majanduslikult kõige vähem kahjumlike variante, ehk pliiaku puhul on installeeritud võimsus 15,3 kWh ning liitium-ioonaku puhul 9,8 kWh. Analüüsi lihtsustamiseks võetakse ühe ööpäeva koormusgraafik nii suvel kui ka talvel, sest talviti on koormused suuremad ja suvel väiksemad. Joonis 4.1 on toodud 2021. aasta koormusgraafik.



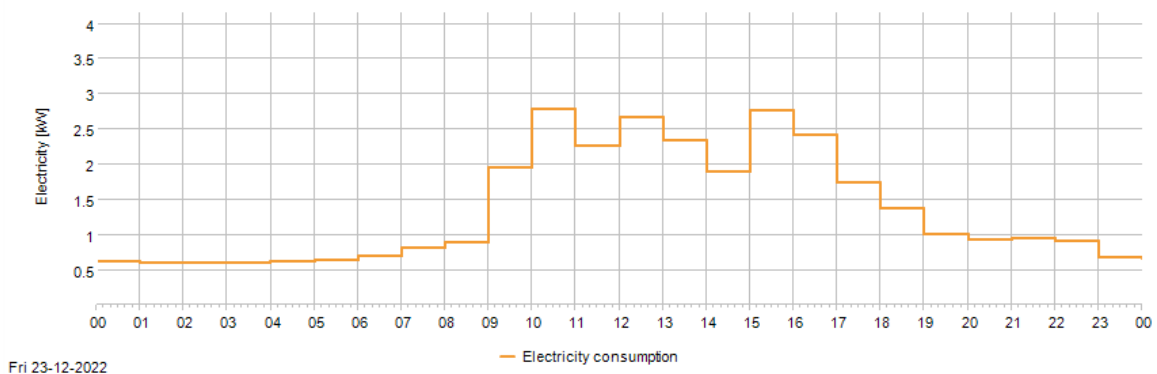
Joonis 4.1. Eramu 2021 aasta elektritarbimise koormusgraafik

Majapidamise koormusgraafikud on võetud suvel 12.07, millal päevane tarbimine on keskmisest madalam ja talvel jõululaupäev eelnev päev 23.12, millal on koormus kõige suurem. Antud kuupäevad on valitud selliselt, et talvel vaadelda, kui palju ja kas üldse mõjutab aku lisamine koormuse alandamist võrgus ning suvine kuupäev on võetud, et vaadelda keskmisest väiksema tarbimise korral võrgu koormust.

Antud hetkel katab kogu tarbimise elektrivõrk. Aastas on tarbimine kokku 5394.6 kWh ning suurim võimsus, mida ühes tunnis soovib majapidamine saada on 4 kW. Allpool on toodud ilma akulahenduseeta koormusgraafik võrgule, mille järgi võrreldakse salvestite vajalikkust.



Joonis 4.2 12.07.2022 ööpäevane koormusgraafik

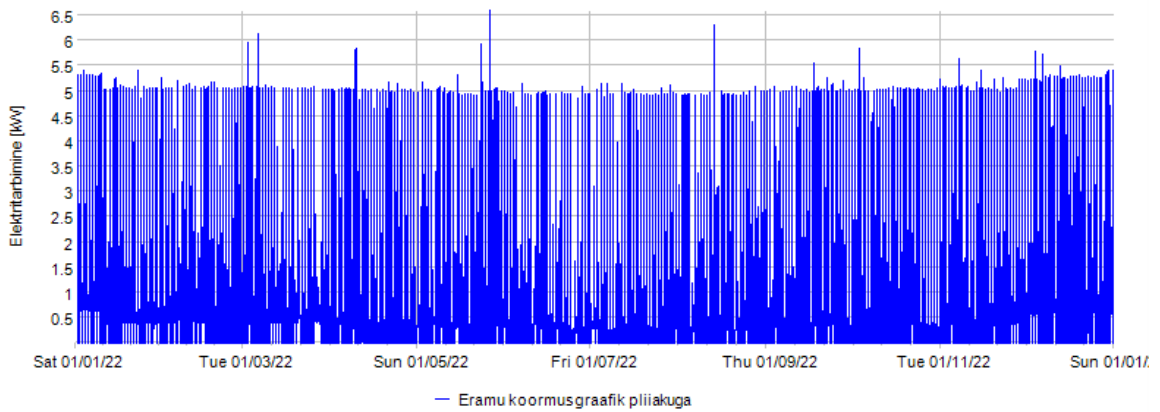


Joonis 4.3 23.12.2022 ööpäevane koormusgraafik

Joonis 4.2 ja Joonis 4.3 selgub, et talvine ja suvine koormusgraafik on väga erinevad. Jõululaupäeval eelneval päeval, kui elanikud on kodus ja valmistuvad ette jõululaupäevaks toite, siis on tarbimine terve päev väga suur. Samas, kui vaadelda suvist graafikut, on näha, et tavalisel tööpäeval suvel on vaid maja baaskoormus vaja ära katta ning elektrivõrgul sellega probleeme ei tohiks tekkida. Samuti toetab seda suvel suur päikesepaneelide toodang ning tuulistel päevadel ka elektrituulikute toodang.

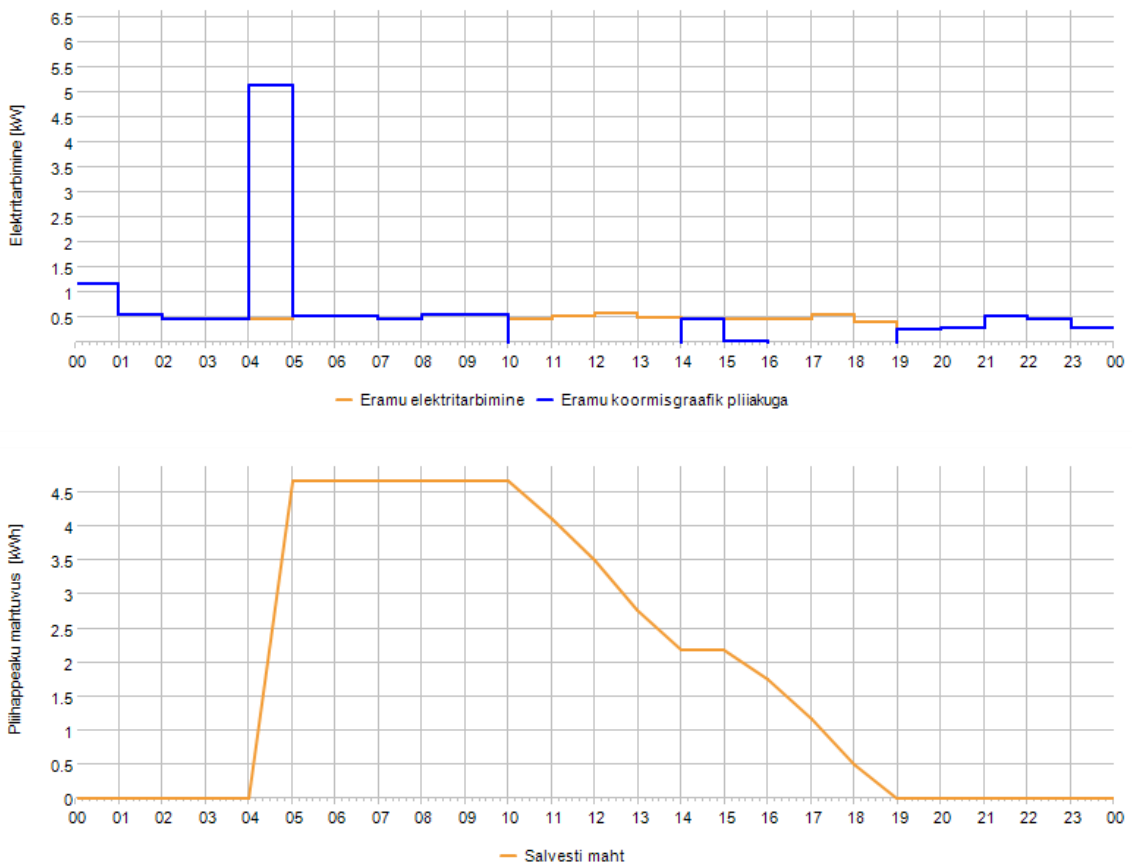
4.1 Pliihappeaku mõju koormusgraafikule

Pliiakku mõju koormusgraafikul vaadeldakse järgnevate andmete põhjal. Pliihappeaku installeeritud mahutavus majapidamises on 33,7 kWh, kuid sellest realselt kasutatav mahutavus on 30% installeeritud mahtuvusest ehk 10,1kWh. Elektrivõrgu koormusgraafik pliiakuga on toodud allpool oleval Joonis 4.4.



Joonis 4.4. Elektrivõrgu aastane koormusgraafik pliiakuga

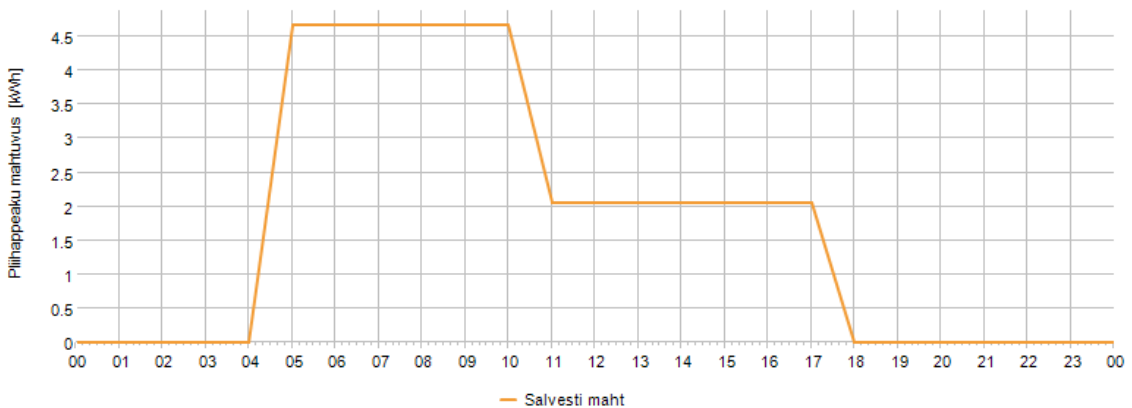
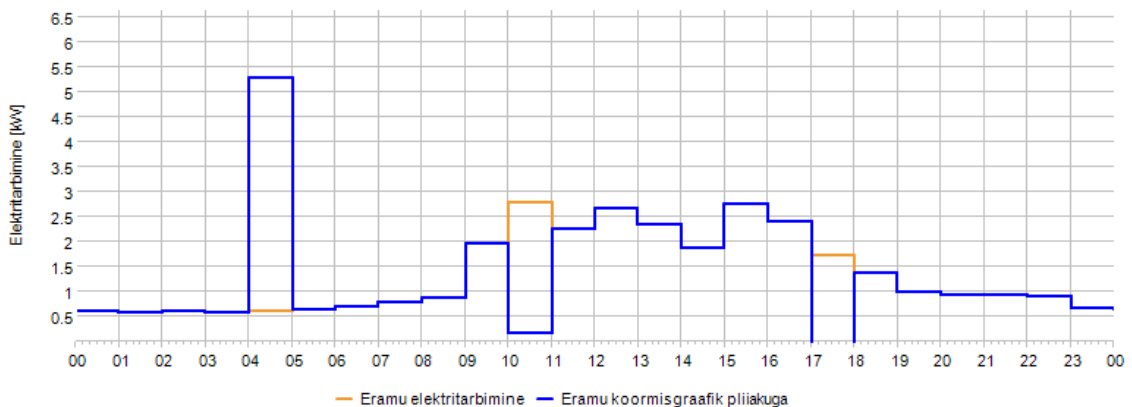
Joonis 4.4 selgub, et võrreldes ilma akuta lahendusega on maksimaalne koormustipp 4 kWh, ja seda ühel päeval aastas. Pliiakuga on koormusgraafikul palju rohkem tippe, ning suurim tarbimine ulatub 6,5 kWh-ni. Samuti on tarbimine nüüd konstantsem ja on näha, et pidevalt on vaja tarbimist üle 5 kWh. Seda sellepärast, et aku laadimisvõimsus on maksimaalselt 5 kW. Järgnevalt on toodud välja kahe erineva päeva koormusgraafikud.



Joonis 4.5 12.07.2022 pliiku ööpäevane koormusgraafik ja mahtuvus

Joonis 4.5 selgub, et aku laetakse täis öösel kella neljast kuni viieni hommikul, mis tähistab ka koormusgraafikul koormustippu. Samuti selgub jooniselt, et akut kasutatakse päeval kella 10-st kella kaheni päeval ning seejärel uuesti kella kolmest seitsmeni õhtul. Akut ei saa kasutada terve päev, kuna aku kasutatav maht on niivõrd väike, et see ei suuda ära toita terve päeva tarbimist.

Kuna suvel on tarbimine väiksem siis vaadeldakse, kuidas erineb seis suuremal koormusel, sellepärast analüüsitakse ka majapidamise suurimat koormust, mis on talvel. Aku vajalikkus tekib talveperioodil, kui tarbimine on kõrge ning päikesepaneelid ei tooda võrku, sest päikeselist aega on väga vähe.



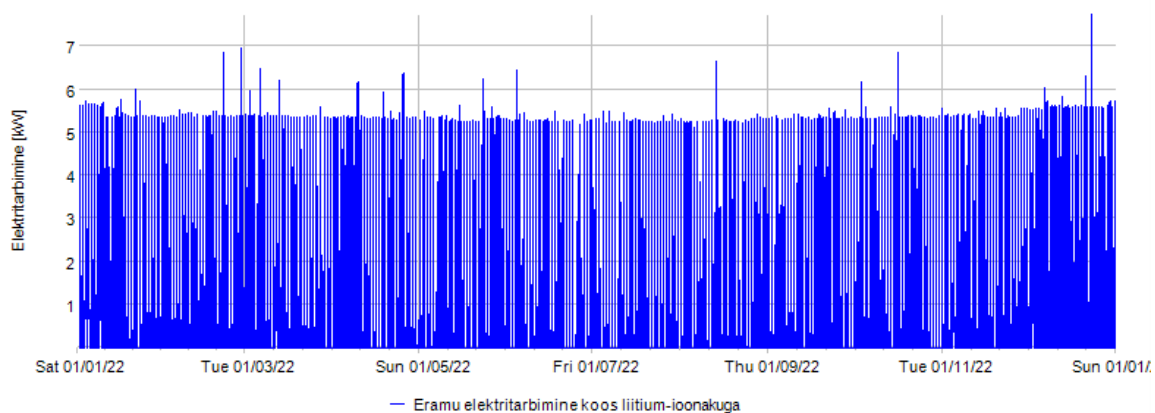
Joonis 4.6. 23.12.2022 pliiaku ööpäevane koormusgraafik ja mahtuvus

Joonis 4.6 selgub, et aku maht jääb liiga väikeseks, et see suudaks ära katta majapidamise suure tarbimise. Akust tarbitakse energiat vaid 2 tundi ööpäeva jooksul, need tunnid on kõige kallimad tunnid. Akut laetakse öösel kella neljast viieni ning tarbitakse päeval üks tund kella kümnest üheteistkümneni ning viiest kuueni. Kuna aku mahtuvus jääb nii väikeseks siis elektrivõrgust koormust see ära ei võta vaid pigem tekitab juurde. Selline koormusgraafik on suuresti tingitud ka energyPRO mudeli

hinnapõhisest juhtimisest. EnergyPRO mudel kalkuleerib ise, millal on mõistlik akut laadida ning millal kasutada akus olevat energiat tarbimiseks.

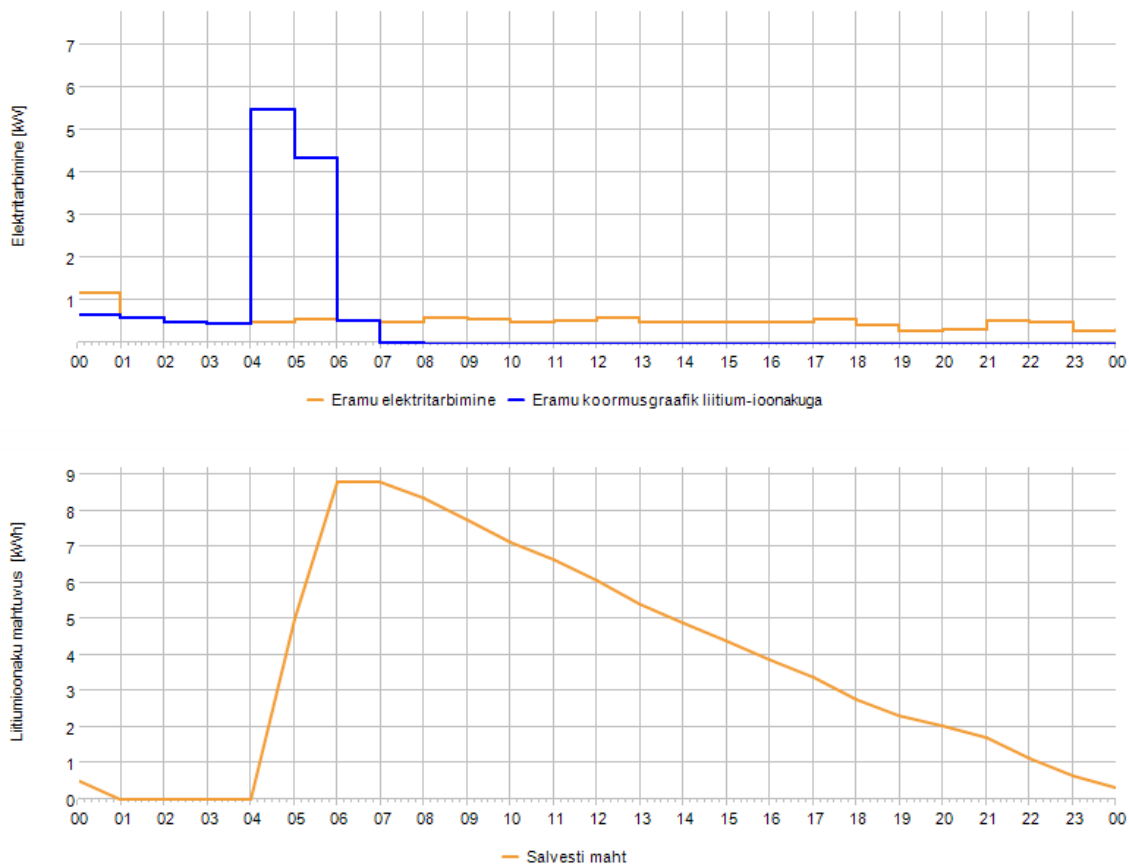
4.2 Liitium-ioonaku mõju koormusgraafikule

Pliihappeaku analüüsimisel selgus, et aku maht oli koormuse katmiseks liiga väike. Seda tulenevalt suuresti sellest, et aku tühjenemissügavus on 30%. Liitium-ioonaku puhul on installeeritud mahutavus 9,8 kWh ning sellest kasutatakse ära iga tsükliga 90% ehk 8,8 kWh elektrienergiat on võimalik tarbida ühe tsükli jooksul liitium-ioonakust. 2022 aasta koormusgraafik liitium-ioonakuga on toodud allpool oleval Joonis 4.7.



Joonis 4.7. Elektrivõrgu aastane koormusgraafik liitium-ioonakuga

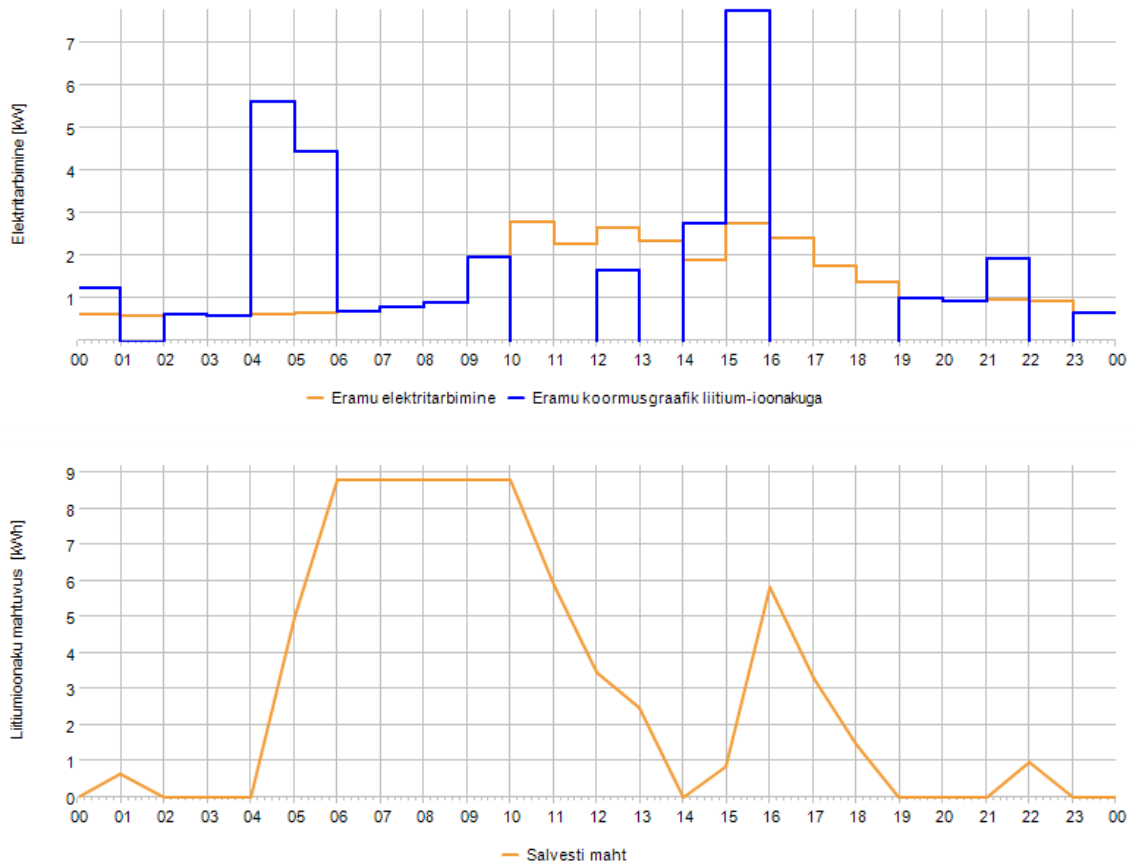
Joonis 4.7 on näha, et liitium-ioonaku puhul on koormustipud veelgi suuremad, kuna kasutatav energia hulk on kaks korda suurem, kui pliiaaku puhul. Koormustipud ületavad juba 7 kW, mis tuleneb suuresti aku 5 kW laadimisvõimsusest. Allpool on toodud koormusgraafikud kahe erineva päeva kohta.



Joonis 4.8 12.07.2022 ööpäevane koormusgraafik ja aku mahtuvus liitium-ioonakuga

Joonis 4.8 selgub, et liitium-ioonaku koormusgraafik on 12 juulil etteaimatav, kuna aku maht on piisavalt suur, et toita ära terve päevane tarbimine. Erinevalt pliihappeakust on näha, et liitium-ioonaku on võimeline katma terve päevase energia vajaduse alates kella seitsmest hommikul. Akut laetakse vaid korra, kella neljast öösel kuni hommikul kella kuueni.

Akude mahtuvuse erinevus ei tule suvekoormuse juures välja ning selleks vaadeldakse suurima koormusega päeva, nii nagu eelnevate olukordadega.

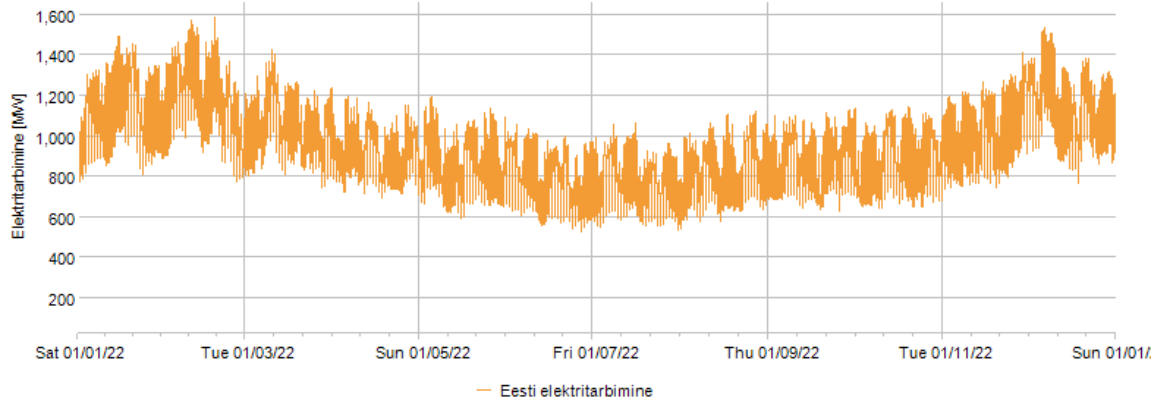


Joonis 4.9 23.12.2022 ööpäevane koormusgraafik ja mahtuvus liitium-ioonakuga

Joonis 4.9 selgub, et aku suudab peale täislaadimist toita ära osaliselt jõululaupäevale eelneva päeva tarbimise vajaduse. Koormusgraafikult on nähe, et akut laetakse lausa kolmel korral ööpäeva jooksul. Öösel ja varahommikul on tarbimine küll väga suur, kuid alates kella kaheksast hommikul ei tarbita elektrivõrgust midagi. Ööpäevane koormustipp on kella kolmest kella neljani päeval, kus laetakse tühjaks saanud akut, et järgneval kolmel tunnil uuesti akust energiat tarbida.

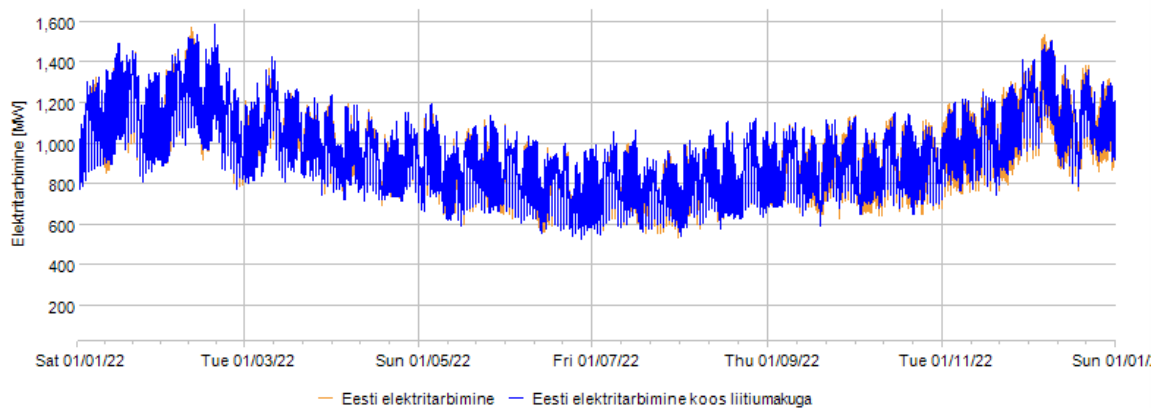
Võrreldes pliihappeakuga on näha, et liitium-ioonaku on võrgu vaatest kasulikum, sest päeval, kui tarbimine on suur ka teistes hoonetes siis akuga varustatud eramud seda koormust ei suurenda vaid pigem vähendavad. Kuid vastupidi hakkab akuga varustatud majades kerkima öine tarbimine ning päevane laadimine, mis aitab ühtlustada elektrivõrgu baaskoormust.

Järgnevalt vaadeldakse, mis juhtub elektrivõrgu koormusgraafikuga, kui liitium-ioonaku lahendus lisada 100000 majapidamisele ehk võrku tuleb juurde 980000 kWh salvestus mahtuvust, maksimaalse võimsusega kuni 500000 kW. Liitium-ioonaku lahendust kasutatakse sellepärast, et see on palju tõhusam, kui pliiaku lahendus.



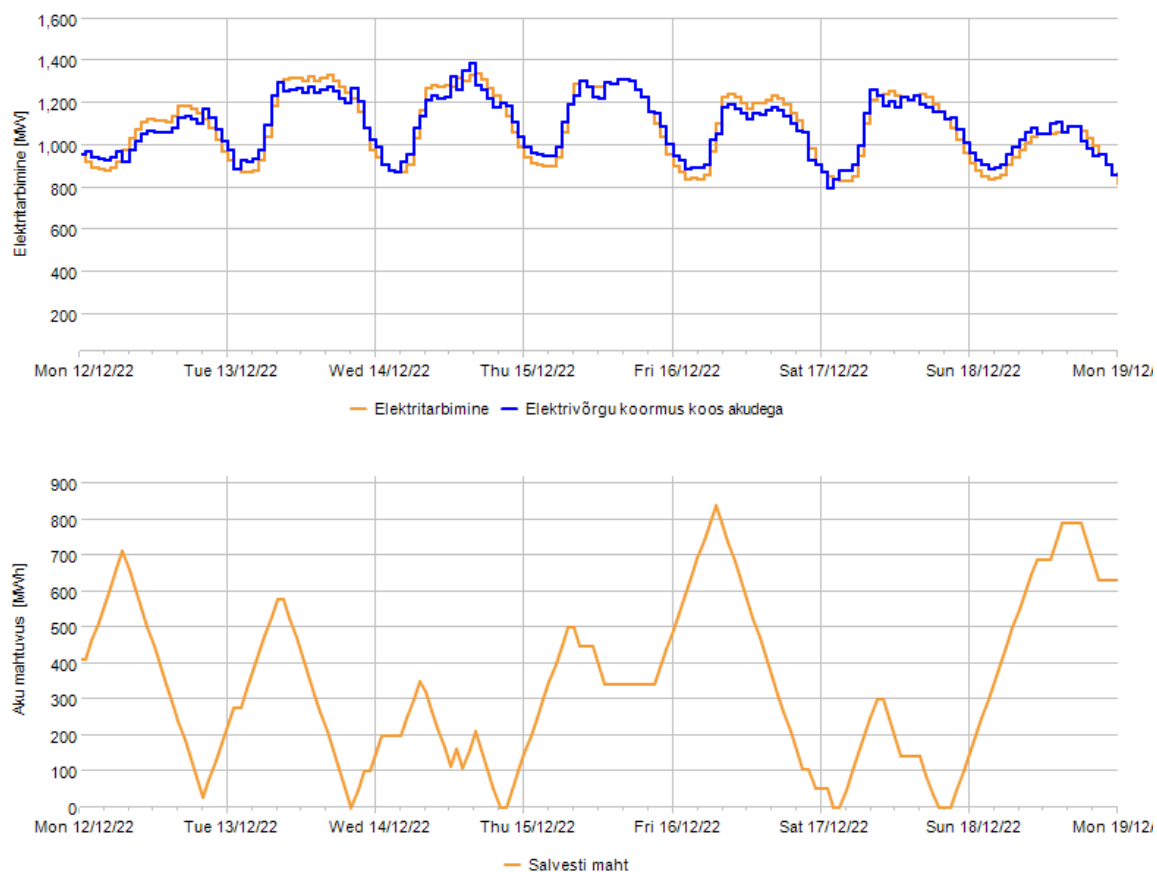
Joonis 4.10. Eesti 2021. aasta tarbimisgraafik [28]

Joonis 4.10 on toodud 2021. aasta tarbimisgraafik vastavalt Elektringi andmetele. [28] Joonisel on näha, kuidas jaguneb aastane elektritarbimine Eestis praegu. Suvel on tarbimine väiksem, ning talve perioodil ulatub tarbimine kuni 1600 MWh-ni.



Joonis 4.11. Eesti 2021. aasta tarbimisgraafik koos 100000 liitiumakuga

Lisades Eesti tarbimisele 100000 liitium-ioonakut, LG Chem RESU10. Joonis 4.11 on näha, et koormusgraafik ei muuta väga suures osas, kuid kohati võtavad akud koormus ära elektrivõrgult. Samuti kerkivad tiputarbimised nii nagu eramaja koormusgraafiku puhul. Tarbimine kasvab 67656 MWh võrra. Liitiumakude koguinvesteering on 443,8 M€.



Joonis 4.12 7 päevane koormusgraafik koos 980000 kWh akulahendusega ja salvesti mahtuvus

Joonis 4.12 on välja toodud lühema perioodi kohta näide, kui töös vaadeldud liitium-ionaku lahendus oleks 100000 majapidamises ehk kogu installeeritud akude mahtuvus oleks 980000 kWh. Sellise lahenduse korral on näha, et akust kasutatakse palju energiat ära, sest aku on pidevalt tühi aga ei jõuta uuesti täis laadida, tulenevalt kõrgetest elektrihindadest.

5. JÄRELDUSED

Järelduste peatükis analüüsitakse, kas ja millised akud on mõistlikud. Samuti analüüsitakse, millised meetmed peaksid tekkima, et aku oleks tasuv ja soodne nii kodutarbijale kui ka elektrivõrgu haldajale.

Võrreldes kõige vähem kahjumlike lahendusi pliihappeaku ja liitium-ioonaku alternatiivi tulevad erinevused nii majandusliku kui ka elektrotehnilise poole pealt. Allpool toodud tabel võrdleb olukorda, kus akut ei ole ning olukorda, kus aku on olemas.

Tabel 5.1. Alternatiivide omavaheline võrdlus

	Akuta lahendus	Pliiakuga lahendus	Liitium-ioonakuga lahendus
Aastane elektritarbimine, kWh	5394,6	5679,6	5567,4
Aastane elektrienergia maksumus, €	956	841	722
10 aasta kogukulu, €	10019	12874	12037
Kaad akus, kWh	0	285	173

Tabel 5.1 selgub, et kõige rohkem tarbitakse elektrivõrgust pliiaku korral. Pliihappeakuga lahendusel on aastane elektritarbimine 285 kWh suurem kui akuta lahenduse korral. Liitium-ioonaku korral on tarbimine 172,8 kWh suurem, mis on rohkem kui poolteist korda vähem võrreldes pliiakuga. Peamine elektritarbimise suurenemine tuleb siis, kui majal on vaja ära katta baaskoormus ning aku peab laadima, sest siis ei saa akust midagi tarbida.

Lisaks tuleb Tabel 5.1 välja, et liitium-ioonaku puhul on majapidamise aastane elektrienergia sääst suurim. Liitium-ioonaku puhul säästab eramu 234 € esimesel aastal tänu targale aku kasutamisele. Suurim sääst tuleb tänu ette vaatavale börsihinnale. Tänu sellele saab aku ajastada, millal anda kasutada energiat majapidamise tarbeks

ning millal laadida ise. Üldiselt jäävad aku laadimised öö aega, sest siis on võrgutasud soodsad ning börsihind on samuti odav, sest baastootmine säilitatakse ning see viib börsihinnad alla. Pliihappeakuga on seis sarnane liitium-ioonakule. Pliihappeakuga ei ole sääst nii suur, kuna tihti tuleb ette olukordasid, kus akut peab päeval laadima, sest aku maht on väike.

10 aasta kogukulu on vastavalt Tabel 5.1 suurim liitium-ioonaku puhul. Liitium-ioonaku puhul on väga suureks teguriks alginvesteeringu suurus, mis antud ülesandes on 4438 €. Suure investeeringu tõttu akudesse ei ole võimalik liitium-ioonakudel olla kasumlik. Liitium-ioonakud muutuvad kasumlikuks, kui nende kalendriline eluiga pikeneb, sest 10 aasta jooksul suudab liitium-ioon aku teha 3479 tsüklit, kuid aku on võimeline tegema 6000 tsüklit, mis jätab akule varuks veel üle 2500 tsükli. Samuti muutuks akusse investeerimine tasuvaks, kui rakenduks toetused aku soetamisel. Hetkeolukorras oleks vaja, et toetuse suurus oleks minimaalselt 2018 €. Hetkel ei ole kummagi aku soetamine mõistlik enda vahendite eest, sest majanduslikult nad kasumlikud ei ole.

EnergyPRO analüüsi käigus tuli ka välja, et liitium-ioonaku ja pliihappeaku efektiivsus tegur mõjutab aastaseid kadusid väga palju. Pliihappeaku, mille efektiivsus on tootja poolt määratud 85%, kaod on 285 kWh aastas, mis tähendab et 10 aasta jooksul on kogukaod akudes 2850 kWh. See kadu läheneb eramu poole aasta tarbimisele. Liitium-ioonaku, mille efektiivsus on 95%, kaod rohkem kui poolteistkorda väiksemad võrreldes pliihappeakuga. Liitium-ioonaku aastane kadu on energyPRO andmete järgi 185 kWh, 10 aasta jooksul teeb see 1850 kWh.

Käesoleva töö analüüsist selgus, et akude mõju eramu koormustippudele on väga suur. Nimelt aitavad akud katta suurimaid koormustippe. Kuid öösiti, siis kui akud laevad lähevad koormustipud veelgi suuremaks. Olenevalt aku tüübist ja tema võimsusest muutub koormusgraafik. Päeval ajal suudab liitium-ioonaku katta täielikult vajamineva energia, kuid pliihappeaku suudab seda teha vaid seni, kuni akus on piisavalt energiat järel.

Samuti selgus tööst, et 100000 aku lisamine Eesti energiasüsteemi ei mõjuta väga palju terve võrgu koormustippe. Suurimate tarbimiste ajal aitavad akud vähendada koormustippe, kuid sedagi minimaalselt. 100000 aku lisamine jaotusvõrku tähendab viiendiku jaotusvõrgu kliendi varustamist akuga. Samuti annaks parema tulemuse igale eramule individuaalselt aku vaatamine, mis tähendab, et iga eramu kohta tehakse eraldi analüüs.

KOKKUVÕTE

Maailma olukorda on selline, et aina enam keskendutakse süsinikneutraalse keskkonna loomisele, ning suur osa sellest eesmärgist on just energiatarbimise ja tootmise taga. Euroopa liidu eesmärk saavutada süsinikuneutraalne primaarenergia osakaal aastaks 2050 on pannud elektrisüsteemid raskesse olukorda. Päikesepaneelide ja elektrituulikute toodang on ettearvamatu ning sõltub suuresti ilmastikust, mistõttu on tuleb elektrienergia toodangu kontrollimiseks see salvestada ning selleks on kasutusel erinevad salvestid.

Lõputöö raames uuriti elektrisalvesti tasuvust ja mõju kodutarbijale. Kodutarbija vaates on tekib palju kitsendusi, alustades salvestusseadme suuruselt ning lõpetades selle maksumusest. Seetõttu valiti salvestusseadmeteks elektrokeemilised energiasalvestid, just nende kättesaadavuse, hinna ja suuruse tõttu. Samuti vaadeldi salvestusseadmete rakendusi ning see kitsendas valikut veelgi. Lõpuks jäid sõelale vaid pliihappeaku ja liitium-ioonaku.

Töö uuring viidi läbi kasutades modelleerimistarkvara energyPRO, mis on võimaldab hinnata nii majandusliku kui ka tehnilist mõju erinevate tehnoloogiate kasutamisel. Tarkvara kasutades anti ülevaade salvestusseadmete tasuvusest ning nende mõjudest kodutarbija koormusgraafikule ja -tippudele. Samuti võrreldi valitud akude plusse ja miinuseid.

Analüüsi osas modelleeriti eramaja tarbimine, elektriturg ja salvesti. Kõik kolm komponenti ühendati omavahel. Akulahendus valiti esialgu vastavalt suurimale tarbimisele nii, et akude installeeritud võimsus kataks ära 2021 aasta tarbimisandmete järgi suurima tarbimise, mis oli ligi 33 kWh. Tuli välja, et selline lähenemine ei ole optimaalne ning lõplikult osutus valituks alla keskmise elektritarbimise akuga lahendus. Lisaks lisati mudelisse ka 2021 aasta elektrituru tunnipõhised börsihinnad. Antud tarkvara on piisav, uurimaks salvestuslahenduste sobilikkust elektrivõrku, kuna akude kohta saab lisada kõik vajaminevad parameetrid alustades mahtuvusega ning lõpetades optimaalse tühjendamissügavusega.

Tasuvusanalüüsi koostati aku ühe eluea kohta ehk antud andmete põhjal 10 aasta kohta. Uuriti kahte erinevat alternatiivi võrreldes praeguse olukorraga, mis on ilma akuta lahendus ka kahte erinevate omadustega akuga lahendus. Töö analüüsi käigus selgus, et valitud salvestuslahendused ei ole hetkeolukorras tasuvad, kuna salvestite omamaksumus on veel liialt suur. Liitium-ioonaku lahendus tekitas olukorra, kus iga-aastane elektriarve muutus soodsamaks. Pliiaku korral nii suurt muutust ei olnud, kuna

pliiakul tekkis rohkem kadusid. Samuti võeti töös arvesse olukorrad, et elekter kaob ära ning seetõttu elukvaliteet kannatab. Selleks võeti kaks keskmist palka ning jagati aastas olemasolevate tundide vahel laiali. Lõpp tulemuseks saadi, et pliiaku on kahjumlik investeering 2855 € võrra ning liitium-ioonaku on 2018 € kahjumlikum võrreldes ilma akuta lahendusega. Järelikult ei ole kumbki akulahendus majanduslikult kasumlik suuresti akude lühikese eluea ja hinna tõttu.

Töös analüüsiti ka mõju koormusgraafikutele. Omavahel võrreldi praegust olukorda ning hüpoteetilist olukorda, kui majapidamises oleksid pliihappeaku või liitium-ioonaku. Ilma akulahendusega on koormusgraafik üldiselt päeval ja peale tööpäeva lõppu kõrgem ning öisel ajal madalam. Täiesti teistsugune olukord tekkis akude kasutamisega. Akud suutsid ära katta osaliselt päevaseid koormuseid. Liitium-ioonakul ei tekkinud probleeme suviti päevase koormuse katmisega, kuid pliiakul oli vaja igal päeval analüüsida hoolikalt, millal aku töötab ning millal võetakse energiat võrgust. Üldiselt oli koormusgraafikult näha, et öösel aku laadis ennast ning päeval kasutas majapidamine võimalikult palju elektrienergiat akust. Seega oli liitium-ioonaku mõju koormusgraafikutele suurem ning elektrivõrgu vaatest kasumlikum, sest see aitab tarbimist rohkem juhtida kui pliiaku või ilma akuta lahendus.

Töö analüüs koostati ka tervele Eesti tarbimisele ning võeti olukord, kus 100000 klienti on varustatud 9,8 kWh liitium-ioonakuga. Sellest analüüsist selgus, et akud ei aidanud väga palju võtta koormust ära võrgult ning kasumlikum oleks analüüsida kõiki eramuid eraldi, et saavutataks suurim efektiivsus.

6. Kasutatud kirjandus

- [1] Nordpool, „Price calculation,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Price-calculation/>. [Kasutatud 17.04.2022].
- [2] „Elektrihinna mõjurid,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat/6-kauplemine-avatud-elektriturul/62-elektrihinna-mojurid>. [Kasutatud 08.05.2022].
- [3] A. Rosin, S. Link, H. Hõimoja ja I. Drovтар, *Energisalvestid ja -salvestustehnoloogiad*, Tallinn: Tallinna Raamatutrükikoda, 2015.
- [4] A. Rosin, S. Link ja I. Drovтар, „Energia lokaalse tootmise analüüs büroohoonele osa II,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2013.
- [5] A. Z. A. Shaqsi, K. Sopian ja A. Al-Hinani, „Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits,” ScienceDirect, 19 August 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352484720312464?token=FE751AF243166318B46AE06BB1FC26D546C9DFCED52C9E68756F1F96C65FFBBC5C4136CEF564CF35FCD8A667D306EDED&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220402081018>. [Kasutatud 03.04.2022].
- [6] G. J. May, A. Davidson ja B. Monahov, „Lead batteries for utility energy storage: A review,” ScienceDirect, 15 november 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352152X17304437?token=6599902C652C78E0FEEDB5F1BDD7FC2869AAE9C970F8BE68D23F65897202C56B36C8548FD33CE4578B1B2C20B9AD85E7&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220402122114>. [Kasutatud 02.04.2022].
- [7] Asian Development Bank, *Handbook on Battery Energy Storage System*, Mandaluyong: Asian Development Bank, 2018.
- [8] „autobatterienbilliger,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autobatterienbilliger.de/blei-saeure-batterien>. [Kasutatud 08.05.2022].
- [9] S. Zhang, T. Jow, K. Armine ja G. Henriksen, „LiPF₆-EC-EMC electrolyte for Li-ion battery,” *Journal of Power Sources*, kd. 107, pp. 18-23, 2002.
- [10] EMD International, „energyPRO kasutusjuhend,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.emd-international.com/energypro/>. [Kasutatud 11.04.2022].
- [11] EMD International A/S, „User's Guide energyPRO,” EMD International A/S, Aalborg, 2017.
- [12] „Börsihinnad Eesti ajas,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dashboard.elering.ee/et/nps/price?interval=minute&period=search&start=2020-12-31T22:00:00.000Z&end=2021-12-31T21:59:59.000Z&show=graph>. [Kasutatud 15.04.2022].
- [13] „Accurat Traction T160 Versorgungsbatterie Datasheet,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autobatterienbilliger.de/mediafiles/Datenblatt/accurat/Traction-Wet/Accurat-TractionWet-T160-EN.pdf>. [Kasutatud 10.05.2022].
- [14] „Accurat Traction T160 Versorgungsbatterie 160Ah hind,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autobatterienbilliger.de/Accurat-Traction-T160-Versorgungsbatterie>. [Kasutatud 10.05.2022].
- [15] „GreenAkku Zyklenfeste Lead Carbon Batterie 12V 150Ah,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://greenakku.de/Batterien/Blei-Kohlenstoff/GreenAkku-Zyklenfeste-Lead-Carbon-Batterie-12V-150Ah::2996.html>. [Kasutatud 23.04.2022].

- [16] „Accurat Industrial I195 8V 195Ah Versorgungsbatterie Datasheet,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autobatterienbilliger.de/mediafiles/Datenblatt/accurat/Industrial/Accurat-Industrial-I195-Datenblatt-EN.pdf>. [Kasutatud 11.05.2022].
- [17] „Accurat Industrial I195 8V 195Ah Versorgungsbatterie hind,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autobatterienbilliger.de/Accurat-Industrial-I195-8V-195Ah-Versorgungsbatterie>. [Kasutatud 11.05.2022].
- [18] „GreenAkku Zyklenfeste GEL Batterie 12V 100Ah,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://greenakku.de/Batterien/Gel-Batterien/GreenAkku-Zyklenfeste-GEL-Batterie-12V-100Ah::1711.html>. [Kasutatud 11.05.2022].
- [19] GreenAkku, „Pylontech Hochvolt LiFePO4 Powercube 14,4kWh 288V hind,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://greenakku.de/Batterien/Lithium-Batterien/Lithium-Hochvolt/Pylontech-Hochvolt-LiFePO4-Powercube-14-4kWh-288V::1549.html>. [Kasutatud 13.05.2022].
- [20] „LG Chem RESU datasheet,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.europe-solarstore.com/download/lgchem/LG_Chem_RESU_datasheet.pdf. [Kasutatud 16.04.2022].
- [21] „RCT Power Batterie 9.6 kWh inkl. Power Sensor,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.photovoltaik-shop.com/rct-power-batterie-9-6-kwh.html>. [Kasutatud 13.05.2022].
- [22] „Tesla Powerwall,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.europe-solarstore.com/tesla-powerwall.html>. [Kasutatud 13.05.2022].
- [23] Statistikaamet, „Palgavõrdlus,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://palgad.stat.ee/palgavordlus>. [Kasutatud 16.04.2022].
- [24] Elektrilevi OÜ, „Võrguteenuse kvaliteedinäitajad 2019,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/ettevottest/tutvustus/failid/vorguteenuse_kvaliteedinaitajad_2019.pdf. [Kasutatud 16.04.2022].
- [25] Elektrilevi OÜ, „Elektrilevi võrguteenuse hinnakiri,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/8644141/kliendile/Elektrilevi_hinnakiri_vorguteenuse_hinnad_alates_1_juuni_2022_EST.pdf. [Kasutatud 16.04.2022].
- [26] Maksu- ja tolliamet, „Kütus ja elektrienergia,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.emta.ee/ariklient/maksud-ja-tasumine/aktsiisid/kutus-ja-elektrienergia>. [Kasutatud 17.04.2022].
- [27] Elering, „Taastuenergia tasu,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/taastuenergia-tasu>. [Kasutatud 13.05.2022].
- [28] Elering, „Tarbimine ja tootmine,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://dashboard.elering.ee/et/system/with-plan/production-consumption?interval=minute&period=search&start=2020-12-31T22:00:00.000Z&end=2021-12-31T21:59:59.000Z>. [Kasutatud 14.05.2022].
- [29] L. S. Sterling, *The Art of Agent-Oriented Modeling*, London: The MIT Press, 2009.
- [30] „LG Chem Resu 13 hind,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.europe-solarstore.com/batteries/manufacture/lg-chem/lg-chem-resu-13-48v-lithium-ion-storage-battery.html>. [Kasutatud 16.04.2022].
- [31] „LG Chem Resu 10 hind,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.europe-solarstore.com/batteries/manufacture/lg-chem/lg-chem-resu-10-48v-lithium-ion-storage-battery.html>. [Kasutatud 16.04.2022].