



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

MIKROVÕRGU ENERGIASALVESTI UURIMINE JA KATSETAMINE

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Riho Sell

Üliõpilaskood: 163284AAVM

Juhendaja: dotsent Elmo Pettai

Tallinn, 2018.a.

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.

“.....” 201.....

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Riho Sell	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Mikrovõrgu energiasalvesti uurimine ja katsetamine	
<i>Kuupäev:</i> 08.06.2018	80 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Elmo Pettai	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Kristjan Peterson	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Käesolevas magistritöös kirjeldati peamisi mikrovõrkude arengusuundi. Töös käsitletakse energiasalvestiga mikrovõrkude põhilisi osasid ning vaadeldakse TTÜ laboris oleva mikrovõrgu struktuuri ja ülesehitust. Mikrovõrgu energiasalvesti praktiliseks uurimiseks, katsetulemuste saamiseks ja nende analüüsimiseks on vaja eelnevalt taaskäivitada akupatarei, mille elementide parameetrite väärtused olid isetühjenemise tõttu saavutanud kriitilise piiri. Töö käigus teostati mittetöökorras Li-ioon akudel põhineva akupatarei demontaaž. Järgnevalt teostati elementide eraldiseisev laadimine, teostati tühjendamiskatseid, akuelementide tehnilise seisukorra hindamine ning akupatarei montaaž. Täiendavalt määrati laadimise ja tühjendamise tsüklite käigus olulisemate energiasalvesti tehniliste parameetrite väärtused ja koostati laadimise ja tühjendamise karakteristikud.	
<i>Märksõnad:</i> mikrovõrk, energiasalvesti, Li-ioon akud, BMS, tarkvõrgud	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Riho Sell	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Research and development of battery energy storage system	
<i>Date:</i> 08.06.2018	80 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology School of Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Elmo Pettai <i>Consultant(s):</i> Kristjan Peterson	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>This thesis describes the main trends of microgrid development. The study gives an overview of the main parts of a microgrid with battery energy storage storage system and describes the structure of the microgrid system located in the laboratory of Tallinn University of Technology.</p> <p>Before any tests could be carried out, it was necessary to re-start the battery pack. Due to a long period of self-discharge, the battery element parameter values had reached the critical limit.</p> <p>The practical part of this thesis involved disassembly of the non-operating lithium ion battery. Subsequently the components were individually loaded, discharge tests were carried out, evaluation of the technical condition of battery cells was evaluated and battery pack reassembled.</p> <p>The technical parameters of the battery storage system were monitored during the loading and unloading cycles and corresponding characteristics were analyzed.</p>	
Keywords: microgrid, energy storage system, lithium ion battery, BMS, smart grid	

Sisukord

Lõputöö ülesanne	7
Teema põhjendus	7
Töö eesmärk.....	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	8
Lähteandmed.....	8
Lõputöö konsultandid	8
Eessõna	9
Lühendite ja sümbolite loetelu	10
Sissejuhatus	11
1. Mikrovõrgud	12
1.1. Mikrovõrgu koostis	12
1.2. Mikrovõrgu funktsioonid	13
1.2.1 Lokaalne energiatootmine.....	13
1.2.2 Tarbijate varustuskindluse tagamine	14
1.2.3 Sagedusregulatsioon ja avariitootmine	15
1.3. Mikrovõrkude arengusuunad	15
1.3.1 Energiasalvestite kasutamine	15
1.3.2 Akupatareide taaskasutus.....	17
1.3.3 Integreeritud PV paneelid	17
1.3.4 Isikute vaheline energiakaubandus (peer to peer).....	17
1.3.5 Alalisvooluvõrgud	18
2. Energiasalvesti struktuur	19
2.1. Akutüübid	19
2.1.1 Li-ioon akud	19
2.1.2 Muud akutüübid	20
2.2. Akuhaldussüsteem	23
2.3. Vooluandur	25
2.4. Jõumuundur.....	25
3. TTÜ mikrovõrgu prototüüp	27
3.1. Energiasalvesti fiidri struktuur ja ülevaade.....	28
3.1.1 Akupatarei.....	28
3.1.2 BMS.....	28
3.1.3 Muundur ja abiahelad.....	29
3.1.4 Mõõteahelad.....	31
3.2. Päikselektrijaama fiidri struktuur ja ülevaade	31
3.3. Tarbijafiidri ja jaotusvõrgu fiidri struktuur ja ülevaade	33
3.3.1 Jaotusvõrgu fiider	33
3.3.2 Tarbijafiider	33
3.4. Mikrovõrgu juhtimissüsteem	34
4. TTÜ mikrovõrgu Li-ioon akudega energiasalvesti	36
4.1. Akuelementide parameetrid	36
4.2. Li-ioon Akuelementide tehniline seisund	37
4.2.1 Akuelementide deformatsioon	39

4.3.	Akuelemendi laadimine	40
4.4.	Akuelementide tühjendamine	43
4.5.	Akupatarei montaaž	46
4.6.	Akupatarei käivitamine	49
4.7.	Praktilised toimingud mikroõrgu laadimis- ja tühjendamistsükli teostamiseks	52
4.8.	Laadimistsükkel	55
4.9.	Tühjendamistsükkel	57
4.10.	Tühjendamis- ja laadimistsükkel (täistsükkel).....	59
4.11.	BMS-i balanseerimisvõimekus.....	63
4.12.	TTÜ mikroõrgu Li-ioon energiasalvesti majanduslikud näitajad	66
Lõputöö kokkuvõte		69
Lisad		76
L.1.	BMS-i tarkvaras kasutatava tähistuse ja tegelike akuelementide tähistuse seos .	77
L.2.	Akuelementide ühendusvaade.....	78
L.3.	Mikroõrgu PC kasutajaliidese avamise juhend.....	79
L.4.	Mikroõrgu ELFAK stsenaariumi käivitamine	80

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Mikrovõrgu energiasalvesti uurimine ja katsetamine
Üliõpilane:	Riho Sell 163284AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Elmo Pettai
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	15.06.2018
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2018

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Instituudi direktor (allkiri)

Teema põhjendus

Energeetikas on üheks oluliseks suunaks hajaenergeetika arendamine. Magistritöös antakse ülevaade mikrovõrgu uutest lahendustest ja uuritakse olemasoleva Li-ioon akudega energiasalvesti tehnilist seisundit, et integreerida see eksperimentaalse mikrovõrgu koosseisu, millist on plaanis rakendada arendustöö tegemisel hajaenergeetika valdkonnas. Seni puuduvad selle akupatarei kohta usaldusväärsed katseandmed.

Töö eesmärk

Kuna energeetika areneb kiiresti tarkvõrgu suunas siis tehnika nüüdistaseme väljaselgitamiseks on kõigepealt tarvis koostada ülevaade mikrovõrkude arengutest. Konkreetse mikrovõrgu energiasalvesti praktiliseks uurimiseks, katsetulemuste saamiseks ja nende analüüsimiseks on vaja eelnevalt laadida TTÜ mikrovõrgu stendi koosseisus olev Li-ioon akupatarei, teostada selle laadimise ja tühjendamise tsükkel ning määrata oluliste tehniliste parameetrite väärtused.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Millised on Li-ioon akudega energiasalvestite arengusuunad maailmas?

Millised on TTÜ laboratooriumis oleva katselise mikroelektrivõrgu ja selle koosseisus oleva Li-ioon akudega energiasalvesti struktuur ja ülesehitus?

Millised on olemasoleva Li-ioon akudega akupatarei tehnilised näitajad, milliseid akude mõõtmismeetodeid saab laboris rakendada ning milliseid mõõtetulemuste analüüsi- ja hindamise meetodeid sobib uurimistöös kasutada?

Milliseid tehnilisi lahendusi kasutatakse nüüdisajal energiasalvesti käivitamiseks, akude laadimiseks ja koormuskatsete teostamiseks?

Kuidas võiks teostada akupatarei laadimise ja tühjendamise tsükkel ning määrata katseliselt selle akupatarei tehniliste parameetrite väärtused?

Lähteandmed

Töö peamised lähteandmed pärinevad energiasalvestite ja mikroelektrivõrgu alase tehnilisest kirjandusest. Lisaks töös kasutatakse olulisel määral TTÜ laboris oleva mikroelektrivõrgu energiasalvestitega kaasas olevad elektriskeemid ja muud tehnilist dokumentatsiooni.

Lõputöö konsultandid

Kristjan Peterson-laboratoorne töö

(allkiri, kuupäev)

Eessõna

Magistritöös keskendutakse Tallinna Tehnikaülikooli laboratooriumis asuva TTÜ ja Harju Elekter Elektrotehnika AS koostöös valminud energiasalvesti akupatarei töökorda seadmisele. Töö koostamisel kasutatud algandmed põhinevad antud pilootprojektiga kaasneval dokumentatsioonil ja TTÜ laboratooriumis teostatud katsetuste tulemustel.

Käesoleva magistritöö koostamisel oli suur osakaal energiasalvestiga seotud ajamahukatel praktilistel toimingutel, mille teostamisel oli suureks abiks Kristjan Peterson. Samuti soovin tänada dotsent Elmo Pettaid, kelle juhendamisel töö valmis, ning kes samuti abistab praktiliste toimingute teostamisel.

Lõpetaja: Riho Sell

Elukoht: Mäe 23, Tartu

Töökoht: Elektrilevi OÜ

Tel: +372 51994761

Lühendite ja sümbolite loetelu

Ah	-	Ampertund
BES	-	Akupatariga energiasalvesti (<i>Battery energy storage</i>)
BESS	-	Akupatareiga energiasalvestussüsteem (<i>Battery energy storage system</i>)
BMS	-	Akupatarei haldussüsteem (<i>Battery Management System</i>)
CAN	-	Kommunikatsiooniprotokoll (<i>Controller Area Network</i>)
CCL	-	Laadimisvoolu piirväärtus (<i>Charge current limit</i>)
DCL	-	Tühjendusvoolu piirväärtus (<i>Dicharge current limit</i>)
DOD	-	Tühjakslaadimise sügavus (<i>Depth of Discharge</i>)
ESS	-	Energiasalvestussüsteem (<i>Energy storage system</i>)
Li-ioon	-	Liitiumioon (aku)
SOC	-	Aku laetuse tase (<i>State of charge</i>)
SOH	-	Aku tervise tase (<i>State of health</i>)
NAS	-	Väävel-Naatrium
NiCd	-	Nikkel-kaadiumaku
NiMM	-	Nikkel-metallhüdriidaku
PV	-	Päikseelektrijaam (<i>Photovoltaics</i>)
RTU	-	Kaugjuhtimise seade (<i>Remote Terminal Unit</i>)
UPS	-	Katkematu energiaallikas (<i>Uninterruptible Power Supply</i>)

Sissejuhatus

Elektrienergia puhul on tegemist väärtusliku energialiigiga, mida saab muundada hõlpsasti teisteks energialiikideks. Seetõttu on maailmas pidevalt kasvav nõudlus elektrienergia järele. Elektrivõrgu tsentraalselt ülesehitatud elektritootmise ja edastamise süsteem on toiminud edukalt ligi 100 aastat. Sellel sajandil on aga toimunud olulisi muutusi energiavarustussüsteemi talituses.

Taastuvenergeetika kiire areng loonud olukorra, kus järjes suurenev osa jaotusvõrgust omab võimekust genereerida elektrienergiat. See muudab energiavood elektrivõrgus kahesuunaliseks, mis on osaliselt kiiresti muutuva ja ettearvamatu loomuga. Elektrienergia varustuskindluse tagamiseks on oluline, et elektrivõrkude areng käiks kaasas toimuvate muutustega, ning tagaks eeldused uute süsteemide kasutuselevõtuks. Üheks võimalikuks süsteemiks on mikrovõrk. Mikrovõrkude laialdase rakendamise kasuks räägib asjaolu, et taastuvenergeetika laialdasem kasutus on tekitanud nõudluse mikrovõrkude järele. Lisaks on tänapäeva tehnoloogiline tase jõuelektroonika ja energiasalvestite valdkonnas võimeline sobivaid lahendusi tagama.

Magistritöö eesmärgiks on TTÜ laboratooriumis katselise mikrovõrgu stendi kuuluva Li-ioon akudega akupatarei käivitamine ja selle protseduuri kirjeldamine. Lisaks uurida katseliselt töökorda seatud akupatarei tehnilist seisukorda ning teostada laadimise ja tühjendamise tsükkel, mille käigus on võimalik määrata energiasalvesti oluliste tehniliste parameetrite väärtused.

Lõputöö esimeses peatükis kirjeldab autor mikrovõrkude üldist struktuuri ja annab ülevaate mikrovõrkude funktsioonidest. Samas peatükis on vaadeldud mikrovõrkude võimalikke arengusuundasid.

Teises peatükis on vaatluse all mikrovõrgu akupatareiga energiasalvesti fiidri struktuur, kus kirjeldatakse täpsemalt energiasalvesti komponentide omadusi ja nende võimalike arengusuundi.

Kolmas peatükk on keskendunud TTÜ laboratooriumis asuva energiasalvestiga mikrovõrgu prototüübi kirjeldamisele. Peatükis kirjeldatakse fiidrite kaupa mikrovõrgu ehitust ja põhiliste komponentide omadusi.

Lõputöö neljandas peatükis kirjeldab ja analüüsib autor akupatarei tehnilist seisukorda, mis tagas vajaduse akuelementide eraldiseisvaks laadimiseks. Peatükis on kirjeldatud praktilised tegevused akupatarei käivitamiseks, ning laadimis- ja tühjendamistsükli teostamiseks. Antud peatükis analüüsitakse katsetulemuste põhjal koostatud elementide ja energiasalvesti põhiseid laadimis- ja tühjendamiskarakteristikud.

1. Mikrovõrgud

Traditsioonilised elektrivõrgud koosnevad tsentraliseeritud tootmisest, ülekandevõrgust, jaotusvõrgust ning kontrolli- ja juhtimisfunktsioonidest, mille eesmärk on tagada süsteemi stabiilne ja efektiivne toimimine. Tänapäeval on vertikaalne elektrivõrkude ülesehitus muutunud tänu tehnoloogia arengule ja kasutuselevõtule, ning järgmise põlvkonna elektrivõrku iseloomustavad märksõnad on taastuvenergeetikal põhinev elektrienergia hajatootmine, tarbimise juhtimine, reaajas elektritariifide rakendamine. [1] Definitsiooni järgi on elektri tarkvõrk (*Smart Grid*) elektrivarustussüsteem, kus elektritootjad, -edastajad, -jaotajad, -teenindajad, -tarbijad, süsteemihaldurid, arveldajad ja füüsilised isikud on hõlmatud ühtsesse andmevõrkudega seotud süsteemi [2]. Tarkvõrgu osaks on mikrovõrgud, seetõttu saab mikrovõrku pidada tarkvõrgu oluliseks ehituskiviks. [3]

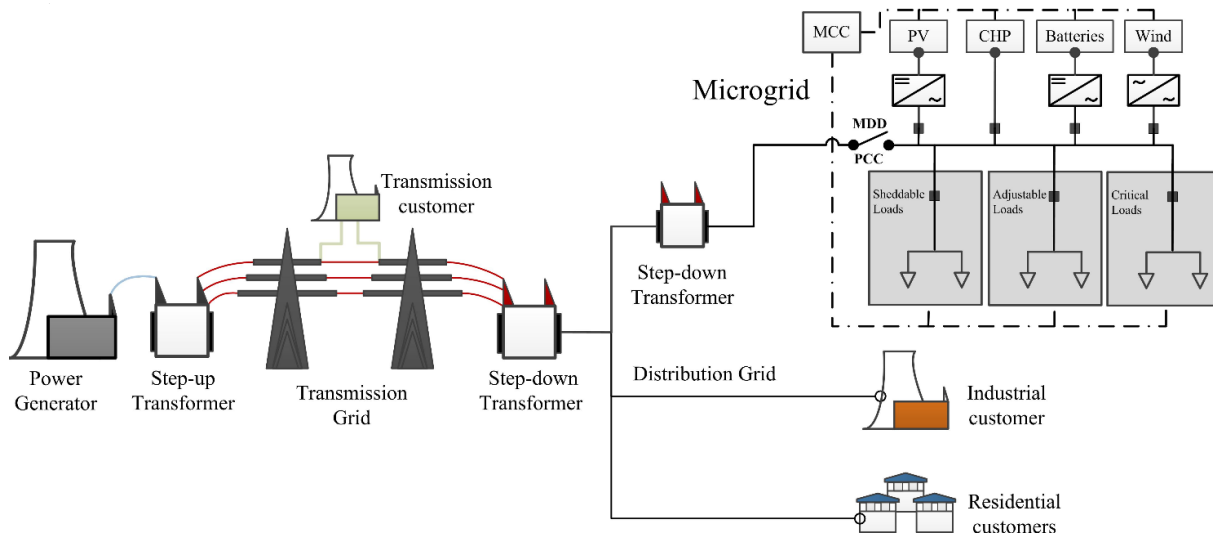
Mikroelektrivõrguks nimetatakse süsteemi, mis koosneb hajaenergeetikal põhinevast energiatootmisest, energia salvestusseadmetest ja paindlikust tarbimisest. Mikrovõrk võib olla vastavalt otstarbele ühenduses elektrivõrguga, kui ka töötada autonoomselt ehk saartalitusel. [4] Definitsioonist tulenevalt saab mikrovõrke jaotada kahte gruppi: võrguühenduseta- ja võrguühendusega mikrovõrgud.

1.1. Mikrovõrgu koostis

Mikrovõrgu koosseisu kuuluvad süsteemid on kirjeldatud allolevas loetelus [4]:

- Energia tootmisüksus- üldjuhul on tegu hajaenergeetika tootmiseseadmega, mis on ühendatud madalpingevõrku ja mille võimsus on alla 1 MW (päiksepaneelid, kütuseelemendid, tuuleturbiinid, mikroturbiinid),
- Energiasalvesti- (Akupatareidel põhinevad energiasalvestid, hoorattad, superkondensaatorid),
- Energiatarbijad- (vähemalt osaliselt juhitavad),
- Energiaedastusseadmed- (alajaamad, elektriliinid).

Joonisel (Joonis 1.1) on kujutatud mikrovõrgu mudelit, mis koosneb energiasalvestist, taastuvenergeetikal põhinevast elektritootmisest, juhitavast ja mitte juhitavast koormusest, jaotusvõrgust, ülekandevõrgust ja tsentraalsest elektritootmisest.



Joonis 1.1 Mikrovõrgu põhimõtteskeem [5]

1.2. Mikrovõrgu funktsioonid

Mikrovõrgud on oluliseks ehituskiviks elektrisüsteemis ja tehniliseks eelduseks madala süsinikukasutusega ning keskkonnasõbraliku elektritootmise laialdaseks kasutuselevõtuks. Järgnevatel peatükkides on kirjeldatud mikrovõrkude funktsioone.

1.2.1 Lokaalne energiatootmine

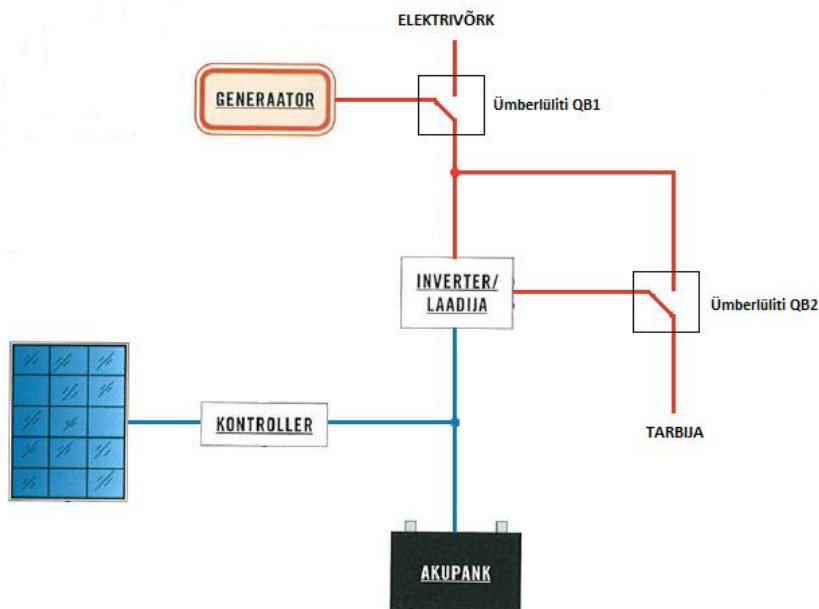
Energiatõhususe tagamiseks energia edastusel on vajalik minimeerida energiamuundamise etappe. Kuna elektrienergia lõpptarbimine on hajutatud, siis on võimalik tagada kõrgemat efektiivsust kui tsentraliseeritud tootmise korral. Lisaks tõstab energiasüsteemis oluliselt energiatõhusust asjaolu, kui peamine vajadus ei ole toota tarbijatele ainult elektrienergiat, vaid on võimalik ära kasutada ka kogutavat päikesesoojust. [2]

Taastuvatest energiaallikatest elektritootmise arengut takistav tegur on ajalooliselt olnud muutuva ja ettearvamatu loomuga energiavoogude iseloom. Rakendades BESS-i (*battery energy storage system*) koos hajatoomisega selliselt, et moodustuks terviklik mikrovõrk ja energiasalvesti täidaks vajadusel generaatori või koormuse rolli, on võimalik tagada stabiilne saartalitused kui ka võrguga ühendust omav elektrivõrk. [6]

Elektrivõrgu seisukohalt on võrguühenduseta (*off-grid*) mikrovõrk sobilik piirkondadesse, kuhu võrguühenduse loomine tsentraalse jaotusvõrguga oleks majanduslikult ebaotstarbekas. Samuti saab *off-grid* võrgulahendust kasutada olukorras, kus hajaasustuse piirkonnas asuv elektrivõrk on

amortiseerunud (pingeprobleemid, suur rikete arv), ning majanduslikult otstarbekam oleks lokaalselt energiat toota kui olemasolev elektrivõrk rekonstrueerida.

Joonisel (Joonis 1.2) on kujutatud Elektrilevi OÜ *off-grid* lahenduse põhimõtteskeem. Kuna antud tehniline lahendus on testimisjärgus, siis on säilitatud reservühendus elektrijaotusvõrguga (tagatakse ümberlüüti QB1 abil).



Joonis 1.2 Elektri jaotusettevõtte Elektrilevi OÜ *off-grid* lahendus [7]

1.2.2 Tarbijate varustuskindluse tagamine

Suured tsentraalselt energiasüsteemid on haavatavad looduskatastroofide, sagedus- ja pingestabiilsust tagavate objektide tehnilistel riketele kui ka rünnakutele nii infosüsteemide kui ka füüsilise objektide vastu. Sündmuste mõju ulatus on suur ja reageerimisaeg pikk. Seevastu energiasalvestiga mikrovõrk, mis on võimeline toimima nii saartalitusel kui ka võrguühenduse režiimis, suudab kiiresti taastada vajadusel lokaalse elektrivarustuse. [1] Kasutades sobiliku energiasalvesti tehnoloogiat (kõik akutüübid ei võimalda või ei ole otstarbekas kasutada), on võimalik siluda pingelohke, toimida avariitoite või katkematu toite allikana [8].

Sujuv liikumine võrgutalitusel saartalitusel saab olla võimalik ainult suuremahulise BESS korral või omades stabiilset elektrienergiat genereerivat ressursi. Üldjuhul on vajalik osaline koormuste (madalama prioriteediga koormuse) eraldamine võrgust, sõltuvalt hetkel saadaval oleva energia kogusest. [3] Samuti on oluline, et peale jaotusvõrgust toimunud sündmust suudaks

(inverteripõhise hajatootmiseseadmega) mikrovõrk siirdudes võrgutalitusele saartalitusele säilitada oma dünaamilise stabiilsuse [9].

1.2.3 Sagedusregulatsioon ja avariitootmine

Elektrienergia salvestustehnoloogiate ja akude areng võimaldab suurendada off-grid mikrovõrkude osatähtsust ja loob täiendavat lisandväärtust elektritootmises ja jaotusvõrgus. Kiiresti juhitavad energiasalvestiga on-grid mikrovõrgud võimaldavad avariolukorras asendada pöörlevat reservi, ning seetõttu aitavad reguleerida võrgu sagedust. Lisaks ühtlustavad energiasalvestid koormusgraafikut ja edastusvõimsusi, ning reguleerida reaktiivvõimsust. [2]

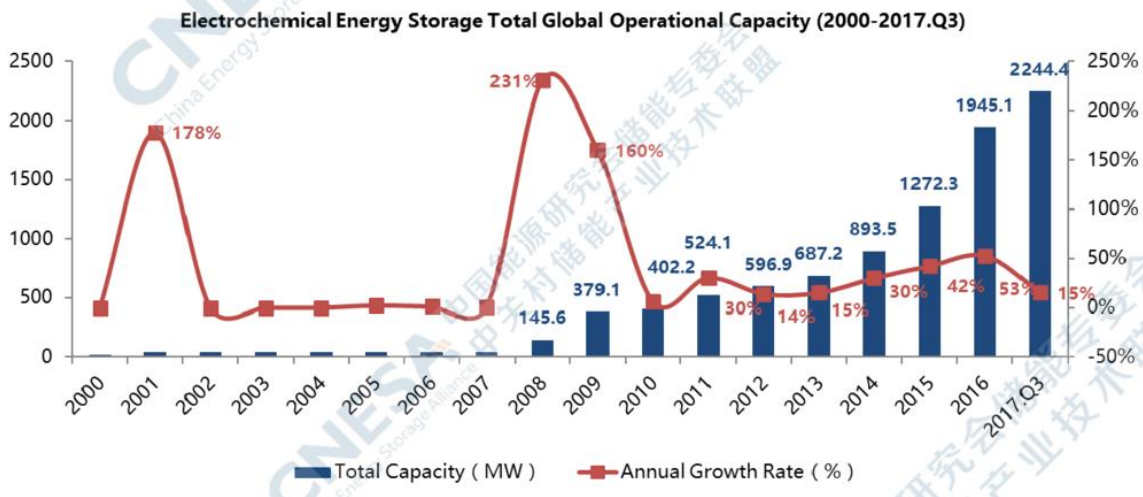
Suurim Li-ioon akudega BESS läks töösse 01.12.17 Austraalias Jamestowni linna lähedal. Tesla poolt toodetud energiasalvesti võimsus on 100MW ja võimaldab salvestada 129MWh energiat. [10] Energiasalvesti töötab koos 315W nimivõimsusega tuulepargiga [11]. Lisaks tuuleenergia salvestamisfunktsioonile võimaldab energiasalvesti stabiliseerida piirkonna energiasüsteemi. Li-ioon akudel põhinev BESS-i saab kiirelt lülitada ümber soovitud režiimile, ning seeläbi juhtida energiavoo suunda. Antud BESS on juba osalenud võrgusageduse stabiliseerimisprotsessis, kui Loy Yang elektrijaama üks energiablokkidest avariiliselt seiskus [12]).

1.3. Mikrovõrkude arengusuunad

Energiasüsteemides on toimuva arendustöö kõrgemaks eesmärgiks on enamasti energiamuundamise kasuteguri tõstmine ja energiatõhususe suurendamine [2]. Järgnevates peatükkides on kirjeldatud mikrovõrkudega seotud arengusuund, mis eelmainitud eesmärki toetavad.

1.3.1 Energiasalvestite kasutamine

Oluliseks mikrovõrkude osatähtsust suurendavaks teguriks energiasüsteemides on energiasalvestite kasutuselevõtt. Joonisel (Joonis 1.3) on kujutatud akupatareidel põhinevate energiasalvestite aastas installeeritud võimsuse ja kumulatiivse võimsuse kasvutrende maailmas. Valdav osa uutest BESS-l põhinevad Li-ioon akudel, eriti just taastuvenergeetika projektides [13].



Joonis 1.3 Akupatareidel põhinevate energiasalvestite kasutamise statistika [13]

Energiasalvesti kasutamine mikrovõrgu koostises võimaldab elektrienergia tootmise ja tarbimise ajalist nihutamist. See lisab mikrovõrgule omakorda täiendavat funktsionaalsust, millest olulisemat on vaadeldud pt (1.2).

BESS-i täiendavat kasutuselevõttu soodustab langustrendis akuelementide maksumus, mikrovõrkude valmislahendused (*plug and play*), lahenduste skaleeritavus vastavalt võimsusele ja seadmete modulaarus. Joonisel (Joonis 1.4) on ABB mikrovõrgu lahendus. Saadaval on energiasalvestiga ja PV (päikselektrijaama) tootmisüksusega ühilduv modulaarne süsteem alates võimsusest 60 kW (Hybrid 10) kuni 580 kW (Integrated 40). Antud tootesarja BESS võimaldab sujuvat režiimivahetust saar- ja võrgutalituse vahel. [14] Kompaktne mikrovõrgu ehitus võimaldab süsteemi paigaldada ja teisalda vastavalt vajadusele, seega ei ole installeeritud mikrovõrk lõplikult seotud konkreetse asukohaga, ning mikrovõrku kui investeeringu saab rakendada seal, kus on vajadus.



Joonis 1.4 ABB tootesarja PowerStore mikrovõrgu lahendused, vaskakul Hybrid 10, paremal Integrated 40 [14]

1.3.2 Akupatareide taaskasutus

Kasvav elektriautode kasutamine varustab akupatareide turgu taaskasutatud akupatareidega. Olenevalt kasutamisest eeldatakse 10 aastase elutsükli järel akupakilt 70-80 % selle originaalmahtuvusest, mis sõltub kiirilaadija kasutussagedusest, sõidumustrist ja keskkonnateguritest. Elektriautode taaskasutatud Li-ioon akude kasutamine statsionaarsetes energiasalvestisüsteemides on tehnoloogia, mis võimaldab oluliselt langetada energiasalvestuse hinda. [15] Näiteks autotootja Nissani ja Eatoni koostöös toodetavad (tootesari xStorage) Li-ioon 4,2 kWh akudega energiasalvesti hind koos inverteri ja paigaldusega algab 4943 eurost [16].

1.3.3 Integreeritud PV paneelid

Arendatav valdkond on hoonete konstruktsiooni integreeritud PV paneelid (BIPV- *Building Integrated Photovoltaics*). Hoonesse integreeritud PV paneelid täidavad kahte eesmärki samaaegselt, olles nii hoone konstruktsiooni osa ja genereerides elektrienergiat. Hoides kulusid kokku ehitusmaterjalilt, paraneb PV paneelide investeeringu tasuvus. Eraldi paigaldatavad PV paneelid vajavad kinnituskonstruktsiooni, mis tekitab täiendavaid kulusid. [17]

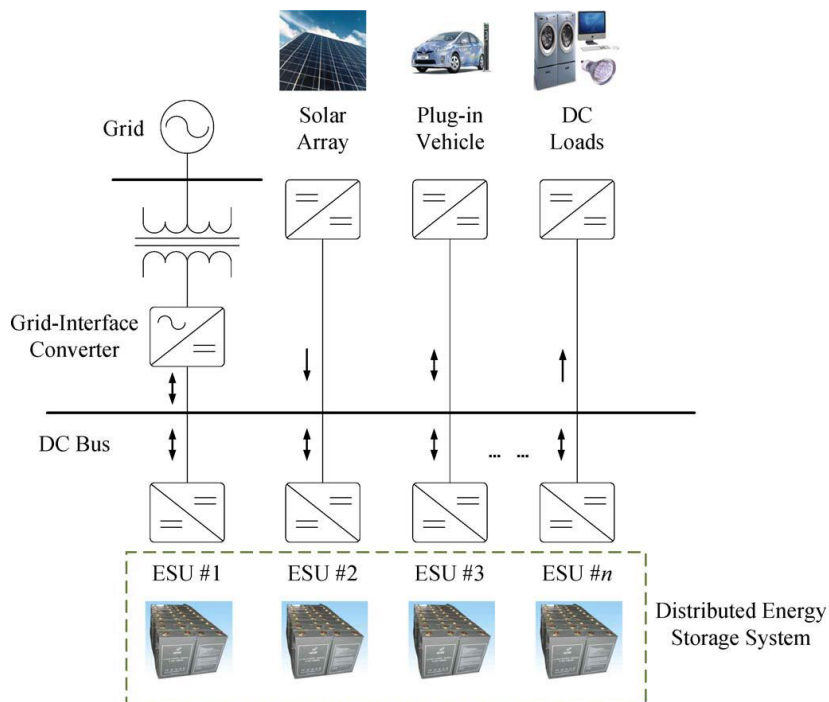
PV paneelide kasutamist on hakatud ka riiklikult tasemel reguleerima. Näiteks USA-s California osariigis võeti vastu ehituseadustiku täiendus (vastu võetud 09.05.2018 California Energy Commission), mille järgi alates aastast 2020 kõigis uutes ja renoveeritavates kuni kolme korrusega hoonetes kohustuslik kasutada PV paneele. Hooned, kuhu ei ole võimalik paneele paigaldada (varjulised kohad, muud põhjused), on kohustatud toetama kogukondlike PV projekte. [18]

1.3.4 Isikute vaheline energiakaubandus (peer to peer)

Ettevõtted nagu WePower, Suncontract, Power Ledger arendavad plokkahelal (blockchain) taastuvenergeetika kauplemise ja finantseerimise platvormi. See võimaldab vahetult ühendada energiamüüjad, ostjad ja investorid, ning kaubelda otse soovitud osapoolega. Kauplemiseks kasutatakse žetoonidel (*token*) põhinevat süsteemi, mille eesmärgiks on tagada likviidsus ja parandada kapitali ja investeeringute kättesaadavust taastuvenergeetika projektidesse. WePoweri platvormi korral on žetoonide väärtus seotud 1 kWh väärtuses energiaga, millega on võimalik energiaturul kaubelda. Antud süsteemi eeldab, et ostetud energia tarbimiseks peaks müüja ja ostja olema samas riigis või ühendatud energiaturul. Ent samas ei pea energia ostja seda ise ära tarbima, vaid võib seda osta hoopis investeerimiseks või edasimüümiseks [19]

1.3.5 Alalisvooluvõrgud

Taastuvenergeetikal põhinevad tootmiseseadmete ja akupatareidel põhinevate energiasalvestite väljund on üldjuhul alalisvool (Joonis 1.5). Seetõttu oleks võimalik vähendada elektrivoolu muundamise etappe elektrivõrgus ja tõsta seeläbi kasutegurit, kui tarbimisahelas oleks samuti kasutusel alalisvool. [20] Seda enam, et paljud tänapäevased elektriseadmed (LED-valgustid, telerid, arvutid) kasutavad väike- ja madalapingelist alalisvoolu. Seadmete ehitus lihtsustub tänu alaldi puudumisele. [2]



Joonis 1.5 Alalisvooluvõrgu mikrovõrgu mudel [20]

DC edastamisel ei ole vajadust kompenseerida reaktiivenergiat, ning elektrienergia edastamise kasutegur suureneb. DC edastusel ainuke juhtimist vajav suurus on pingeniivo. Samuti on võimalik edasta läbi samade kaablite suuremat võimsust tänu suuremale pingeskeskväärtusele (keskväärtus on võrdne amplituudväärtusega). [2]

2. Energiasalvesti struktuur

Energiasalvesti on mikrovõrgu üks olulisemaid fiidreid. Järgnevas peatükis kirjeldatakse lähemalt energiasalvesti tähtsamaid komponente.

2.1. Akutüübid

Akuelemendid on BES-i üheks põhiliseks koostisosaks, ning normaaltingimustel energiasalvesti ainsaks komponendiks, milles energia salvestamis- ja tühjendamisprotsessi käigus toimub kulumine. Käesolevas peatükis kirjeldatakse tänapäeval levinud akutehnoloogiaid. Kindlat liiki akudel on kasutuseeliseid vaid piiratud arvu rakendustes, seetõttu on valiku tegemisel vajalik lähtuda otstarbest. Põhilised kriteeriumid on aku tsükliline eluiga ning maksumus. [8]

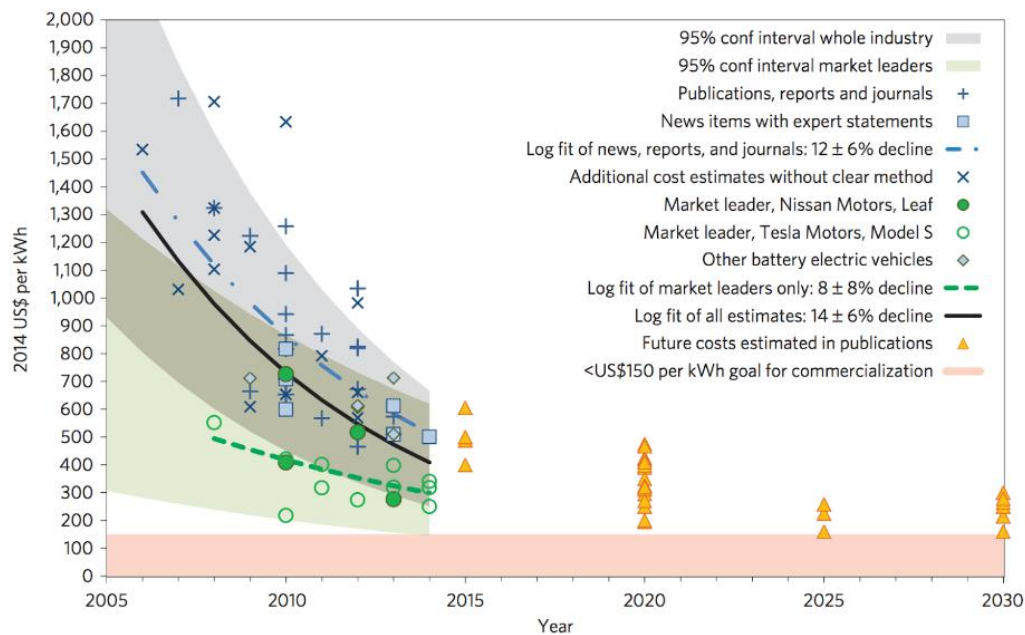
2.1.1 Li-ioon akud

Li-ioon akude tüüpilised omadused muudavad antud aku tänapäeval üheks olulisemaks komponendiks, mida kasutatakse salvestustehnoloogia teostamisel. Li-ioon akude kõrge energiatihedus ja erivõimsus võimaldab akusid rakendada paljudes valdkondades. Peamised rakendusvaldkonnad on kaasaskantavad seadmed (portaalsete seadmete turust 50 % on haaratud Li-ioon akude poolt [8]), elektri- ja hübriidsõidukid, energiasalvestid (k.a energiasalvestitega jaotusvõrgu alajaamad) ja taastuvenergeetika valdkond. [21]

Li-ioon akusid iseloomustab kõrge kasutegur (95-98 %), kõrge elemendi nimipinge (võimaldab väiksema jadaühenduses olevate elementide arvuga saavutada kõrgemat pinget), suur töötsüklite arv (1000-10000 [22]), madal sisetakistus (v.a võrreldes NiMH ja NiCd akudega) ja isetühjenemise määr. [8]

Antud akutehnoloogia üheks oluliseks puuduseks on elementide ohutuse tagamine. Li-ioon akude termilise stabiilsuse kadumine ja mehaaniline vigastus võib põhjustada akuelemendi plahvatust või süttimist. Seetõttu toimub pidev arendustöö töötamaks välja täiuslikumaid katoode, anoodi ja separaatori materjale. [23]

Teiseks puuduseks on Li-ioon akude hind võrreldes teiste akutehnoloogiatega. Samas on Li-ioon akude hind langustrendis, ning muutumas järjest konkurentsivõimelisemaks. Joonisel (Joonis 2.1) on kujutatud Li-ioon akupatarei hinna muutus ja tuleviku prognoos.



Joonis 2.1 Li-ioon akupatarei hinna muutus ja hinna kujunemise prognoos (y-teljel akupatarei hind \$/kWh) [24]

Li-ioon akude peamised arengusuunad [25] [26]:

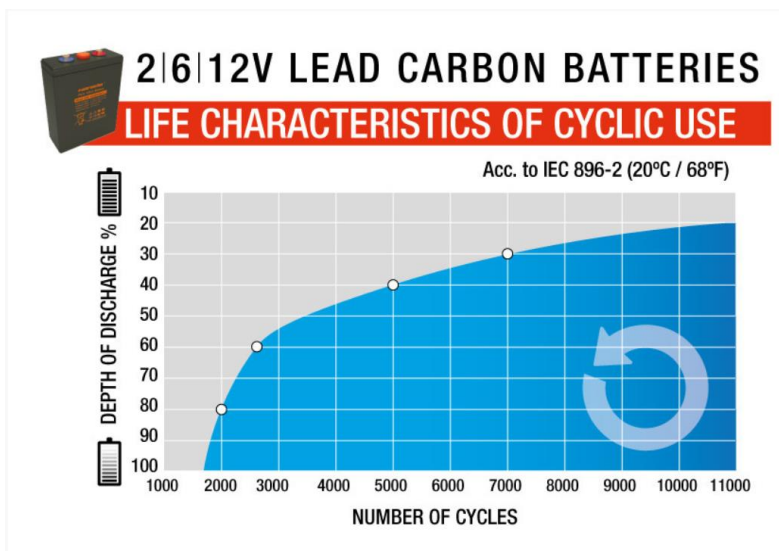
- elemendi pinge tõstmine, et suurendada energiatihedust,
- tootmiskulude vähendamine,
- alternatiivsete materjalide kasutamine, mis lihtsustab akupatarei käitu (võimaldab kasutada lihtsamaid aku jälgimissüsteeme ja kaitseahelaid),
- madala maksumusega materjalide kasutamine mittenõudlikes tingimustes,
- DOD ja akuelemendi eluea sõltuvuse vähendamine.

2.1.2 Muud akutüübid

Pliiakud on üks esimestest akutehnoloogiatest ning tänapäeval enim kasutusel olev akutüüp. Pliiaku eelisteks on suhteliselt lihtne ehitus ja madalad ehituskulud. Akude eluiga on üldjuhul vahemikus 250-1000 laadimis ja tühjendamistsükli, mis sõltub peamiselt aku tühjendamissügavusest. [8]

Pliiakusid iseloomustab madal energiatihedus massi- kui ruumalaühiku kohta. [27] Energiasalvestite koosseisu sobivad eelkõige modifitseeritud elektrodidega pliiakud (*advanced-lead carbon*). Negatiivsele elektrodile kantud süsiniku kiht parandab laadimise ja tühjendamise omandusi. Modifitseeritud aku korral väheneb sulfeerumise oht, ning seetõttu suurenenud

tühjendamistsükli sügavus. [27]. Kuna üks olulisemaid pliiakude riknemise põhjuseid on sulfeerumine, siis akude eluiga (laadimise- tühjenemistsüklite arv) oluliselt pikeneb [28]. Joonisel on kujutatud tootja Giant Power plii-süsinik akude laadmistsüklite arvu ja tühjendussügavuse (DOD) sõltuvus.



Joonis 2.2. Tootja Giant Power plii-süsinik akude laadmistsüklite arvu (x-telg) ja tühjendussügavuse (y-telg) (DOD) sõltuvus [29]

Nikkel-kaadium akud on kõrgema erivõimsuse ja -energia näitajaga kui pliiakud. Antud akutüübi peamiseks puudusteks on mälu efekt, kaadiumi mürgistuse oht. Akude eluiga vahemikus 1000-3500 laadimis-tühjendamistsüklit, sõltuvalt elektroodi ehitusest. [8]

NiCd akud on võimelised siluma lühiajalisi pingelohke ja võimaldavad kiiret lühiajalist tühjendamist, samas ei ole nad sobilikud koormustippude silumiseks [27] [30]. Energiasalvestite osana on antud akud kasutusel PV lahendustes, kus elektrolüüt on uputatud kujul (*flooded*) ning suudab kõrgematel temperatuuridel säilitada oma eluiga [31].

Nikkel-metallhüdriidakud on oluliseks alternatiiviks nikkel-kaadium akudele. Omavad 25-30 % kõrgemat energiatihedust kui NiCd, ning ei sisalda keskkonnale ohtlike ühendeid nagu kaadium, plii ja elavhõbe. [32] NiMH akud ei ole sobilikud pikaajaliseks energiasalvestuseks, sest antud akude isetühjenemise määr on väga kõrge [33]. Modifitseerimata NiMH isetühjenemise määr on 20 % esimese 24h jooksul peale laadimist, ning edasine 10 % kuus [34].

Väävel-naatrium aku (NAS) koosneb tahkest B-alumiiniumoksiidi elektroodist, veeldatud naatriumi anoodist ja veeldatud väävlü katoodist [35]. Tagamaks elektroodide vedelat olekut ning elektrolüüdi juhtivust, on aku tüüpiline töötemperatuur 300-350°C [8] [35]. Töötemperatuuri

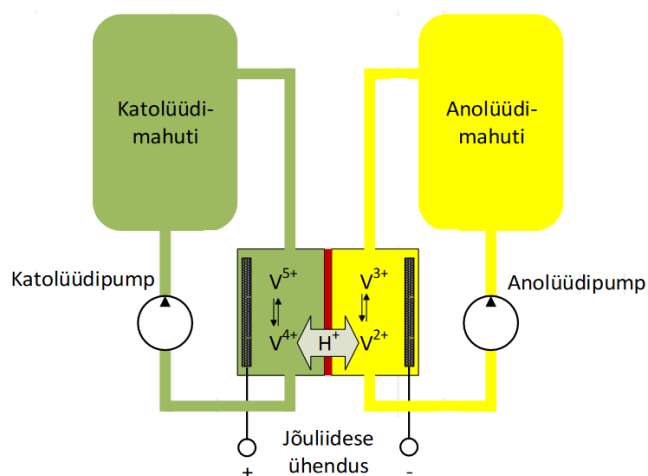
tagamiseks on paigutatud termiliselt isoleeritud kesta, kus akut jahutatakse või kuumutatakse välise regulaatori abil [8]. Seetõttu on üheks aku puuduseks vajadus tagada püsivat töötemperatuuri, mille tõttu aku kasutegur väheneb. Sellest hoolimata on NAS aku kasutegur vahemikus 86-89 %. [30]

NAS akud on võimelised tagama püsivat väljundvõimsust ja kõrget impulssvõimsust, seetõttu on tehnoloogia kasutusel ka elektrivõrkudes koormustippude silumiseks ja koormuste juhtimiseks. NAS aku on suhtelist keskkonnasõbralik, ohtliku materjalina käsitletakse ainult naatriumi ning 99 % akumassist on ümbertöödeldav. [35]

Läbivooluakud

Läbivooluaku (Joonis 2.3) koosneb järgnevatest peamisest komponendist [8]:

- akuelement, kus pööratava protsessi käigus muundatakse keemiline energia elektriliseks energiaks,
- mahutid elektrolüüdi elektrolüüdi hoiustamiseks,
- tsirkulatsioonipumbad,
- juhtimisahelad.



Joonis 2.3 Läbivooluaku ehitus [8]

Läbivooluakude üheks oluliseks eeliseks on energiamahutavuse ja võimsuse sõltumatu dimensioneeritavus. Vastavalt aku kasutusotstarbele saab suurendada elektrolüüdi mahutite suurust suures vahemikus (kWh-MWh). Akupatarei võimsus on määratud elementide suuruse ja arvuga. [36]

Akusüsteemi iseloomustab väga kiire reaktsiooniaeg u. 1ms, muutes olekut laadimis- ja tühjenemisrežiimi vahel. Lisaks puudub isetühjenemine, sest eraldi hoiustatud elektrolüüdid ei saa omavahel reageerida [30].

Kasutusel on peamiselt kolme põhitüüpi läbivooluakusid: Vanaadium-redoks, Polüsulfiid-broom ja Tsink-broom [8]. Elektrolüütide erinevad kombinatsioonid mõjutavad oluliselt läbivooluakude omadusi, ning tabelisse (Tabel 2.1) on koondatud erinevate elektrolüütidega akupatareide kasutegurid.

Tabel 2.1 Läbivooluakude elektrolüütide võrdlus [8]

Katolüüt-anolüüt	Ringtsükli kasutegur [%]
Broom-polüsulfiid	77
Vanaadium-vanaadium	73
Raud-kroom	66
Vanaadium-broom	65
Tsink-broom	80
Tsink-tseesium	65
Pliisoolalahus-hape	60

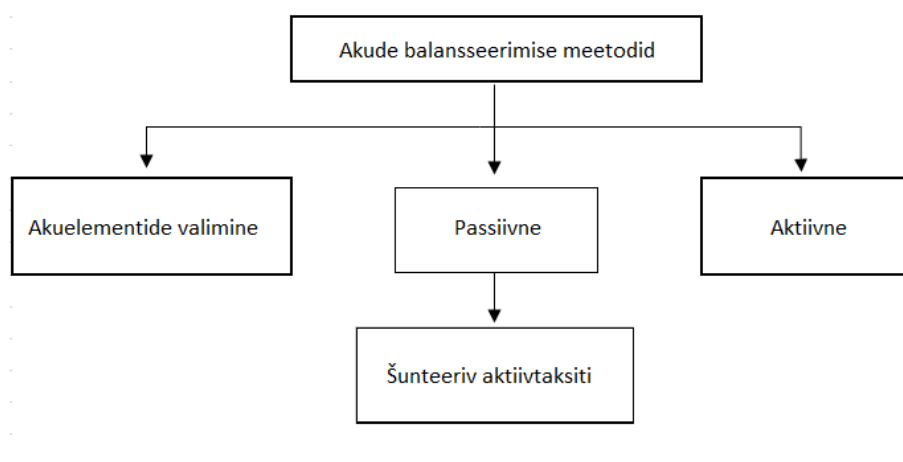
2.2. Akuhaldussüsteem

Akuhaldussüsteemi ehk BMS-i (*Battery Management System*) peamiseks eesmärgiks on hoida akupatarei elementide parameetrid etteantud piirides ja seetõttu maksimeerides akupatarei kasutatavat mahtuvust ja eluiga. BMS-i toimimine põhineb infol, mida erinevate sisendite kaudu kogutakse. Peamised sisendid, mille abil BMS arvutusi teostab, on elementide pingesisendid, vooluandurid ja temperatuuriandurid. [26] Seetõttu on BMS-i sisemiste algoritmide arvutustulemuste täpsuse sõltuvuses mõõtesisenditelt pärineva info täpsuse ja kvaliteediga. BMS-i poolt arvatud piirväärtuste, mille ulatuses on tagatud akuelementidele ohutu ja jätkusuutlik töö, tagamiseks on BMS sõltuv välistest kontrollmeetmetest. Selleks edastab BMS informatsiooni välistele süsteemi osadele, milleks võivad olla muundurid, laadijad. [26]

BMS-i üks olulisemaid funktsioone on takistada elementide ülelaadimist. Li-ion akude korral võib ülelaadimine tuua kaasa elementide enneaegset riknemist, halvimal juhul plahvatus või tulekahju. Laadimistsükli enneaegsel lõpetamisel üksikute elementide maksimaalse lubatud pingega saavutamisel jääb osa potentsiaalselt mahtuvusest kasutamata.

Ülelaadimise välistamiseks on vajalik akuelemente balansseerida. Joonisel (Joonis 2.4) on balansseerimise meetodite jaotus.

Akuelementide valimise meetodi korral valitakse võimalikult lähedaste elektrokeemiliste omadustega elemendid, ning koostatakse nendes akupatarei. Siiski antud meetod pole üldjuhul tõhus, kuna isetühjenemise määr akupatarei kasutusaja jooksul võib muutuda. [37]



Joonis 2.4 Akuelementide balansseerimise meetodid [37]

Passiivne meetod on kasutusel enamuses BMS-s. Selle eeliseks aktiivse balansseerimise ees on süsteemi lihtsus ja odavus. Meetod kasutab aktiivtakisti, mille abil kõrgema pingega elementide mahtuvus takistil tühjendatakse, ning üleliigne energia väljub protsessist soojusena. [38] Seetõttu ei ole passiivne BMS suuteline balansseerima suuri energiavooge.

Aktiivse balansseerimise korral laetakse madalama pingega elemente kasutades kõrgema pingega elementide energiat. Seeläbi on aktiivse balansseerimisega BMS suuteline juhtima kordades suuremaid energiavooge kui passiivne BMS. Aktiivse balansseerimise meetodit saab komponentide põhiselt jagada kolmeks [39]:

- kondensaatoritel põhinev,
- induktoritel põhinev,
- transformaatoritel põhinev.

Täiendavalt on võimalik tekitada aktiivse balansseerimise alajaotusi energia liikumise põhjal [37]. Aktiivne balansseerimine nõuab oluliselt keerukamat juhtahelat, ning samuti on süsteemi maksumus oluliselt kõrgem passiivse balansseerimisega võrreldes.

2.3. Vooluandur

BMS-i üheks oluliseks parameetriks on SOC (*State of charge*). Levinud meetodina SOC-i väärtuse arvutamiseks kasutatakse kulonite lugemise meetodit (kulonite lugemise meetod ei suuda iseseisvalt tagada piisavat täpsust, ning seetõttu kasutatakse täiendavaid meetodeid vea kompenseerimiseks), mille peamiseks eelduseks on vooluanduri piisav täpsus. [26]



Joonis 2.5. IVT-seeria Isabellenhütte vooluandur [40].

Energiasalvestite korral on levinud lahendus, kus alalisvoolu mõõtmine toimub Halli efektil põhineva anduri abil. Nii tagatakse ka kõrge akupatarei pinge juures galvaaniline eraldatus ja lai voolu mõõtmise vahemik. Halli efektil põhinev anduriga voolu mõõtmine on ümbritseva keskkonna häiringute suhtes vastuvõtlik, ning anduri paigaldamisel on oluline sellega arvestada.

Alternatiivse lahendusena on saadaval vooluandur tootjalt Isabellenhütte, mis kasutab alalisvoolušundil põhinevat mõõtemetodit (Joonis 2.5). Seade kasutades 16-bitilist analoog – digitaal muundurit, ning muudab šundil tekkinud pingelangu digitaalsignaalsiks. Andur suudab sõltuvalt mudelist mõõta kestvat voolutugevust +/-2500 A ja omab dielektrilist tugevust kuni 1000 VDC. Andurit iseloomustab kõrge mõõtetäpsus. Anduri projekteerimisel on arvestatud eelkõige elektrisõidukite valdkonna ootusi silmas pidades, kus on oluline kõrge elektriline tugevus kompaktse gabariidi juures. Vooluanduri kommunikatsiooni protokoll põhineb CAN 2.0a [40].

2.4. Jõumuundur

Ajalooliselt on pooljuhtmuundurite kasutuselevõtt on oluliselt parandanud elektrimasinate efektiivsust. Sagedusmuundurite kasutamine tagab elektrimasinate täpse ja kontrollitud liikumise ning võimaldab alalisvoolumasinate asemel kasutada lihtsamaid ja odavamaid

asünkroonmootoreid. Oluline eeldus energiasalvestiga mikrovõrkude tekkimiseks oli kahe-suunaliste AC/DC (*bidirectional inverter*) muundurite olemasolu. Nad võimaldab juhtida liikumist akupatareist mikrovõrku tühjenemistsükli kestel ja energiavoo liikumist mikrovõrgust akupatareisse laadimistsükli kestel. Elektrimasinate seisukohast võimaldab kahe-suunaline jõumuundur rekuperatiivpidurdust, mille abil pidurdusjõu muudetakse elektrienergiaks ja antakse tagasi võrku.

Tänapäevaseid kahe-suunalisi IGBT jõutransistoritel põhinevaid AC/DC jõumuundureid iseloomustab madal THD (*total harmonic distortion*) väärtus ($THD < 5\%$) ja võimsusteguri väärtuse korrigeerimine kuni 0,99 [41].

3. TTÜ mikrovõrgu prototüüp

Perioodil 2014-2015 valmis Harju Elekter Elektrotehnika ja TTÜ koostöös Li-ioon energiasalvestiga alajaama prototüüp. Mikrovõrgu olulisemad nimiandmed on koondatud tabelisse (Tabel 3.1) ja foto seadmetest on kujutatud joonisel (Joonis 3.1) TTÜ mikrovõrk koosneb neljast fiidrist, mis on põhimõtteskeem on kujutatud joonisel (Joonis 3.2).

Tabel 3.1 TTÜ mikrovõrgu prototüübi olulisemad nimiandmed [42]

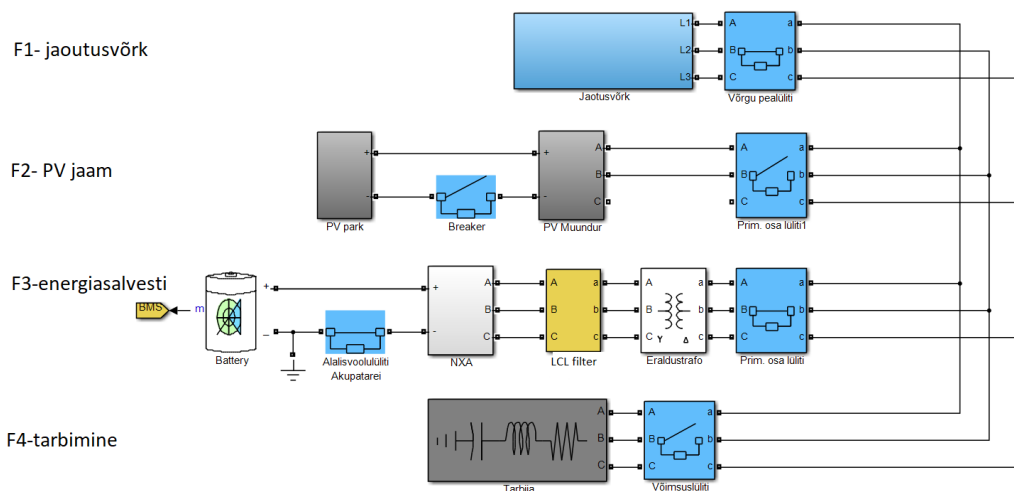
Nimivõimsus kW]	150
Vahelduvpingefiidrite arv, [tk]	4
AC fiidri (liini) nimipinge [V]	400
Maksimaalne vool alajaama AC fiidris [A]	217



Joonis 3.1. TTÜ mikrovõrgu prototüüp [42]

TTÜ mikrovõrgu prototüübi põhiülesanneteks on [42]:

- elektrienergia edastamine jaotusvõrgust kohalikele tarbijatele,
- lokaalse päikeseelektrijaama toodetud energia edastamine jaotusvõrku ning alajaamaga seotud tarbijatele,
- elektrienergia varustuskindluse tagamine kohalikele tarbijatele energiasalvesti abil.



Joonis 3.2 TTÜ mikrovõrgu põhimõtteskeem [42]

3.1. Energiasalvesti fiidri struktuur ja ülevaade

Järgnevates peatükkides kirjeldatakse mikro võrgu energiasalvesti fiidri koostisosasid.

3.1.1 Akupatarei

Olemasoleva energiasalvesti (Joonis 3.3) koosneb kahest järjestikku ühendatud akupatareist, mis omakorda koosnevad 144 (akupatarei 1) ja 72 (akupatarei 2) elemendist. Elementide nimipinge 3,2V nimimahtuvus on 40 Ah. Põhjalikumalt käsitletakse akuelementide parameetreid peatükis (4.1). Akupatarei elemendid on 9 kaupa eraldatud lahklülite ja kaitseautomaatide abil. Lahklülite ja kaitseautomaatide abikontaktid on ühendatud järjestikku, mille abil kontrollitakse jõuahela katkematus. [42]



Joonis 3.3 Energiasalvesti akukapp

3.1.2 BMS

Akupatareidel on eraldi BMS-id, mis omavahel toimivad ülem- ja alamsüsteemi (*master-slave*) süsteemis (akupatarei 1-*master*, akupatarei 2- *slave*). Akupatareid on kokku ühendatud CAN-i andmeside kaabliga. BMS-na on kasutusel tootja Orion BMS toodang (Joonis 3.4). Mõlema akupatarei BMS-d omavad sama funktsionaalsust, aga erineva arvu mõõte- ja balansseerimissisendeid, vastavavalt 180 ja 108 (maksimaalne hallatav akuelementide arv).



Joonis 3.4 Orion BMS-i tootesari Original [43]

Peale akupatarei laadimis- ja tühjendamisvoolude piiramisele ja muude parameetrite väärtuse jälgimisele juhib BMS veel akupaki ustele kinnitatud ventilaatoreid. [42] Vahetult BMS-i küljes asuvad ventilaatorid on pidevalt sisse lülitatud.

BMS edastab CAN andmesidesiini kaudu järgnevat informatsiooni [42]:

- akupaki nimimahtuvus,
- akupaki klemmipinge,
- akupaki tühijooksupinge,
- akupaki vool,
- akupaki laetustase,
- akupaki jääkressurss,
- akupaki temperatuur,
- suurim hetkel võimalik laadimisvool,
- suurim hetkel võimalik tühjenemisvool,
- läbitud tsüklite arv,
- akupaki sisetakistus,
- lülitite asend,
- kaitselüliti rakendumise signaal,
- BMS olek,
- balansseerimise staatus.

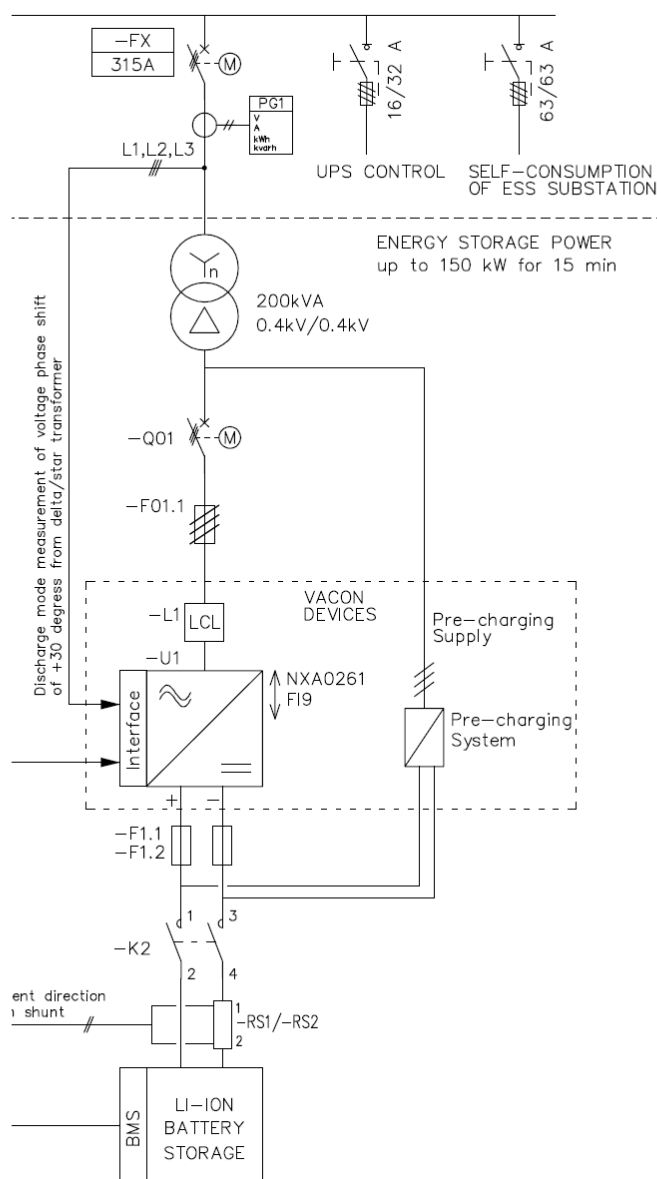
3.1.3 Muundur ja abiahelad

Energiasalvestis on kasutab kahesuunaline AC/DC muundurit. Muunduri ja toetavate seadmete ühendusskeem on kujutatud joonisel (Joonis 3.5). Kasutatakse tootja Vacon NXA õhkjahutusega muundurit. Seadme olulisemad nimiaandmed on koondatud tabelisse (Tabel 3.2) Antud parameetritega muundur oli algselt ette nähtud töötama koos akupatareiga, mis koosneb 216-st 90 Ah elemendist (mahtuvus 60 kWh), seetõttu on muundur olemasoleva akupatarei jaoks üledimensioneeritud.

Muundur töötab koos LCL filtriga, mille eesmärk on vähendada muunduri poolt genereeritud harmoonikute mõju vahelduvvoolu võrgule. Filtrite valikut on kirjeldatud muunduri kasutusjuhendis, ning valitakse lähtudes muunduti nimiaandmetest.

Tabel 3.2 Vacon NXA muuduri ninimandemed [41]

Muunduri nimivõimsus (alalispinge poolel)	176 kW
Maksimaalne alalispinge muunduris	797 V
Muunduri alalisvoolu nimiväärtus	308 V
Muunduri vahelduvvoolu nimiväärtus	261 A
EMC standarditele vastavus	EN 61800-3



Joonis 3.5 Energiasalvesti fiidri elektriline ühejooneskeem [42]

AFE (*Active Front End*) tüüpi kahesuunaline muundur vajab välist kondensaatorite eellaadimise ahelat (joonisel (Joonis 3.5) kujutatud *pre-charging system*). Eellaadimise käigus laetakse muunduri kondensaatorid pigenivooni, mis vastab ühendatava võrgu pingeniivoole. [41]

Muunduri poolt tekitavate harmoonikute summutamiseks ja galvaanilise eralduse tagamiseks kasutatakse kolmnurk-täht 200 kVA 0,4 kV/0,4 kV eraldustrafot.

3.1.4 Mõõteahelad

Energiasalvesti ahelas kasutatakse Halli efektil põhinevaid vooluandureid (joonisel (Joonis 3.5) kujutatud seadmed RS1 ja RS2). Akupatareis asuvad andurid on ühendatud BMS-ga otse üle CAN-i liini kaudu. Vooluandurite toide on samuti BMS-st. Oluline on tagada, et vooluandurite toide ei pärineks samast allikast, millega on seotud müra tekitav seade (näiteks sagedusmuundur). Seega jõuab info RTU-sse BMS-i üle CAN-i liini. Vooluandurid RS1 ja RS2 saadavad info otse RTU-le. Vooluandurite mõõtepiirkonnad on valitud erinevalt, et oleks tagatud mõõtetäpsus laiemas vahemikus. RS1 mõõtevahemik on +/- 300 A, ning RS2 mõõtevahemik +/-100 A. [42]



Joonis 3.6 TTÜ mikrovõrgu prototüübis kasutatav Halli efektil põhinev vooluandur DHR-C420 [44]

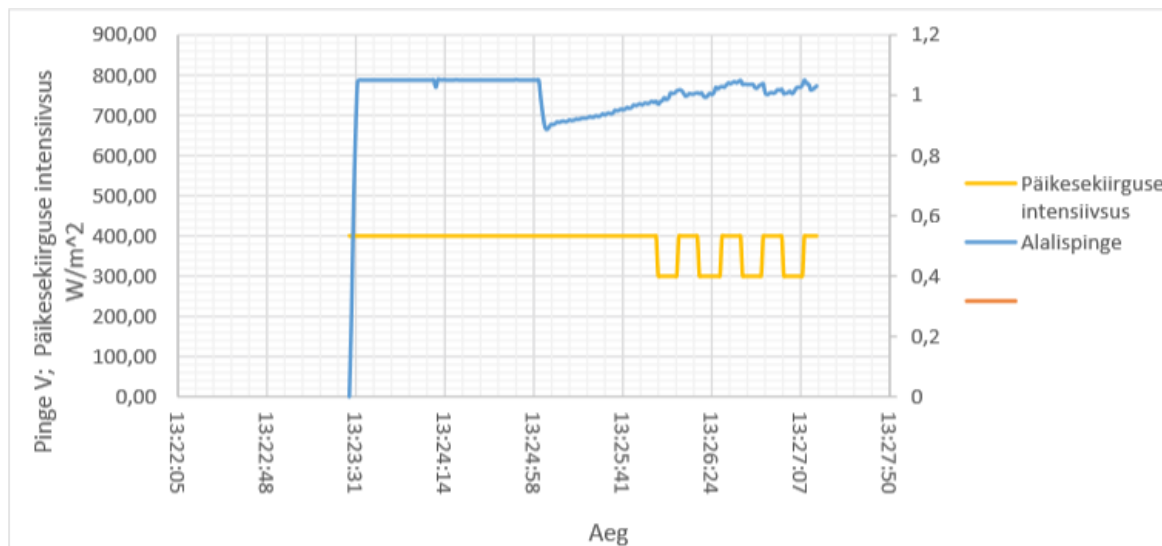
Energiasalvesti fiidris on täiendavaid abiahelaid, mille ülesandeks on tagada energiavoogude juhtimine ja süsteemi turvalisus. Süsteem jälgib isolatsiooni korrasolekut nii vahelduv- kui alaispinge poolel (DC pingesiini isolatsioonikontrollirelee saadab signaali ainult RTU-sse, see on seadistatud ainult signaalile, ning rakendumist ei toimu), ning vastava signaali korral rakenduvad kaitserелеed peatades akupatarei energiavoo. Süsteemis on kasutusel täiendavad turvareleed, mis blokeerivad vea esinemisel käivitamisahela ja vabastavad blokeeringu peale vea kviteerimist. [42]

3.2. Päikselektrijaama fiidri struktuur ja ülevaade

Mikrovõrgu päikselektrijaama fiider koosneb programmeeritavast toiteplokiist Magna Power, päikseelektrijaama kolmefaasilisest inverterist Vacon 8000 Solar. Magna Power-i

programmeeritav toiteplokk emuleerib PV elementide toodangut vastavalt kasutaja sisestatud parameetritele, genereerides vastava voolu ja pinge profiili [45].

Joonisel (Joonis 3.7) on näha katset, kus emuleerimistarkvarasse sisestatud parameetrite alusel genereeritakse sobiv alalisvoolu väljundpinge. Järsk muutus toitebloki alalispinge väljundis tekib hetkel, mil invertööri koormuslüliti suletakse. [15]



Joonis 3.7 PV elementide emuleerimine Magna Poweri abil [15]

Vacon 8000 Solar NXV 0010 olulisemad nimiandmed on koodatud tabelisse (Tabel 2.1).

Tabel 3.3 Vacon 8000 Solar NXV 0010 nimiandmed [46]

Nimivõimsus [kW]	10
Nimiväljundvool AC [A]	14,4
PV paneelide võimsus [kW]	12
Nimisisendvool DC [A]	29
Keskmine efektiivsus (<i>Euro efficiency</i>) [%]	93,1
Väljundpinge 3 faasi AC [V]	400
Maksimaalne sisendpinge DC [V]	900
MPP pingevahemik [V]	340-800

3.3. Tarbijafiidri ja jaotusvõrgu fiidri struktuur ja ülevaade

3.3.1 Jaotusvõrgu fiider

Mikrovõrk on ühendatud jaotusvõrguga kolmefaasilise jõupistikuga abil. Pistiku läbilaskevõime (63 A) on mikrovõrgust jaotusvõrku ja vastupidi liikuva võimsuse pudelikaelaks.

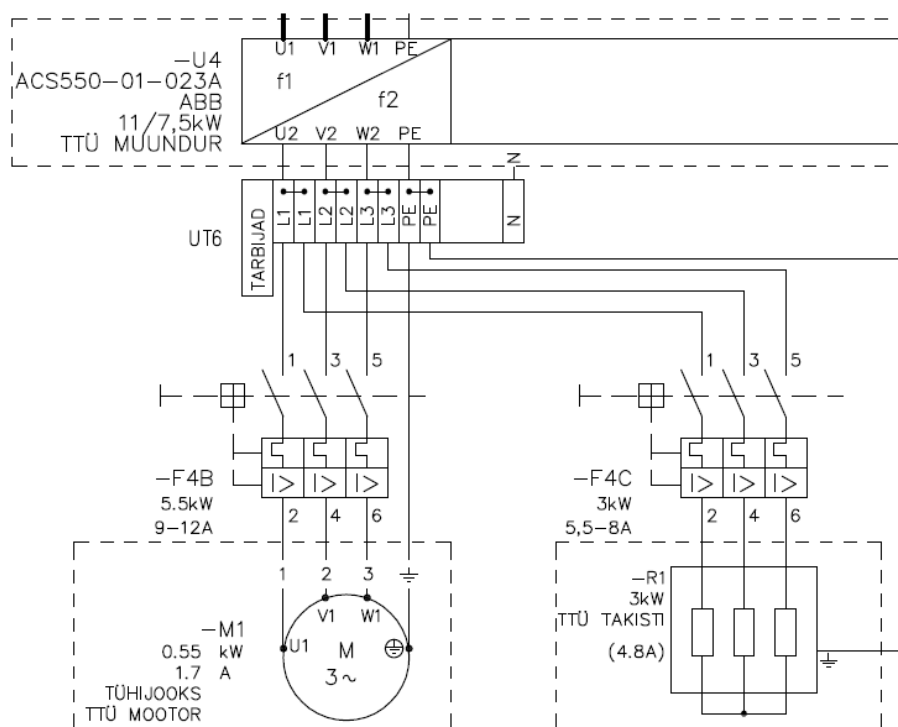
Mikrovõrgu on võimeline toimima saartalitudes. Selleks et mikrovõrk saaks luua ühenduse jaotusvõrguga ning jätkata tööd võrgutalituse režiimis on vajalik eelnev käsitsi sünkroniseerimine sünkronoskoobi abil. Vastav seade võimaldab ka automaatset sünkroniseerimist RTU kaudu, aga see pole antud juhul seadistatud. Sünkroniseerimiseks on vajalik jälgida sünkronoskoobi tablood, ning hetkel, mil faasinihke nurk elektrivõrgu ja mikrovõrgu vahel on võrdne nulliga, on vajalik lülitada sisse S1. Joonisel (Joonis 3.8) on kujutatud mikrovõrgus kasutatav sünkroskoobi esipaneel. [42]



Joonis 3.8 SynchroMax PID sünkroskoop [47]

3.3.2 Tarbijafiider

Mikrovõrgu juhitava või osalise juhitava koormuse simuleerimiseks on mikrovõrku integreeritud sagedusmuundur koos 3-faasilise asünkroonmootoriga võimsusega 0,55 kW (mootori koormusena on kasutatud ventilaatorit). Täiendavaks koormuseks on võimalik lisada koormustakisti võimsusega 3 kW. Sagedusmuundurina on kasutusel ABB 3-faasiline universaalne seade, mille lubatav maksimaalne võimsus sõltuvalt koormuse iseloomust on vahemikus 7,5-11kW [48]. Sagedusmuunduri juhtimine toimub kilbi „Mikrovõrk“ uksele oleva paneeli kaudu. Joonisel (Joonis 3.9) on toodud tarbijafiidrisse kuuluvate seadmete ühendusskeem.



Joonis 3.9 TTÜ mikrovõrgu tarbijafiidri elektriline ühejooneskeem [42]

Mikrovõrgu täiendaval arendamisel oleks mõislik kasutada koormusena suurema võimsusega seadmeid. Jättes sagedusmuunduri samaks, oleks võimalik antud süsteemi rakendada minimaalselt 7,5 kW aktiivkoormust. Antud konfiguratsiooni korral moodustab koormus vaid tühise osa mikrovõrgu võimsusest. Võimaliku koormusena saaks kasutada elektriauto laadijat, mis on ühendatud otse tarbijafiidri väljundisse.

3.4. Mikrovõrgu juhtimissüsteem

Mikrovõrgu erinevate energeetiliste komponentide ja süsteemide tööd juhib programmeeritav loogikakontroller PLC. Antud kontrollerit alajaama kontekstis saab nimetada RTU-ks. RTU teostamiseks on kasutatud firma Broderseni kontrollerit RTU32, ning seadme tähtsamad nimiaandmed on toodud tabelis (Tabel 3.4).

Kasutatav RTU ei ole suuteline lugema andmeid otse CAN siinilt. Seetõttu on vajalik kasutada Modbus-CAN lüüsi, kus CAN andmeside kirjutatud Modbus registritesse, mida RTU on võimeline lugema. [42]

Mikrovõrgu olekuparameetrite kuvamiseks ja seadete muutmiseks on RTU ühendatud puutetundliku paneeliga, milleks kasutatakse SIMATIC HMI TP700 COMFORT seadet. Andmeside RTU-ga toimub läbi Modbus TCP/IP protokolliga Ethernet'i kaabli kaudu.

Tabel 3.4 Brodersen RTU32 tähtsamad nimiaandmed [49]

Kontrolleri tüüp	32-bit, 500 MHz, CPU
Operatsioonisüsteem	Windows Embedded CE 6
Andmeside	Ethernet, TCP/IP, USB
PLC programmeerimise standard	IEC-61131-3



Joonis 3.10 Brodersen RTU32 [49]

Mikrovõrgu olekuparameetrite kuvamiseks ja seadete muutmiseks on RTU ühendatud puutetundliku paneeliga, milleks kasutatakse SIMATIC HMI TP700 COMFORT seadet. Andmeside RTU-ga toimub läbi Modbus TCP/IP protokolliga Ethernet'i kaabli kaudu.

Vacon NXA muunduri ja RTU vaheline andmeside toimub Modbus TCP/IP protokolliga Ethernet'i kaabli kaudu. NXA voolu mõõtvate andurite info edastatakse vahetult RTU-le. BMS-i ja RTU vaheline andmeside toimub Modbus TCP/IP protokolliga Ethernet'i kaabli kaudu.

4. TTÜ mikrovõrgu Li-ioon akudega energiasalvesti

Antud peatükis keskendutakse akupatarei 1 elementide uurimisele. Elementide põhised katsed on teostatud ainult akupatarei 1 elementidega, kuna akupatarei 2 seadmed ei vajanud spetsiaalset hooldust. Töös analüüsitud laadimis- ja tühjendamistsüklid on teostatud akupatarei 1 ja akupatarei 2 järjestikuses ühenduses (vastavalt normaalskeemile).

4.1. Akuelementide parameetrid

TTÜ-s laboratooriumis asuv akupatarei on koostatud 216 elemendist. Akupatarei on jaotatud kaheks osaks 144 elementi ja 72 element.

Elementidena on kasutusel tootja Winston Battery /Power liitium-ütrium aku WB-LYP40AHA LiFeYPO₄ 3.2V/40Ah. Elemendi parameetrid on toodud tabelis (Tabel 4.1) ja foto elemendist joonisel (Joonis 4.2).

Tabel 4.1 Akuelemendi tehnilised andmed [50]

Mudeli nimi	WB-LYP40AHA
Nimipinge [V]	3,2
Nimimahutavus [Ah]	40
Tööpinge [V]	2,8-4
Min. pinge [V]	2,5
Max. pinge [V]	4
Optimaalne vool tühjendusel [A]	<20
Max. vool tühjendamisel [A]	<800
Töötemperatuur tühjendusel [°C]	40-80
Mõõtmed [mm]	183x115x47
Kaal [kg]	1,8



Joonis 4.2 Akuelement 3.2V/40Ah [50]

4.2. Li-ion Akuelementide tehniline seisund

TTÜ laboris olev 144 elemendiga akupatarei oli pikemat aega seisnud ooterežiimis, ning isetühjenemise ja BMS-i liigtoimingute tõttu olid akuelementide parameetrite väärtused saavutanud kriitilise piiri.

Akupatarei tehnilised parameetrid enne lahti monteerimist on toodud tabelis (Tabel 4.2). Akupatarei pinge oli 24 % võrra madalam kui nimipinge. Elementide vaheline suurim pingete erinevus oli 2,59 V. Elementide osakaalust 81 % pinge oli alla 2,8 V (min. tööpinge) ja 61 % oli alla 2,5 V (min. lubatud pinge, alla selle võivad elemendid rikkuda).Visuaalsel vaatlusel olid paljude akuelementide korpus deformeerunud (paisunud). Seetõttu oli akupatarei töökorda seadmiseks vajalik akuelementide lahti monteerimine ja eraldiseisev laadimine.

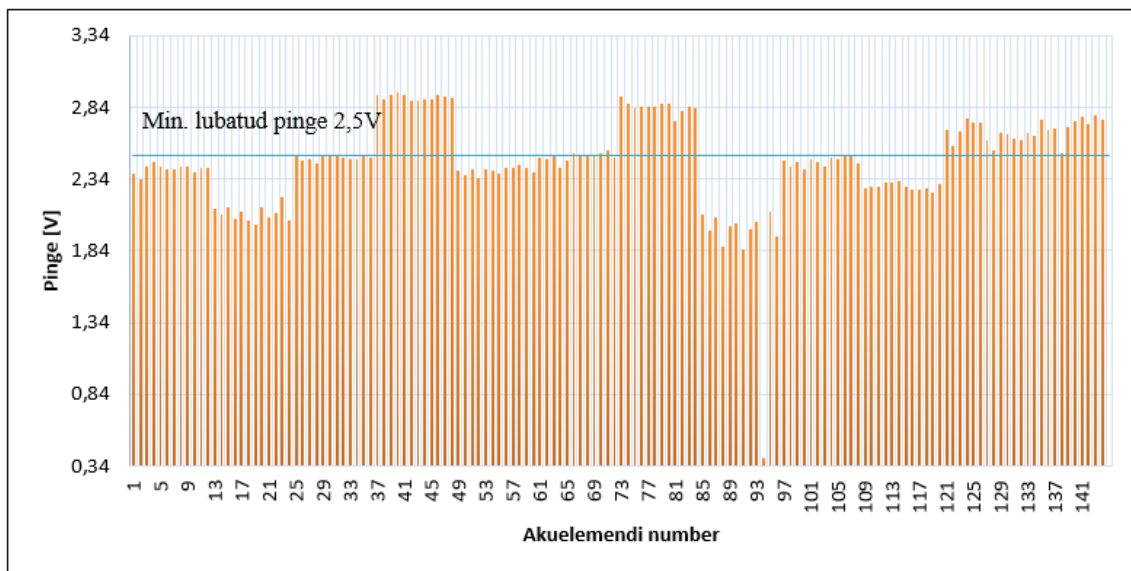
Tabel 4.2 Akupatarei seisukord enne lahti monteerimist

Max. elemendi pinge [V]	2,93
Keskmine elemendi pinge [V]	2,47
Min. elemendi pinge [V]	0,34
Maksimaalne pingete erinevus V]	2,59
Akupatarei nimipinge [V]	460,80
Akupatarei pinge [V]	351,21

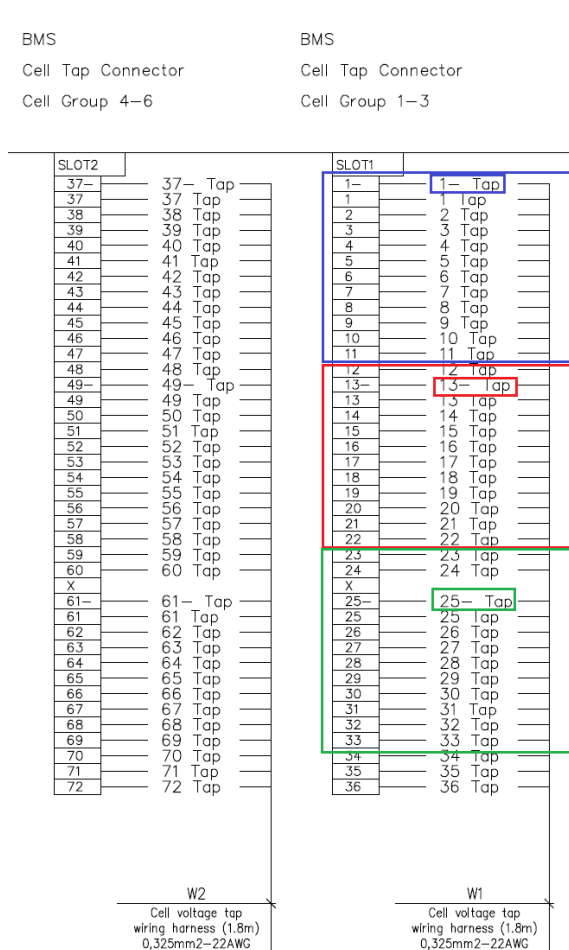
Akuelementide pinged on koondatud joonisele (Joonis 4.3). Jooniselt on näha, akuelemendid moodustuvad 12 kaupa sarnasete pingeniivoodega grupid. Samade gruppidega on elemendid ühendatud ka BMS-ga, kus 12 elemendi peale ühine negatiivne sisend (Joonis 4.4) .

Akuelementide konkreetsed pingeniivod kujunesid välja umbes 1 aasta jooksul alates viimasest laadimisest. Pingevahemikus 2,8V-2,5V on antud elemendi mahtuvus kõigest 0,98Ah. Nii võib suhteliselt väikestel erinevustel BMS-i komponentide tootmisprotsessis, pingete mõõtmise ahelas, ühenduste üleminekutakistusel olla pikema aja jooksul suurem mõju elemendi pingetele. Nii kujunevad ühe grupi BMS-i mõõtesisendite ulatuses välja sarnase pingega elemendid. Põhjust on arvata, et suurima mõjuga tegur antud ahelas on tõenäoliselt jõuelektroonika komponentide tootmishälbed, aga kuna konkreetse tootja BMS-i elektriskeem ei ole avalik ega kättesaadav, siis täpne põhjus on teadmata.

Erinevused gruppide siseselt on põhjustatud akuelementide tootmishälvetest ja laadimis ja tühjendus kõverate muutumisest eksploatatsiooni käigus.



Joonis 4.3 Tühjenedud akupatarei elementide pinged enne nende uuesti laadimist



Joonis 4.4 Elementide ühenduskeem BMS-ga

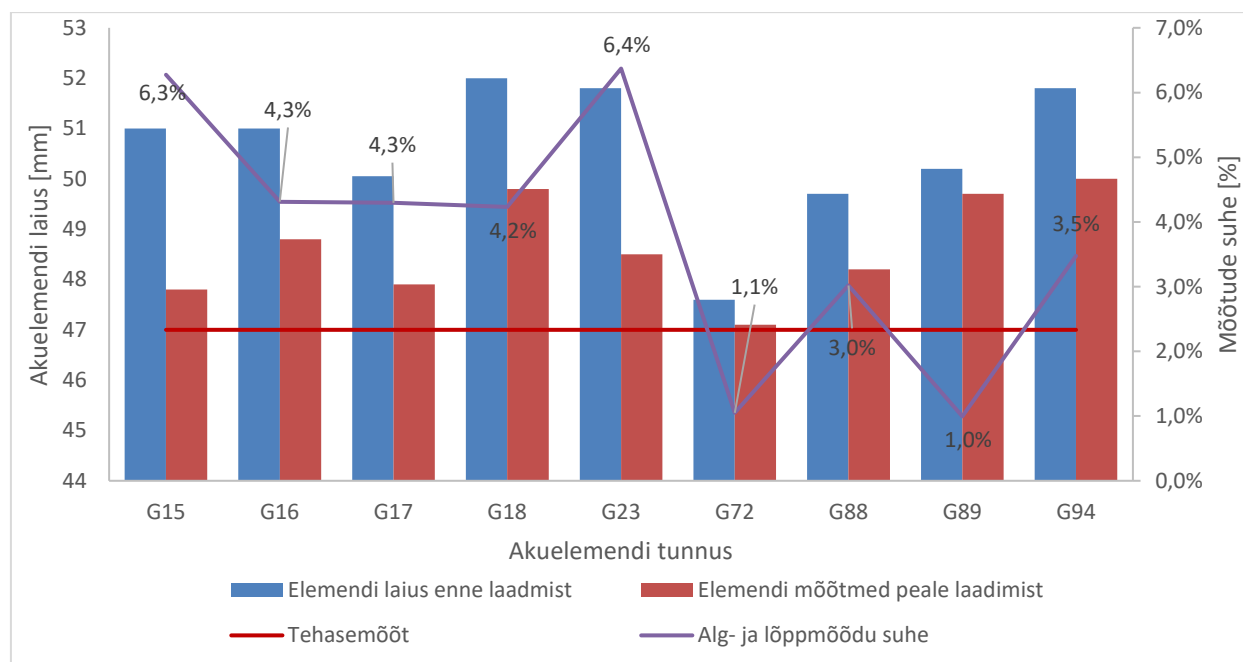
4.2.1 Akuelementide deformatsioon

Akuelementide vananemine, ülelaadimine, tühjalt olekus hoiustamine toob kaasa erinevaid protsesse nende komponentides. Elektrolüüdi lagunemine, separaatorite korrodeerumine ja purunemine võib põhjustada muutusi keemiliste elementide koostises, kus elementide ruumala suureneb. [51] See võib põhjustada akuelementide deformatsiooni ehk paisumist.

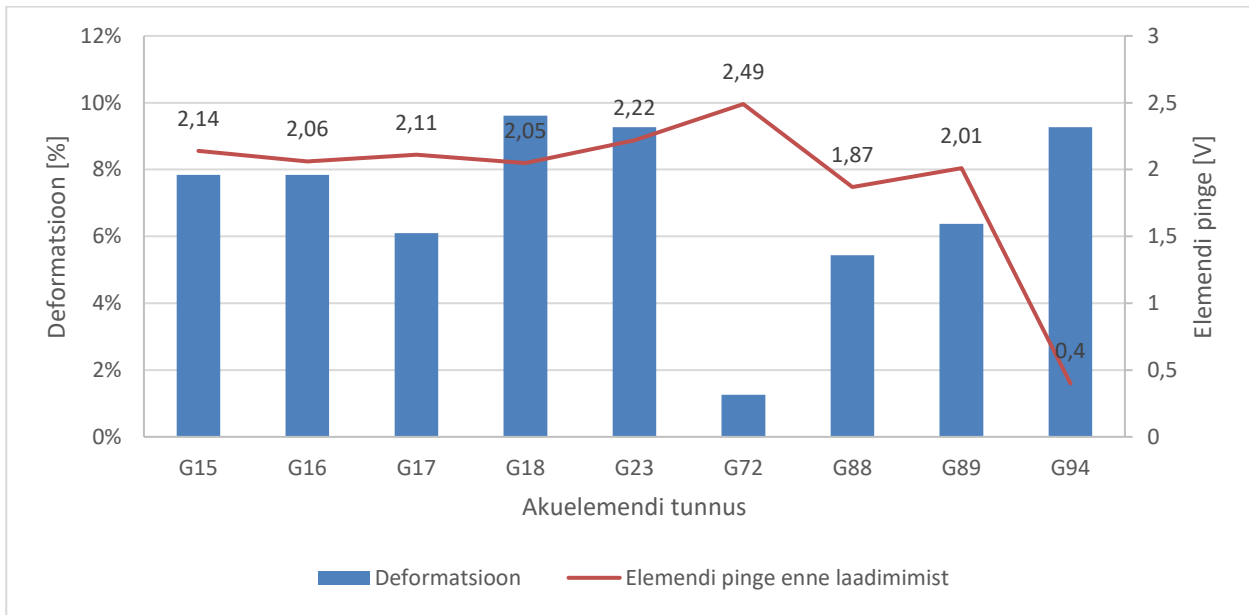
Akupatareid lahti monteerides oli näha, akuelemendid on pressitud vastu kinnituskronsteine. Selle põhjuseks oli akuelementide deformatsioon, kus akuelementide korpus on paisunud ja seetõttu akuriulis olev vaba ruum täitunud.

Joonisel (Joonis 4.5) on kujutatud 9 akuelemendi mõõtmed enne ja pärast laadimist. On näha, et valimi hulgas on elementide mõõtmed vähenenud peale laadimist kuni 6,4 % (keskmiselt 1,9mm). Enim on vähenenud läbimõõt just suurema deformatsiooniga elementidel. Elemendi keskmine deformatsiooni võrreldes tehase mõõduga oli 3,35 mm (7 %). Seetõttu on mõistlik akupatarei konstruktsiooni projekteerides arvestada teatava paisumisruumiga.

Jooniselt (Joonis 4.6) ei väljendu selget seost elemendi pinge ja deformatsiooni ulatuse vahel. Lineaarne korrelatsioonitegur pinge ja deformatsiooni vahel on -0,44. Selle põhjal saab järeldada, et pinge ja deformatsiooni vahel on teatav seaduspära, aga arvestavat mõju avaldab siinkohal elementide tootmisprotsessist tulenevad eripärad, mis eksploatatsiooni käigus on süvenenud.



Joonis 4.5 Akuelementide paksus enne ja pärast laadimist



Joonis 4.6 Akuelemendi deformatsiooni ja elemendi pinge vaheline sõltuvus

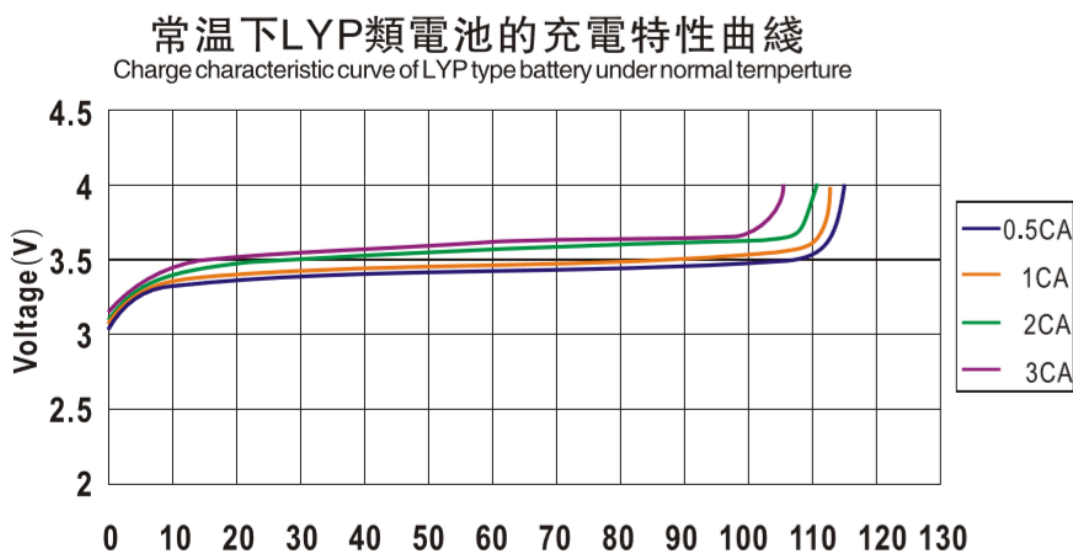
4.3. Akuelemendi laadimine

Akupatarei töökorda seadmiseks ei ole tingimata vajalik akuelemente täis laadida, vaid tagada akuelementide sobilik pinge muunduri jaoks ning tagada akuelementide omavaheline võimalikult väike pingete ja mahtuvuste erinevus. Konkreetse akupatarei passiivne BMS-i suudab akuelemente balansseerida maksimaalselt 200 mA, seetõttu suure pinge ja mahtuvuste erinevuse korral võtaks balansseerimine oluliselt aega.

Levinud li-ion akude laadimismeetod on kaheosaline laadimine CC-CV (*constant current-constant voltage*). Esimeses etapis laetakse akut konstantse vooluga kuni eelnevalt kindlaks määratud klemmipinge on saavutatud. Edasi toimub laadimine konstantse pingega, kuni vool on vähenenud kindlaks määratud piirini ning laadimine peatatakse. Antud laadimismeetodit on hea rakendada tänu oma lihtsusele. [52]

Akuelementide laetustaseme eesmärgiks on valitud 55 % nimimahtuvusest. Antud vahemikus pole ohtu akusid üle laadida. Sellest tulenevalt saab kasutada akude laadimiseks meetodit, kus laadimine toimub ainult konstantse vooluga, kuni eelnevalt katseliselt kindlaks määratud pinge on saavutatud. Nii vähendatakse akuelementide laadimiseks kuluvat aega tänu vähenenud energiahulgale, mis on vaja akudesse salvesta, ning samuti saab kasutada lihtsustatud laadimismeetodit.

Akutootja poolt avaldatud laadimiskarakteristikult polnud võimalik piisavalt täpselt määrata pinge piirväärtus (Joonis 4.7), millega oleks soovitud mahutavus tagatud. Arvestades olemasolevate seadmetega tehnilisi parameetreid ja laadimiskeemi, toimub laadimine oluliselt madalama laadimisvoolu juures kui tootja poolses dokumentatsioonis. Samuti polnud teada kui palju kasutatud akuelemendi omadused on muutunud kasutusaja jooksul. Seega oli akuelementide laadimiseks esmalt vajalik määrata akude katseline laadimiskarakteristik.

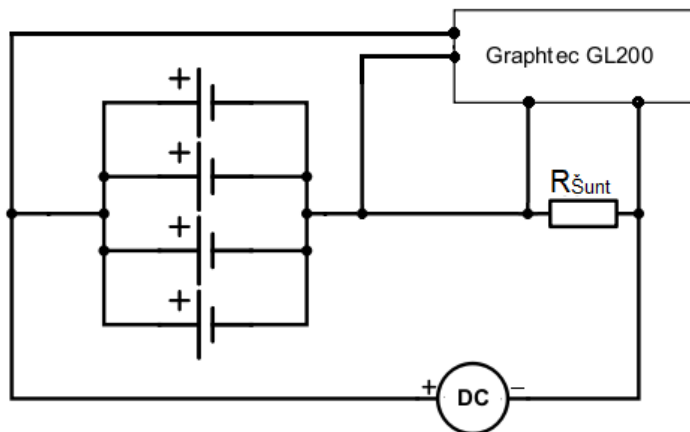


Joonis 4.7 Tootja poolne akuelemendi laadimiskarakteristik [53]

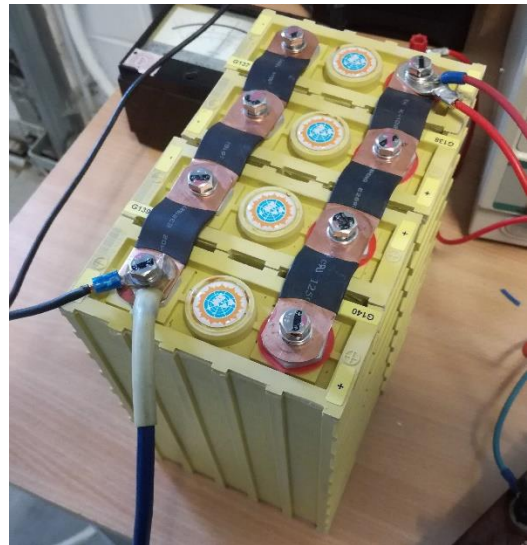
Akuelementi laetakse 4 kaupa, kus 4 elementi on rööpühenduses. Nii tagatakse soovitud pinge (mahutavus) kõigil elementidel samaaegselt, mida järjestikus ühenduses olevate elementide korral ilma BMS-ta ei oleks võimalik saavutada. Rööpühenduses olevate elementide arvu piirab laadimiseks kasutada oleva toiteallika võimsus soovitud laadimisvoolu korral.

Arvestades olemasolevate seadmete tehnilisi parameetreid ja laadimiskeemi, on planeeritud akude laadimisvool 4,5-5 A (0,125 C A). Väiksema laadimisvoolu korral toimub laadimisprotsess aeglasemalt ja seda on praktiliselt lihtsam teostada. Arvestades akupatarei vanust ja elementide pingeid, siis oli täiendava ohutuse tagamiseks mõistlik laadida oluliselt madalama vooluga, kui optimaalne laadimisvool 20 A (0,5C). Laadimiskeem on toodud joonisel (Joonis 4.8) ja joonisel (Joonis 4.9) kujutatud 4 reaalselt elementi rööpühenduses.

Parameetrite monitoorimiseks ja katsetulemuste logimiseks kasutati Graphtec GL200 loggerit. Tabelis (Tabel 4.3) on koondatud seadme olulisemad nimiandmed.



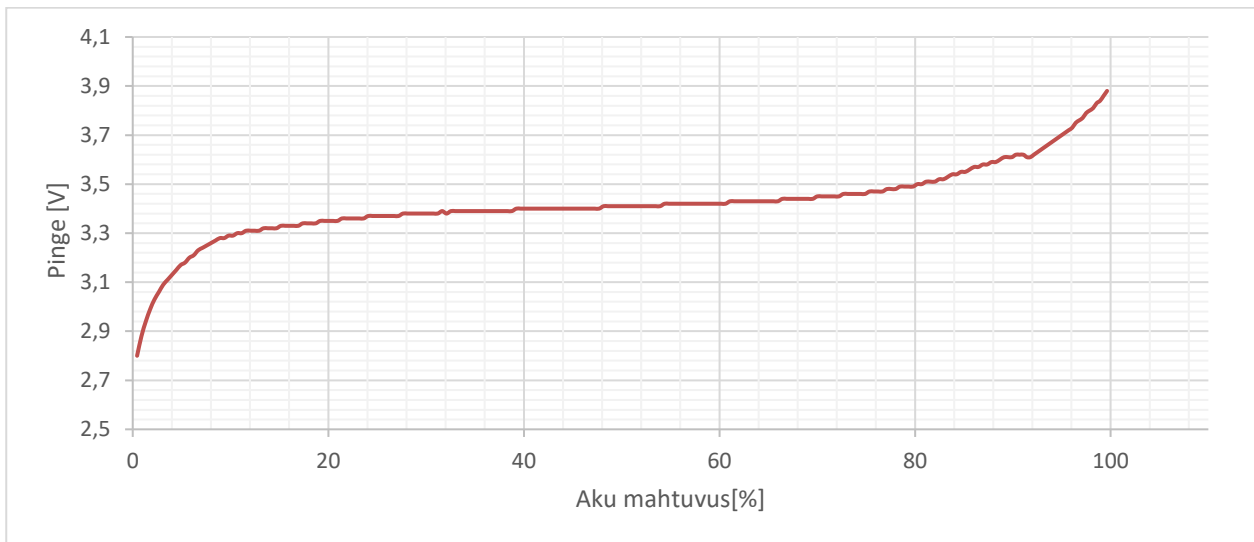
Joonis 4.8 Akuelementide laadimiskeem



Joonis 4.9 4 elementi rööpühenduses

Tabel 4.3. Graphtec GL200 olulisemad nimiaandmed [54]

Analoogsisendite arv	10
Mõõtetäpsus	$\pm 0.08\%$
Mõõtmiste salvestussageduse vahemik	100 ms-1h



Joonis 4.10 Katseline akuelemendi laadimiskarakteristik 0,125 C (5 A) laadimisvoolu korral

Laboratooriumis tehtud katsetulemustest selgub (Joonis 4.10), et vajaliku mahtuvuse tagamiseks oleks vajalik saavutada pinge laadimise ajal vahemikus 3,41 V-3,42 V. Akuelementide laadimine on väga aeganõudev protsess ja kuna liitiumioon akuelementidel esineb isetühjenemine (alla 1 %

kuus [53]) on soovitatav elementide laadimine teha võimalikult vahetult enne akukupi kasutuselevõttu [42].

Li-ioon akude laadijana saab kasutada seadmeid, millel on automaatne voolu piiramine. Antud akupaki laadimiseks kasutati kahte toiteallikat (Joonis 4.11):

- Magna Power Electronics programmeeritav alalispinge toiteplokk TSD800-18/380+HS+LXI. Seade võimaldab kaugjuhtimist ja päikesepaneelide emuleerimist;
- Toiteplokk HQ Power PS 3020, voolu automaatse piiramise võimekus.

Seadmete tähtsamad nimiaandmed on koondatud tabelisse (Tabel 4.4)

Tabel 4.4 Toiteallikate tähtsamad nimiaandmed [45]

	Magna Power TSD800-18/380+HS+LXI	HQ Power PS 3020
Sisendpinge	380 VAC	230 VAC
Maksimaalne väljundpinge	800 VDC	30 VDC
Maksimaalne väljundvool	18 A	20 A



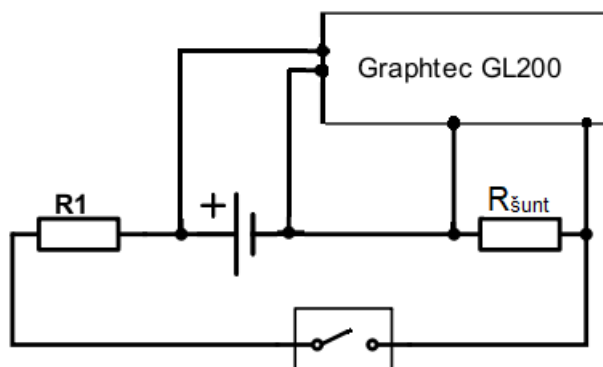
Joonis 4.11 Akuelementide laadimiseks kasutatud toiteallikad (vasakul Magna Power, paremal HQ Power PS 3020)

4.4. Akuelementide tühjendamine

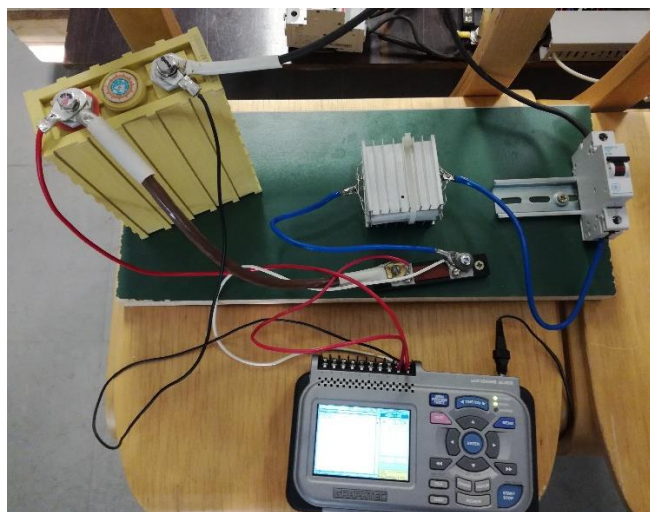
Üksikut elementi on võimalik laadida ja tühjendada kogu oma tööpinge ulatuses (4 V-2,8 V). Seetõttu on võimalik määrata energiasalvesti teoreetiline maksimaalne mahtuvus (muid tühjendamisega ja laadimisega kaasnevaid kadusid arvestamata), mida energiasalvesti akude seisukohast on võimeline välja andma. Reaalsel akupatariil on alati elementide vahel tootmisest ja eksploatatsioonist tingitud erinevused, mille tõttu ei saavuta järjestiku ühendatud elemendid

üheaegselt samu väärtusi ja osa maksimaalsest mahtuvusest jääb kasutamata. Seega on akupatarei terviklik mahtuvus määratud nõrgima akuelemendi mahtuvuse järgi.

Hindamaks akuelementide seisukorda teostati tühjendamiskatseid. Akuelemendi tühjendamiseks kasutatud skeem on joonisel (Joonis 4.12) ja foto katsestendist joonisel (Joonis 4.13) Tühjendamiskatses ühendati akuelement koormustakistiga (R_1 -takistusega $0,25 \Omega$), mis tagas $0,5C$ A lähedase tühjendusvoolu.



Joonis 4.12 Akuelemendi tühjendamise katseseadme skeem



Joonis 4.13 Akuelemendi tühjendamise katseseade

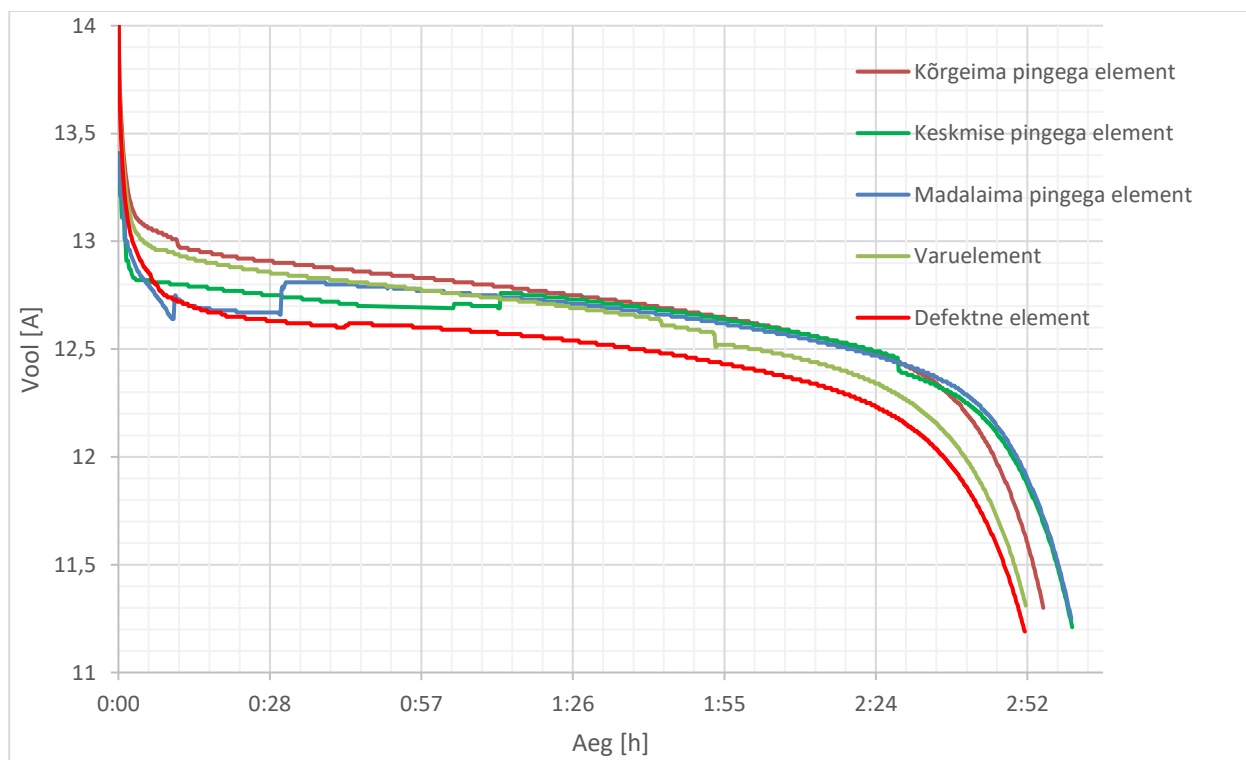
Tühjendamiskatse jaoks valiti akud erinevate BMS-i gruppide hulgast (eelnevalt vaadeldud joonisel (Joonis 4.3)), et eelkõige hinnata BMS-i mõju erinevate mõõtesisendite ulatuses akude seisukorrale. Tabelis (Tabel 4.5) on koondatud vastavad katsetulemused. Olulist erinevust akuelementide puhul ei ole, ning mahtuvused erinevad omavahel maksimaalselt 2 Ah võrra (5 %). Testitud elementide korral äratuntavat mustrit ei täheldatud elemendi pinge ja mahtuvuse vahel.

Tabelist eristub, et akuelement, mille pinge oli ohtlikult madalal akupatarei lahti monteerimise hetkel, suutis talletada ka kõige vähem energiat. Seega on tõenäoliselt elemendi keemiline koostis madala pinge tõttu kahjustunud.

Tabel 4.5 Tühjendamiskatse tulemused

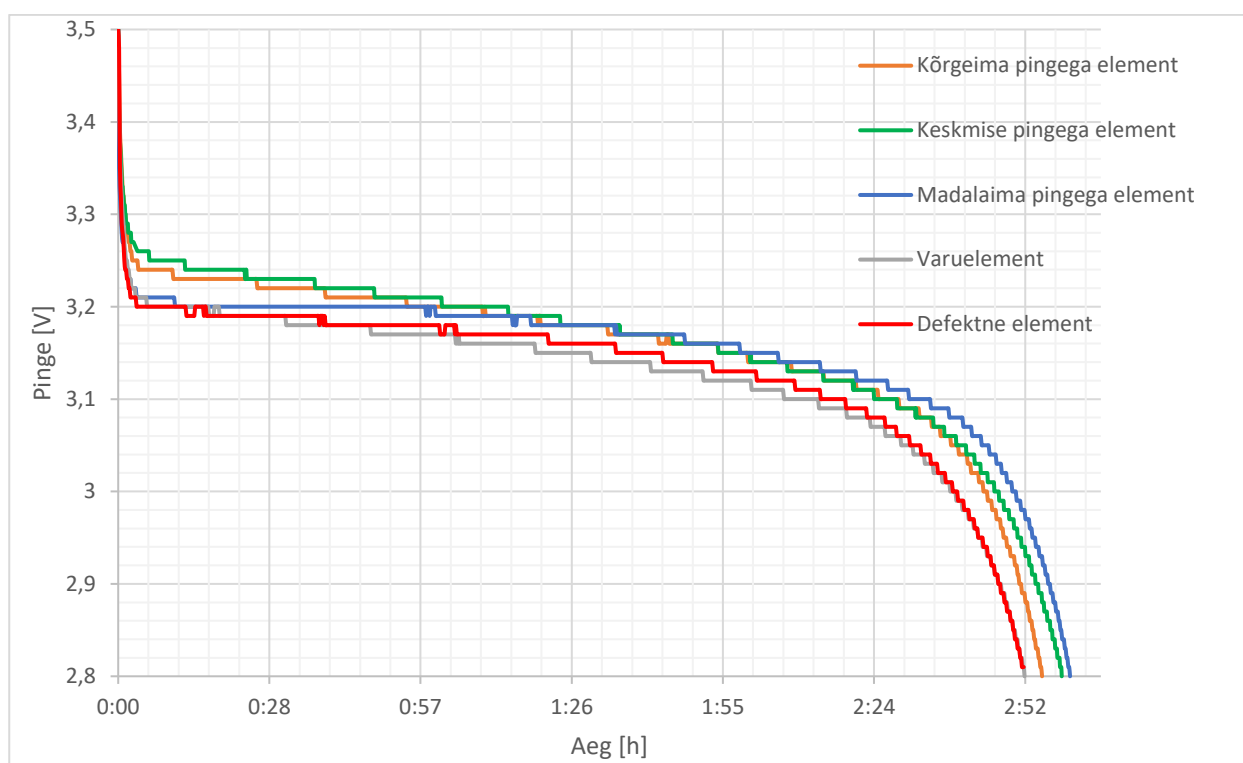
Elemendi grupp	Pinge peale lahti monteerimist [V]	Elemendi mahtuvus [Ah]	Erinevus võrreldes nimimahtuvusega [%]
Kõrgeima pingega element	2,93	37,2	7,1
Keskmise pingega element	2,46	37,9	5,3
Madala pingega element	2,09	37,3	6,7
Varuelement	3,42	36,9	7,7
Vigane element	0,34	36,2	9,5

Kuna aga testitud akuelementide arv moodustab akupatarei osakaalust on 3,5 %, siis võib leida suuremaid kõrvalekaldeid elemendi mahtuvustes võrreldes nimimahtuvusega. Mahtuvuse kiire vähenemine võib esineda alles korduval tsüklilisel tühjendamisel, kuid seda antud peatükis ei vaadeldud.



Joonis 4.14 Akuelementide tühjendamiskarakteristikud voolu järgi

Joonisel (Joonis 4.14) on näha elemendi tühjenemiskarakteristik voolu ja joonisel (Joonis 4.15) pinge järgi. Põhiline erinevus elementide vahel eristub tühjenemiskarakteristiku kujus, selliselt et mõni element suudab säilitada katse algaasis kõrgemat pinget ja sellest tulenevalt tagada kõrgemat vooluväärtust, ning vastupidi. Samas eritub defektse elemendi tühjenduskarakteristiku madalamal asuv kõver nii voolu kui pinge järgi.

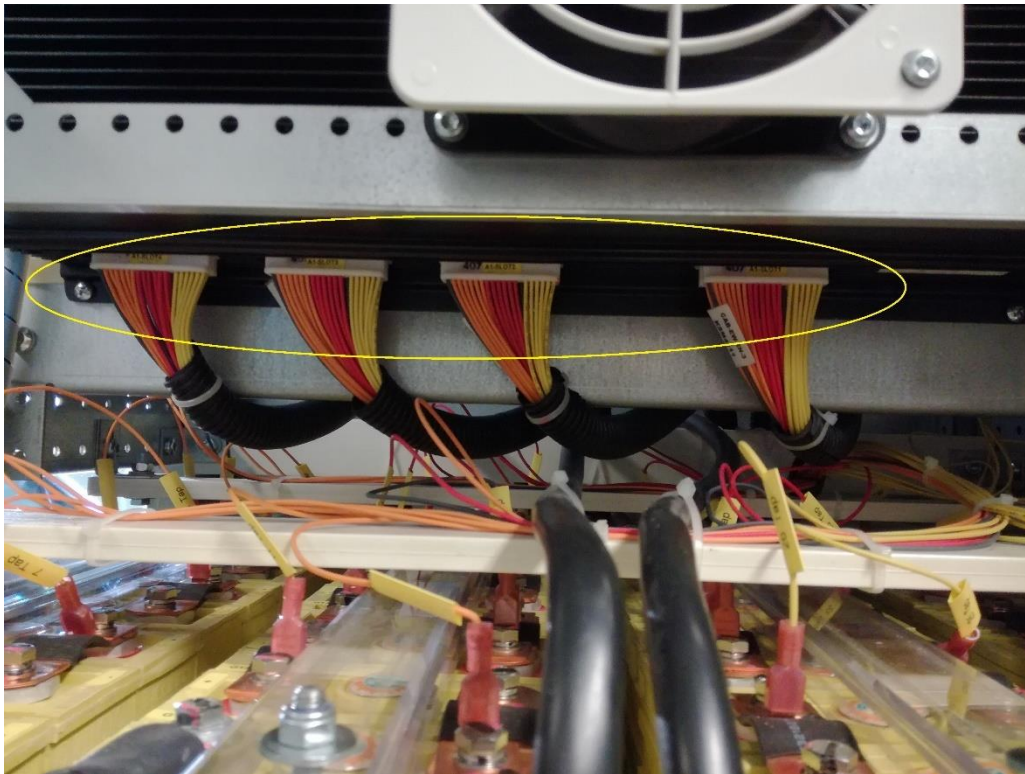


Joonis 4.15 Akuelementide tühjendamiskarakteristikud pinge järgi

4.5. Akupatarei montaaž

Enne akupatarei lõpliku montaaži teostatakse akuelementide pingete kontroll. Elementidele, mille pinged on madalamad kui taotluslik piirväärtus, teostatakse täiendav laadimine. Elemente, mille pinge on üle taotlusliku piirväärtuse, tühjendatakse koormustakisti abil. Kui elementide pinged on sobivas vahemikus, siis saab alustada elementide akukappi paigutamisega.

Enne akuelementide paigutamist riiulitele on väga oluline, et BMS-i balansseerimissendisid pistikud ja BMS-i toitepistik oleks lahti ühendatud (Joonis 4.16). Vastasel juhul võib vale ühenduse või juhusliku kontakti korral tekkida oht, kus BMS-i balansseerimis- ja mõõtesisendile otse vahele satub oluliselt kõrgem pinge kui tööpinge ning BMS rikneb.

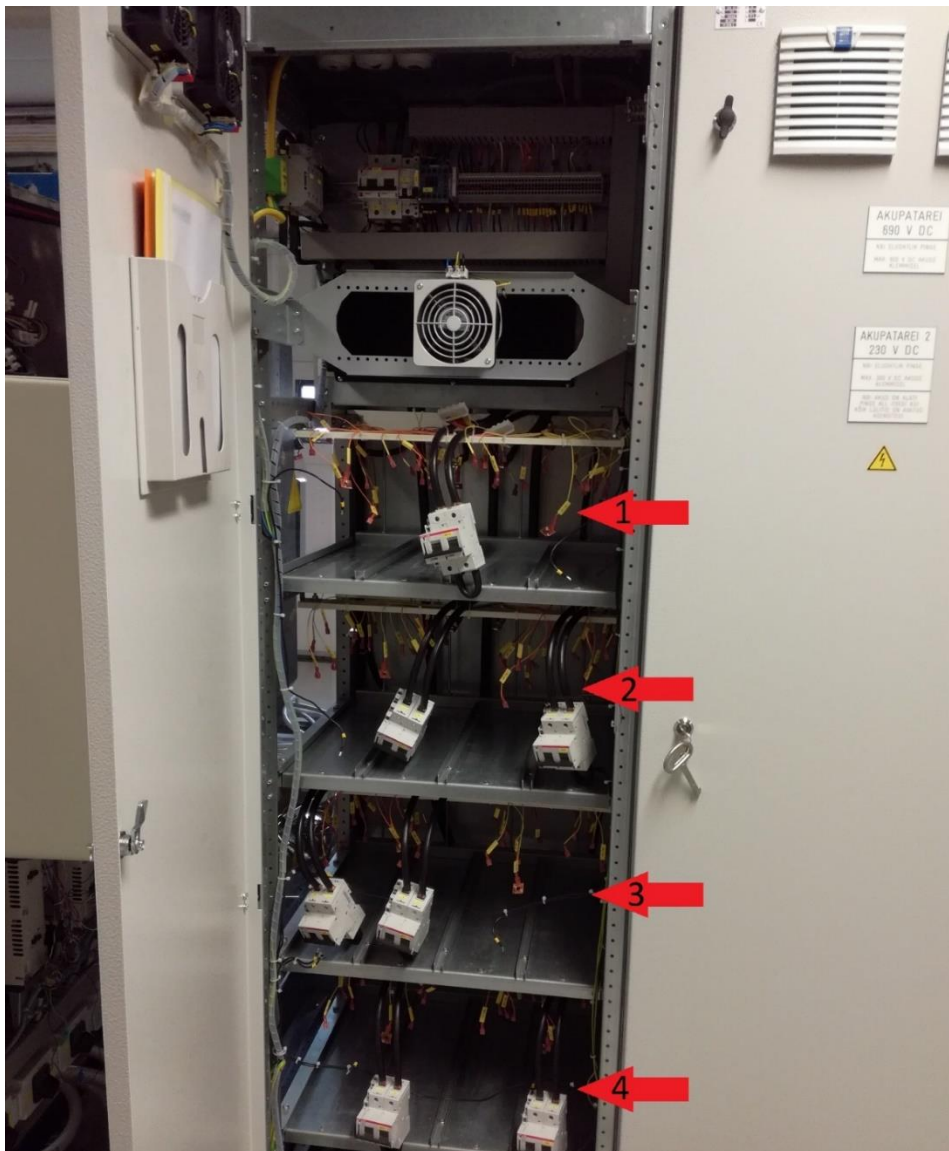


Joonis 4.16 Balansseerimissisendid, mis on vaja montaaži ajal BMS-i küljest lahti ühendada

Akuelemendid paigutatakse riiulitele eelnevalt kokku monteeritud gruppideks (vastavalt ühendusvaatele lisas (L.2)), mis koostatakse 9-st järjestikku ühendatud elemendist. Eelnevalt moodustatud grupid ühendatakse omakorda järjestiku kasutades ühendussildadena kaableid. Kaablikingad kinnitatakse akuelemendi klemmide külge poltliite abil. Seetõttu on oluline alustada energiasalvesti riiulite täitmist ülemisest paremast servast ja liikudes joonisel (Joonis 4.17) noolega 1 näidatud suunas. Vastasel juhul ei ole piisavalt ruumi poltliite kinnitamiseks.

Kui grupp elemente on paigutatud riiulile ja kaablikingad poltliite abil kinnitatud, siis ühendatakse elementide balansseerimissisendid ja akuelementide liikumist takistav plastikust kinnitus. Sama protsess toimub järgmise grupiga, seni kuni riiul on elementidega täidetud. Viimases etapis paigaldatakse akuelementide vahelised lahkülilid ja kaitseautomaatlülid. Montaaži ajal tuleks ohutuse tagamiseks hoida kõik kaitseülilid avatud asendis (järjestiku ühendatud elementide arv on väiksem ja seetõttu on pinge madalam).

Järgmine riiul algab samuti paremast servast liikudes vasakule (joonisel (Joonis 4.17) noolega 2 näidatud suunas), ning eelnevat põhimõtet järgitakse kogu ülejäänud akukapi ulatuses.



Joonis 4.17 Akuelementide montaaži järjekord

Kui kõik akupatarei elemendid ja nende kinnitused on paigaldatud, ühenduskaablid, balansseerimissisendid (Joonis 4.18) , lahklülitid ja kaitseautomaatlülitid (k.a kaitseautomaatide abikontaktid) ühendatud, siis suletakse kõik akuelementide vahelised lahklülitid. Lahklüliti avatud asend võib põhjustada ülepinget BMS-i sisendis ja lõpptulemusena BMS-i riknemist.

BMS-i riknemise vältimiseks on kasutusel akuelementide vaheliste kaitselülite olekut jälgivad kontaktid, kus kaitselüliti lahtumisel saadava signaali alusel eraldatakse kontaktori lahtumiselega akukapp energiasalvestist. [42] Kasutades akupatarei laadimiseks mõnda välist toiteallikat ei ole võimalik eraldada avatud lahklüliti korral laadimisahelat ja BMS võib rikneda. Viimases etapis ühendatakse BMS-balansseerimissisendite pistikud ja BMS-i toitepistik.



Joonis 4.18 Balansseerimissisendi ühendus akuelemendiga

BMS-i riknemise vältimiseks on kasutusel akuelementide vaheliste kaitselülite olekut jälgivad kontaktid, kus kaitselüliti lahtumisel saadava signaali alusel eraldatakse kontaktori lahtumise akukapp energiasalvestist. [42] Kasutades akupatarei laadimiseks mõnda välist toiteallikat ei ole võimalik eraldada avatud lahtlüliti korral laadimisahelat ja BMS võib rikneda. Viimases etapis ühendatakse BMS-balansseerimissisendite pistikud ja BMS-i toitepistik.

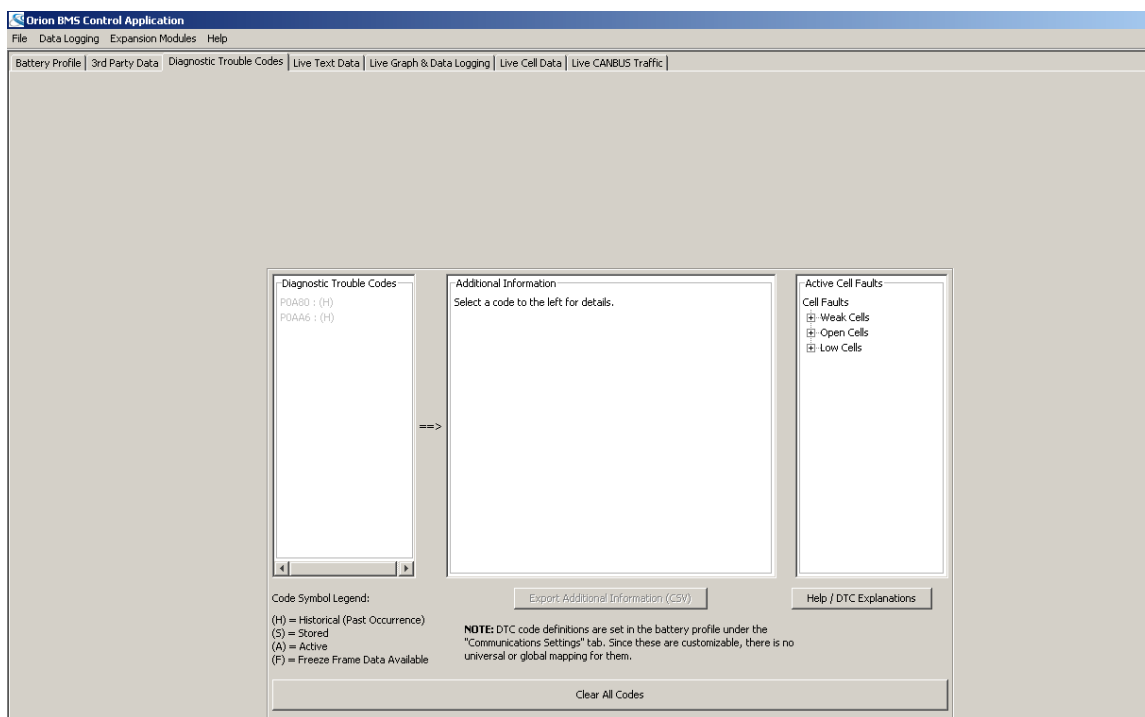
4.6. Akupatarei käivitamine

Monteeritud akupatarei parameetreid saab jälgida vastava BMS-i tarkvara kasutajaliidese kaudu. BMS-i seadistamiseks ja akuelementide ning kogu akupatarei jälgimiseks kasutatakse BMS-i tootja (Ewert Energy Systems) poolt BMS-ga kaasa olevat tarkvara „Orion BMS Control Application“. Andmeside akupatarei ja BMS-i vahel toimub läbi CAN-i andmesidesiini, millest tuuakse BMS-i komplektis olevasse CAN/USB adapterisse eraldi ühenduskaabel. Adapteriga ühendatakse arvuti läbi USB pordi kasutades selleks BMS-i komplektis olevat kaablit. [42]

Akupatarei esmasel käivitamisel peale montaaži tuleks BMS-i tarkvaras kindlasti kontrollida vigade paneeli akent *Diagnostic Trouble Codes* (Joonis 4.19). Aknast on võimalik näha nii elemendipõhiseid kui ka BMS-i üldiseid veateateid. Peale montaaži võib tekkida olukord, kus mõne elemendi balansseerimispistik on jäänud ühendamata või on muude toimingute käigus pistik lahti tulnud (konkreetselt nähtus kuvatakse veateatena- *open cell*).

Akupatareid laadides ja tühjendades hindab BMS-i oma sisemiste algoritmide järgi elementide dünaamilist seisukorda, ning parameetrite ebanormaalsete väärtuste korral lahterdataks elemente nõrkadeks (*weak cell*) ja madala pingega elementideks (*low cell*).

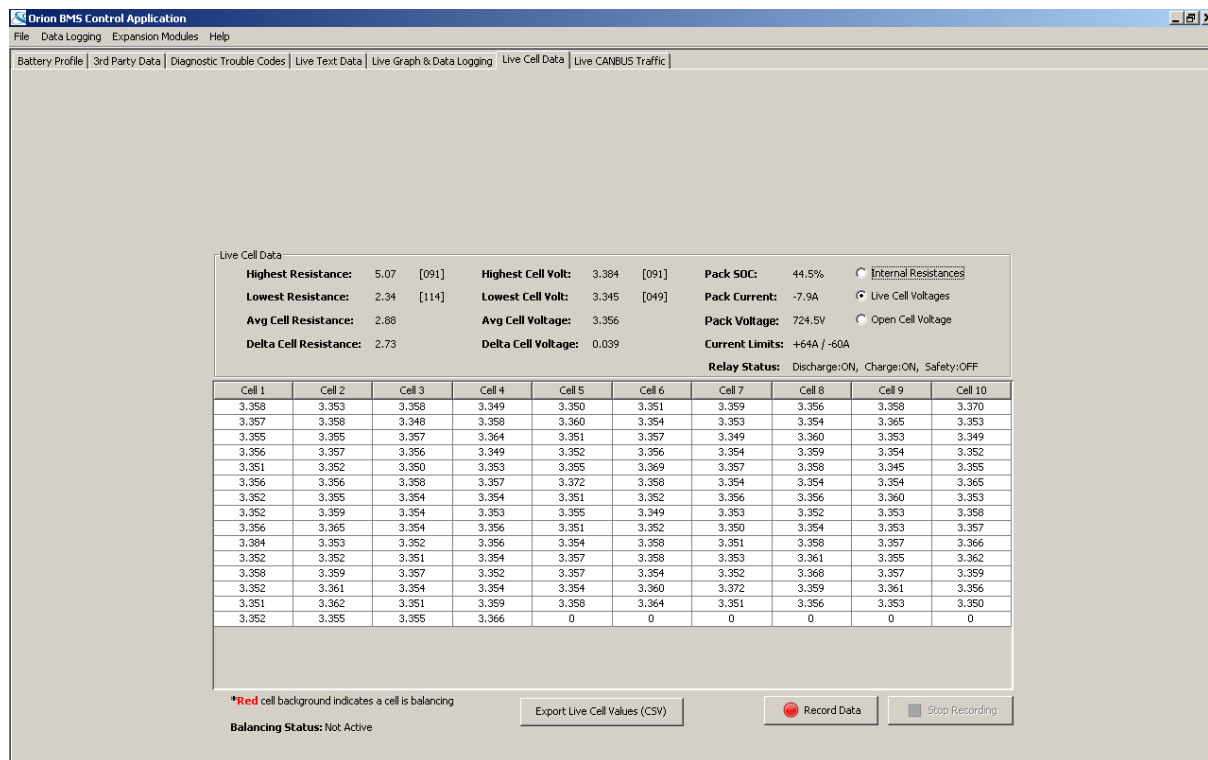
BMS hindab elementi nõrgaks peamiselt kahe parameetri alusel: elemendi sisetakistus on liiga kõrge võrreldes teiste elementidega või ületab seatud piirväärtusi; avatud elemendi pinge (*open cell voltage*) erineb oluliselt teiste elementide pingetest.



Joonis 4.19 BMS tarkvara vigade paneeli aken

Joonisel (Joonis 4.20) on vaade BMS-i tarkvara aknast *Live Cell Data*. Siit saab jälgida elementide pingeid, akupatareid läbivat voolu, laetustaset (*SOC*), *CCL-i* ja *DCLi* väärtusi elementide sisetakistusi. Samas aknas on näha, kas elementide balansseerimine lubatud ja missuguseid elemente hetkel balansseeritakse. Peale akupatarei montaaži ja ka BMS-i toitepinge katkemisel kustuvad laetustaseme, tervisetaseme ja sisetakistuse väärtused. Laetustaseme, elementide sisetakistuse ja aku tervisetaseme (*SOH*) väärtused ei ole vahetult mõõdetud vaid on BMS-i

sisemiste algoritmide järgi arvutatud, seetõttu ei ole need väärtused usaldusväärsed BMS-i kasutuselevõtu alguses (või peale toitepinge katkemist). BMS-i vaikimisi SOC on 50 % olenemata tegelikust akukapi elementide laetustasemest. Laadimis- ja tühejenemistsükklite teostamise korrigeerib BMS arvutatud järjest tegelikkusele vastavaks. [42]



Joonis 4.20 BMS tarkvara elementide jälgimise aken

BMS-i tarkvara aknast *Live Cell Data* pärinev informatsioon montaaži järgse akupatarei elementide pingete kohta on koondatud tabelisse (Tabel 4.6). Tabelis olevad pingeväärtused on seotud värvidega, kus punane vastab madalamale pingeniivoole ja roheline kõrgemale. Kõrgemate ja madalamate pingetega elemendid on akupatareis suhtelist ühtlaselt jaotunud. Teatud akupatarei osades akupatarei on näha sarnaste pingetega grupe. Elementide 16-20, 105-108, 126-129 on tõenäoliselt laetud ühe grupina, ning seetõttu omavad vastavad järjestikused elemendid sarnaseid pingeid. Kuigi 90 % akupatarei elementides laeti neljast elemendist koosneva grupina, siis tänu täiendavale laadimisele ja koormustakistiga tühendamisele ning isetühjenemisele pole laadimisgrupid akupatarei koosseisus domineerivad.

Olulisemad väärtused elementide pingete kohta on koondatud tabelisse (Tabel 4.7). Tabelitest on näha, et elementide vaheline pingete erinevus ei ole kuigi suur. Kõrgeima ja madalaima elemendi

staatiline pingete vahe on 0,036 V. Seega staatiline akupatarei olukord on sobilik teostamiseks laadimis- ja tühjendamistsükleid.

Tabel 4.6 Akupatarei pinged peale montaaži

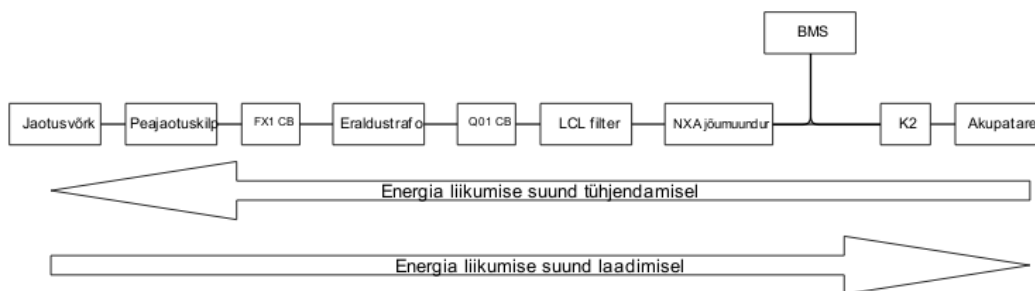
Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5	Cell 6	Cell 7	Cell 8	Cell 9	Cell 10
3,335	3,334	3,331	3,331	3,33	3,327	3,32	3,324	3,319	3,316
3,315	3,315	3,333	3,338	3,338	3,338	3,342	3,343	3,339	3,338
3,313	3,31	3,308	3,314	3,311	3,315	3,315	3,312	3,321	3,314
3,316	3,316	3,319	3,321	3,322	3,329	3,324	3,311	3,336	3,337
3,338	3,339	3,32	3,326	3,316	3,317	3,309	3,317	3,315	3,313
3,312	3,329	3,328	3,318	3,314	3,322	3,325	3,311	3,324	3,332
3,328	3,334	3,318	3,321	3,333	3,331	3,329	3,332	3,334	3,335
3,333	3,338	3,33	3,334	3,342	3,333	3,333	3,332	3,334	3,334
3,334	3,332	3,333	3,336	3,333	3,339	3,338	3,336	3,338	3,338
3,338	3,338	3,327	3,317	3,336	3,326	3,333	3,337	3,336	3,334
3,311	3,334	3,336	3,336	3,324	3,317	3,324	3,322	3,334	3,322
3,336	3,338	3,339	3,337	3,332	3,339	3,338	3,336	3,337	3,341
3,333	3,336	3,333	3,33	3,333	3,334	3,333	3,335	3,334	3,333
3,332	3,338	3,315	3,32	3,318	3,307	3,333	3,334	3,336	3,33
3,333	3,334	3,327	3,312						

Tabel 4.7 Elementide pingete olulisemad väärtused peale montaaži

Minimaalne elemendi pinge [V]	3,307
Maksimaalne elemendi pinge [V]	3,343
Keskmine elemendi pinge [V]	3,328
Pingete erinevus [V]	0,036

4.7. Praktilised toimingud mikrovõrgu laadimis- ja tühjendamistsükli teostamiseks

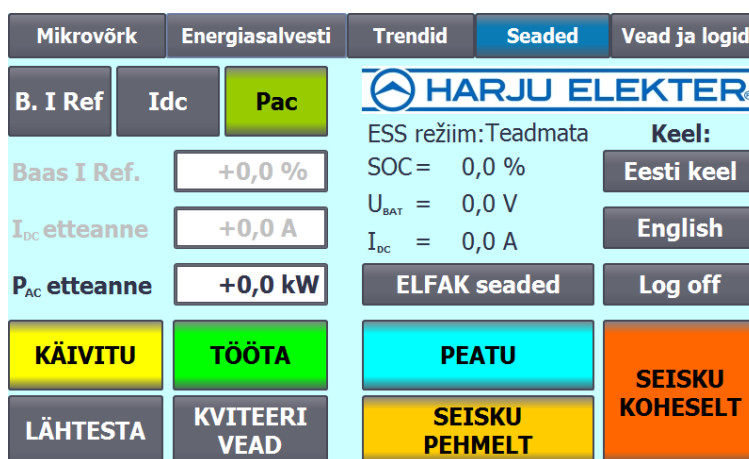
Monteeritud akupatarei omaduste välja selgitamiseks on vajalik teostada laadimis- ja tühjendamistsükleid. Joonisel (Joonis 4.21) on kujutatud energia liikumist läbi mikrovõrgu. Mikrovõrgu ahelas on veel täiendavaid seadmeid (PV jõumuundur, võrguanalüsaator), kuid neid akupatarei laadimis- ja tühjendamistsükli käigus ei vaadelda.



Joonis 4.21 Energia liikumine läbi mikro võrgu akupatarei laadimis- ja tühjendamistsükli ajal

Mikro võrgu käivitamisprotseduur on kirjeldatud allolevas loetelus.

1. Kilbi „MIKROVORK" ukstel asuvad juhtnupud peavad olema järgmistes asendites:
 - „JAOTUSVORK“ -K ,
 - „PÄIKSEJAAM DC“ -A,
 - „PÄIKSEJAAM AC“ -A ,
 - „TARBIJAD“-A.
2. Hoida UPS-il „ON" nuppu pikalt peal kuni „INVERTER" asendisse,
3. Kontrollida, kas kõik „HÄDASTOPP“ turvalülid on seatud rakendamata asendisse,
4. Kontrollida, et AC isol. seadmel pole veateadet (vajadusel RESET nuppu all hoida),
5. Kontrollida kas kilbis „EN SALVESTI MP JP" asuvad releed KB2 ja KB3 on rakendunud, kui ei, siis vajutada kilbis asetsevat lülitit „S5" ca. 3 sekundit, ’



Joonis 4.22 Operaatorpaneeli seadete aken

6. Kui energiasalvesti operaatorpaneel on visualiseerimisrakenduse käivitanud, vajutada selle menüüs klahvil „SEADED" (Joonis 4.22). Kui kasutaja pole sellel hetkel sisse logitud, avatakse sisselogimise aken:
Vastavalt kasutajanimi: admin ja parool:elmo ning vajutada „OK", siis uuesti klahvile „SEADED".
7. Veenduda, et energiasalvesti kilbi uksele asuv „DC EELLAADIMINE" lüliti on asendis 0,
8. Kontrollida, kas energiasalvesti ekraanil on seadme töörežiim valitud „Idc“, $I_{dc} = 0A$ ning ESS REŽIIM STOPPED. Vastasel juhul vajutada operaatorpaneeli „SEADED" ekraanil klahvil „SEISKU KOHESELT",
9. Kui eelnevad tingimused on kõik täidetud, alles siis vajutada energiasalvesti operaatorpaneeli SEADED" ekraanil kõigepealt klahvi „LÄHTESTA" ning seejärel klahvi „KÄIVITU“,
10. Eelnevalt antud korralduse peale suletaks jaotusvõrgu pealüliti ning vastav indikatsioon „J.V.V.LÜLITI“ süttib,
11. Peale indikaatorlambi süttimist energiasalvesti kilbi uksele, pöörata „DC EELLAADIMINE" lüliti asendist 0 asendisse 1 ning seejärel asendisse START ja hoida vastavas asendis kuni suletakse koormus-lahklüliti Q01-CB,
12. Järgnevalt käivitub NXA muundur, ning süttib indikaator "STANDBY",
13. Vajutada paneelil klahvile „TÖÖTA" (standby lamp kustub). Selle ühendatakse kontaktor K2, muundur ühendatakse akudega ja kilbi uksele on süttib „AKUD UHENDATUD" indikaator,
14. Energiasalvesti ekraanil on valida soovitud voolu etteande väärtus ja voolu suund „Idc“. Laadimistsükli korral on „Idc“ väärtus negatiivne ja tühjendamistsükli korral positiivne. Vastavalt sisestatud etteande väärtuse märgile süttib kilbi uksele indikaatorlamp „AKUDE LAADIMINE“ või „AKUDE TÜHJENDAMINE“.

Mikrovõrgu seiskamiseprotseduur on kirjeldatud allolevas loetelus:

1. Vajutada energiasalvesti operaatorpaneeli ekraani „SEADED", sealt vajutada nupule „SEISKU PEHMELT“. Esmalt lahutatakse kontaktor K2 ja järgnevalt koormus-lahklüliti Q01-CB (kustuvad ka vastavad indikaatorlambid „AKUD UHENDATUD“, „NXA V.LÜLITI SEES“);
2. Pöörata „DC EELLAADIMINE" lüliti asendist 1 asendisse 0. Selle tagajärjel avatakse jaotusvõrgu pealüliti;

Hädaolukorras vajutada energiasalvesti või mikro võrgu kilbi uksel olevat „HÄDASTOPP“ lülitit või energiasalvesti operaatorpaneeli „SEADED“ ekraanil asuvat klahvi „SEISKU KOHESELT“.

4.8. Laadimistsükkel

Akupatarei laadimisel liigub energia TTÜ võrgust läbi mikro võrgu akudesse. Laadimisvoolu voolutugevus on võrdeline NXA muunduri ja akupatarei vahelise pingete erinevusega. Laadimistsükli oluliste tehniliste parameetrite väärtused fikseeritakse BMS-i andmete logimise funktsiooni abil. Laboratooriumis teostatud katse peamiste parameetrite väärtused on koondatud tabelisse (Tabel 4.8). Katsetel on logitud ka tsüklite arvu alates akupatarei montaažist. Tsükli täitumiseks loetakse olukorda, kus BMS-i on läbinud nimimahtuvuse jagu energiat [38].

Laadimistsükli alguseks loetakse hetke, kus kontaktor K2 sulgub. Laadimistsükkel loetakse lõppenuks, kui muundurit ja akupatareid läbiva laadimisvoolu väärtus viiakse BMS-i juhtimisel nulli. Esmase tsükli laadimisvoolu etteande suurus on valitud 10 A, et akude balansseerimine toimuks võimalikult pika aja jooksul ja samal ajal piirata katse teostamiseks kuluvat aega.

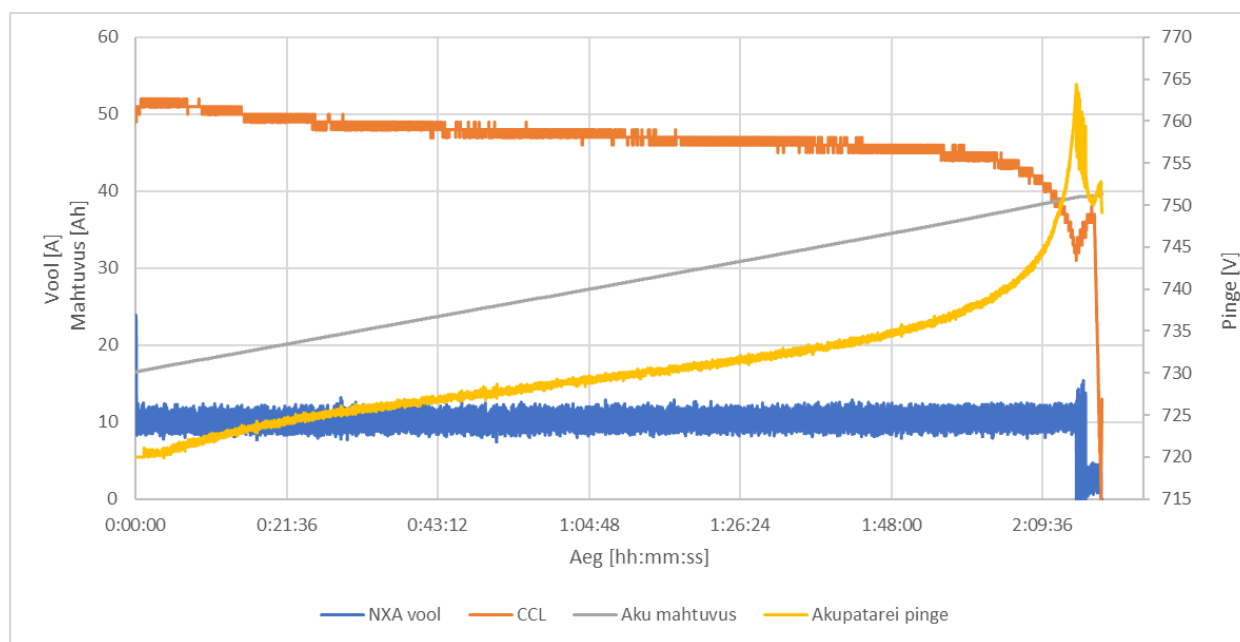
Tabel 4.8 Laadimistsükkel 10A etteande vooluga

Katse kestvus	2:18:30	
Etteantud laadimisvool	10A	
Tsüklite arv peale montaaži	1	
	Parameetri väärtus katse alguses	Parameetri väärtus katse lõpus
Akupatarei pinge [V]	720	749,1
CCL [A]	50	13
Kõrgeima elemendi pinge [V]	3,528	3,905
Keskmine elemendi pinge [V]	3,379	3,491
Madalaima elemendi pinge [V]	3,291	3,359
Akupatarei mahutavus [Ah]	16,5	39,6
SOC [%]	41	99

Joonistel (Joonis 4.23) ja (Joonis 4.24) on kujutatud laadimistsükkel graafilisel kujul. Akupatarei pinge hakkab alates laadimise algusest sujuvalt tõusma. Koos akupatarei pingega kasvab sarnase tõusuga ka akupatarei mahtuvus kuni ajahetkeni 1:50, kus akupatarei pinge hakkab eksponentsiaalselt kasvama. See viitab asjaolule, et arvestava osa elementide laetustase läheneb 100 %-ni.

Akupatarei pinge katse lõpuks 749,1 V. Tingimusel, et kõik elemendid täituvad identselt, siis ideaaljuhul on 100 % SOC väärtuse juures akupatarei pinge 864 V. Antud väärtuse saavutamine eeldaks väga võimekat BMS-i.

Kogu laadimisprotsessi vältel korrigeerib BMS CCL väärtust, ning see hakkab astmelist langema. BMS-i logist selgub, et CCL-i väärtust laadimisprotsessi käigus piiratakse elemendi sisetakistuse tõttu v.a ajahetkel 1:17:59, kus CCL-i väärtus korrigeeritakse SOC väärtuse tõttu.



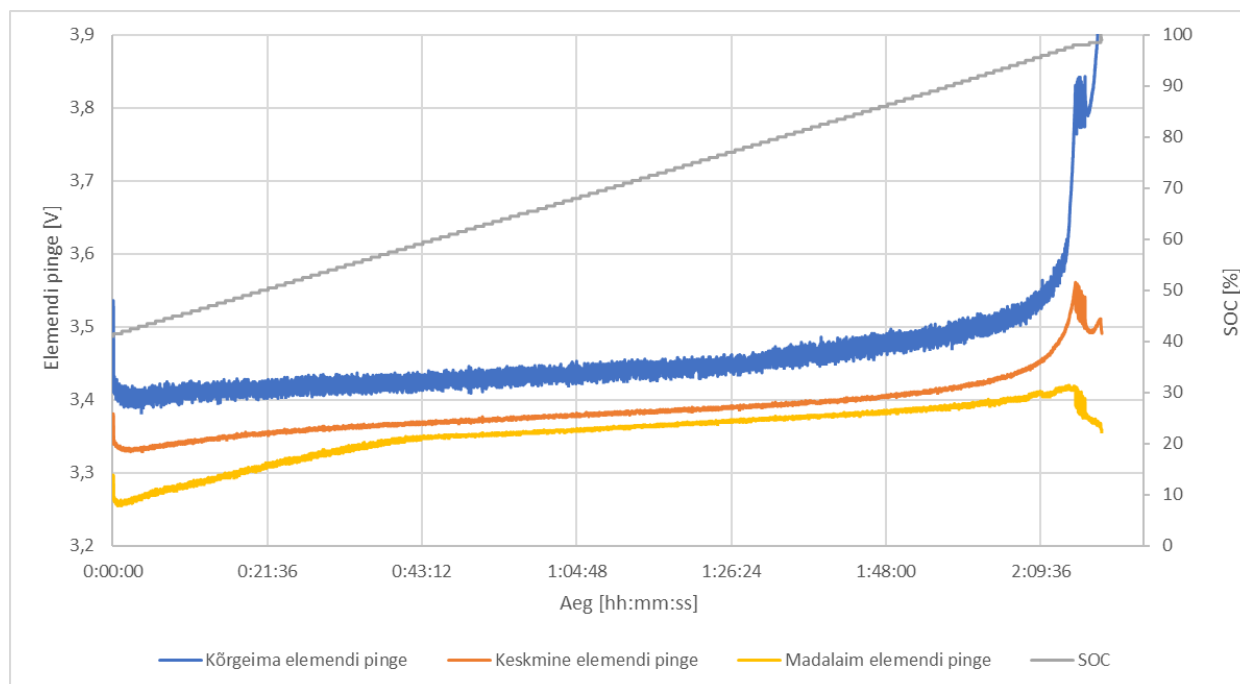
Joonis 4.23 Laadimistsükkel 10 A etteande vooluga

Joonisel (Joonis 4.24) vaadeldakse elementide pingeid ja SOC laadimisprotsessi kestel. SOC väärtus kasvab sujuvalt koos elementide pingetega kuni 98,5 %-ni. Laadimistsükli lõpus, kui elementide pingeid on eksponentsiaalselt kasvanud, korrigeerib BMS SOC väärtus, mida graafikul iseloomustab konstantse SOC kasvamine asendumine horisontaalse piirkonnaga.

Võrreldes keskmise pingega elemendi laadimiskõvera kaugust madalaima ja kõrgeima elemendi kõverast, on näha, et keskmise elemendi pinget iseloomustav kõver asub lähemal madalaima elemendi laadimiskõverale. Seetõttu leidub akupatareis üksikuid elemente, mille pinge on teiste elementide pingest oluliselt kõrgemal. Sellised elemendid omavad üldjuhul kõrget sisetakistust (*Cell Resistance*), mille järgi piirab BMS antud katses CCL-i väärtust.

BMS-i sisetaksitus arvutuslik väärtus on mõjutatud peamiselt kahest tegurist. Kui üksiku akuelemendi temperatuur on näiteks akupatarei ehitusliku omapära tõttu teistest madalama, siis see võib põhjustada sisetakistuse väärtuse oluliselt kõrgemat näitu. Teisalt muutub Li-ioon akude

sisetakistuse väärtus laadimisprotsessi kestel, eritu just akuelemendi mahtuvuse piiridel, kus laetustase on alla 2 % või üle 98 %. [38]



Joonis 4.24 Elementide pingete ja SOC muutus laadimistsükli kestel 10 A etteande vooluga

BMS alustab elementide balansseerimisega sisuliselt kohe peale laadimise algust. Kuna akupatarei hinnanguline laetustase oli katse alguses 41 %, siis balansseerimiseks alustamiseks vajalikud eeltingimused (eelkõige minimaalne elemendi pinge, mille täitumise korral alustatakse balansseerimist) täideti hetkel, mil kontaktor K2 sulgus. Katsetulemustest saab kinnitust, et passiivse BMS-i võimekus elemente balansseerida on suhtelist madal ja laadimise lõpuks on suurim pingete erinevus elementide vahel 546 mV.

4.9. Tühjendamistsükkel

Akupatarei omaduste analüüsimiseks ja mahtuvuse hindamiseks teostati tühjendamistsükkel. Tabelisse (Tabel 4.9) on koondatud katse peamiste parameetrite väärtused. Tühjendamistsükkel algas kontaktori K2 sulgemisega ja loeti lõppenuks, kui akuparameetrite väärtuste ei võimaldanud täiendavalt tühjendamist ja kontaktor K2 avati.

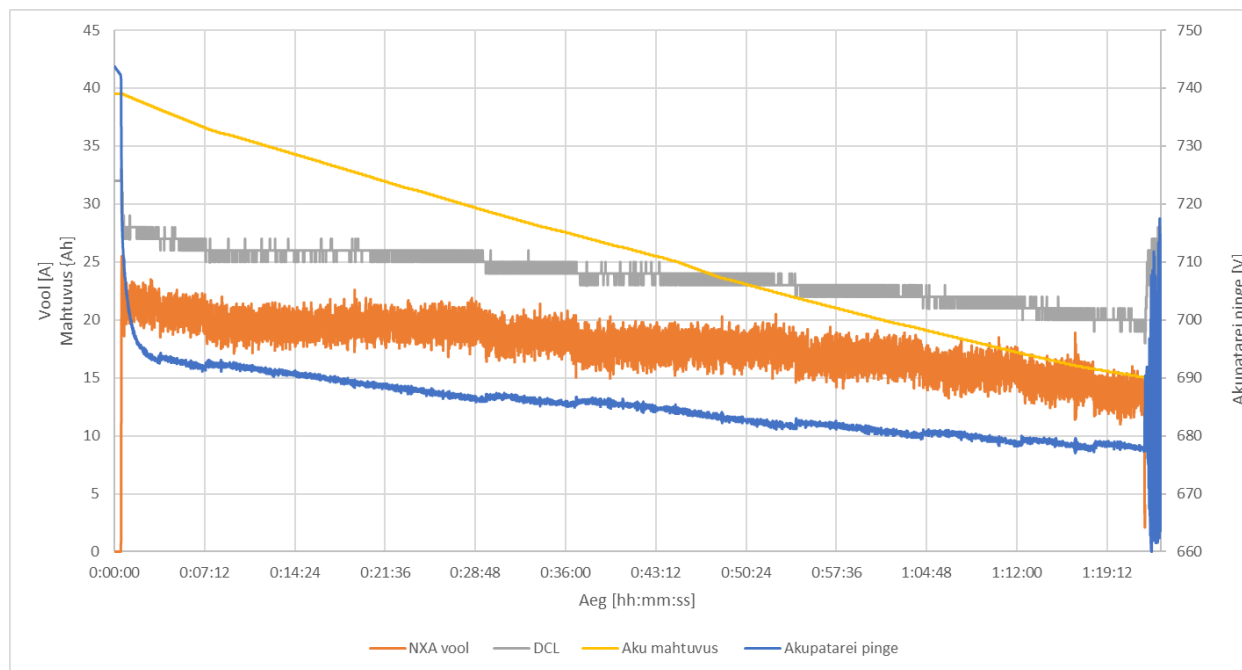
Joonisel (Joonis 4.25) on kujutatud antud tühjendustsükkel graafilisel kujul. Peale kontaktori K2 sulgemist väheneb akupatarei pinge väga kiiresti 42 V võrra, ning katse lõpus on pinge 677,4 V.

Tingimusel, et kõik elemendid tühjenevad identselt, siis ideaaljuhul on 0 % SOC väärtuse juures akupatarei pinge 604,8 V.

Tabel 4.9 Tühjendamistsükkel 20A etteande vooluga.

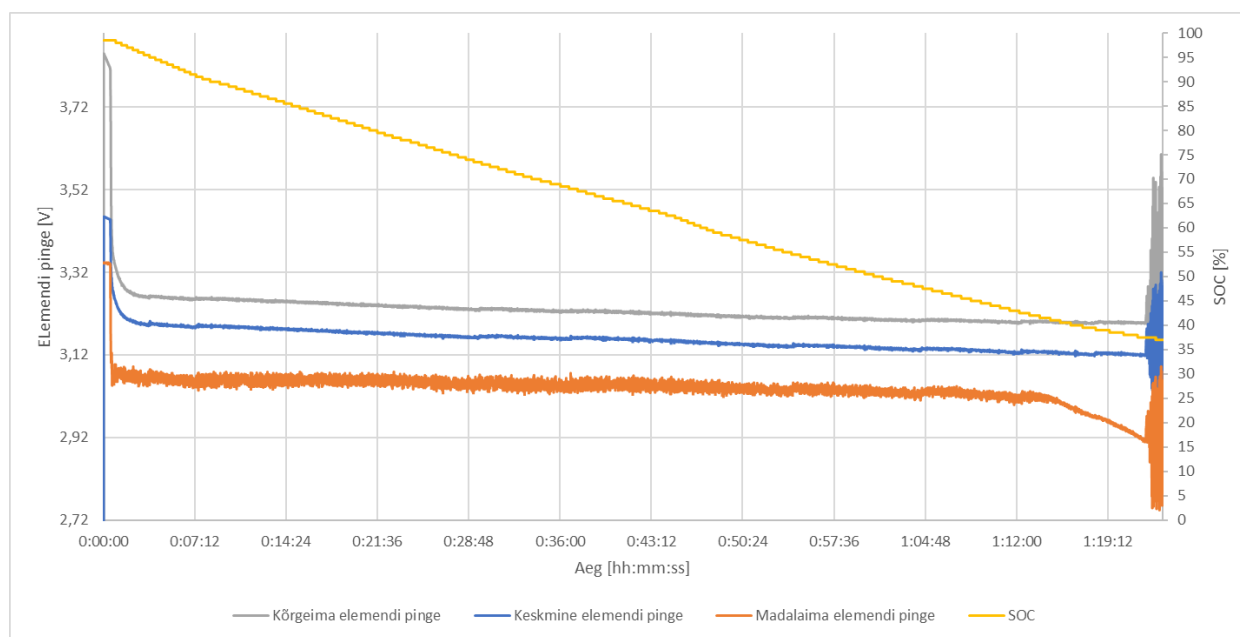
Katse kestvus	1:22:19	
Etteantud tühjendusvool	20A	
Tsükliite arv peale montaaži	2	
	Parameetri väärtus katse alguses	Parameetri väärtus katse lõpus
Akupatarei pinge [V]	743	677,4
DCL [A]	32	22
Kõrgeima elemendi pinge [V]	3,85	3,197
Keskmise elemendi pinge [V]	3,445	3,114
Madalaima elemendi pinge [V]	3,342	2,908
Akupatarei mahutavus [Ah]	39,5	15
SOC [%]	98,5	37,5

Sarnaselt eelnevalt katsele, kus CCL-i väärtust BMS tsükli kestel järk-järgult vähendas, esineb sarnane olukord DCL-i väärtusega. Erinevalt eelnevast katsest toimub DCL-i vähenemine kogu tsükli ulatuses astmeliselt, ning laadimistsükli lõpus CCL-i väärtuse kiiret vähenemist ei toimu. Koos DCL-i vähenemisega muutub ka tühjendusvoolu suurus. Katse viimastel minutitel on voolu keskvärtus langenud 13,5 A-ni. Siiski on see kõrgem DCL-i jooksvat väärtusest.



Joonis 4.25 Akupatarei tühjendamine etteande vooluga 20 A

Akupatarei mahtuvuse väärtus väheneb tühjendamisprotsessi vältel 40 Ah kuni 15 Ah-ni. Seetõttu jääb osa akupatareisse salvestatud energiast kasutamata. Olukorra selgitamiseks vaatleme joonist (Joonis 4.26). Sarnaselt mahtuvusega ei saavuta SOC akupatarei tühjendamistsükli lõpus väärtust 0 %, vaid tsükel lõppeb SOC-i väärtusega 37,5 % (väärtus vastab mahtuvusele 15 Ah). BMS-i logist selgub, et DCL-i vähendatakse enamuses tsükli osas akuelemendi sisetakistuse, ning tsükli lõppfaasis elemendi pingeväärtuse tõttu.



Joonis 4.26 Elementide pingete ja SOC muutus tühjendamistsükli kestel 20 A etteande vooluga

4.10. Tühjendamis- ja laadimistsükkel (täistsükkel)

Järgnevas katses määratakse akupatarei laadimis- ja tühjendamiskarakteristik ning hinnatakse olulisi tehnilisi parameetreid. Antud täistsükli korral alustatakse täis laetud akupatarei tühjendamisega 20 A etteande vooluga hetkeni, kuni voolu väärtus on 0 A. Järgnevalt alustatakse koheselt laadimistsükliga sama etteandevooluga, ning akupatareid laetakse seni, kuni laadimisvoolu väärtus on 0 A. Olulisemad katsetulemused on koondatud tabelisse (Tabel 4.10)

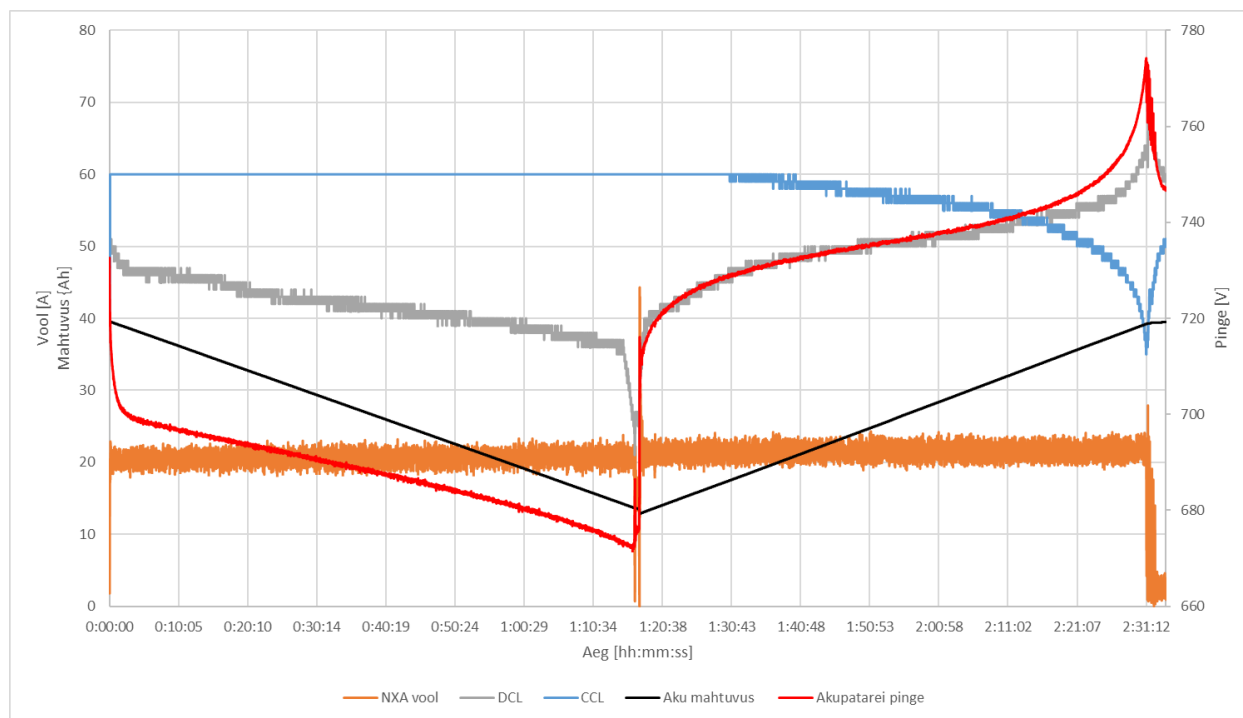
Tabel 4.10 Akupatarei täistsükkel etteande vooluga 20 A

Katse kestvus	2:35:37	
Etteantud tühjendus-, laadimisvool	20A	
Tsüklite arv peale montaaži	7	
	Parameetri väärtus katse alguses	Parameetri väärtus katse lõpus

Akupatarei pingeline [V]	732,6	744,4
CCL [A]	41	25
DCL [A]	54	58
Kõrgeima elemendi pingeline [V]	3,753	3,927
Keskmise elemendi pingeline [V]	3,393	3,452
Madalaima elemendi pingeline [V]	3,347	3,363
Akupatarei mahutavus [Ah]	39,5	39,7
SOC [%]	98,5	99

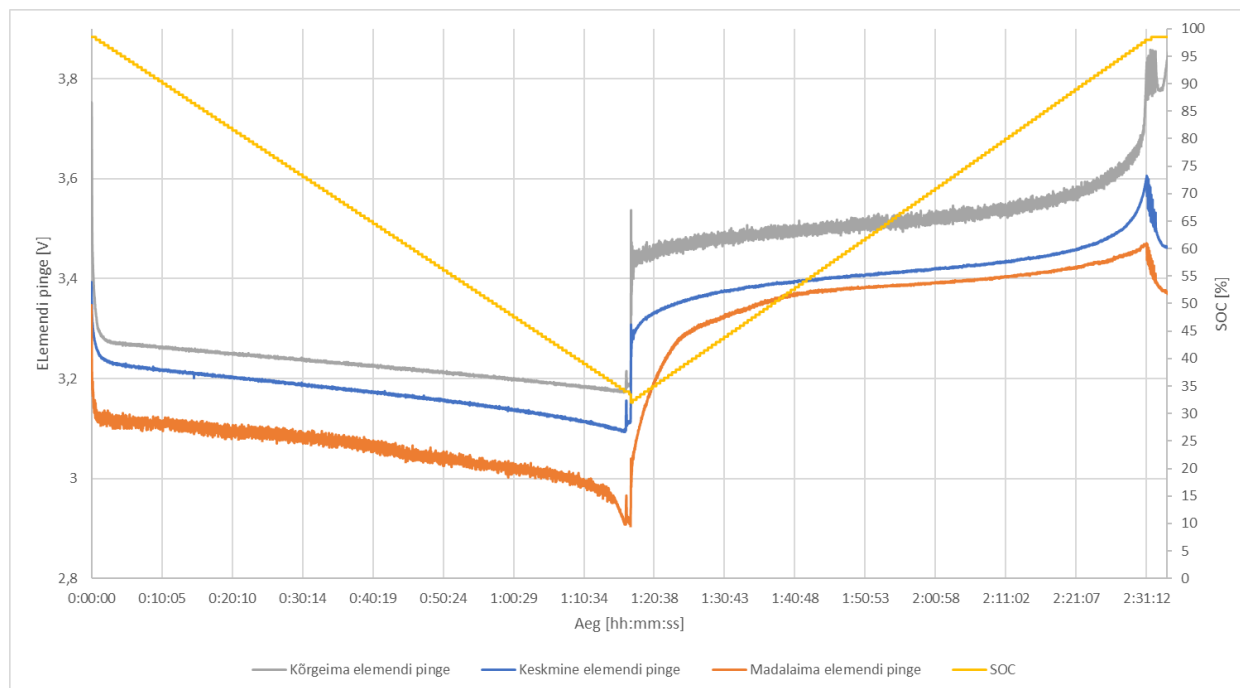
Joonisel (Joonis 4.27) on kujutatud katsetulemused graafilisel kujul. Tabeli on näha, et CCL katse algul on 41 A. Akupatarei korral, mille SOC tase on 98,5 %, on CCL-i väärtus ootamatult kõrge. Tõenäoliselt on eelmise laadimistsükli lõpust katse toimumise hetkeni möödunud piisavalt aega selleks, et akupatarei parameetrid saaksid stabiliseeruda. Jooniselt (Joonis 4.27) on näha, et kohe peale tühjendamise algust tõuseb hüppelist CCL-i väärtus 60 A-ni. Parameetri väärtuse eksponentsiaalne vähenemine toimub tsükli lõpus, kus suure osa akuelementide SOC on 100 % lähedane, ning pingeline akupatarei terviklik pingeline hakkab seetõttu eksponentsiaalselt tõusma.

Erinevalt eelnevas peatükis (4.9) vaadeldud akupatarei tühjendamistsüklist, püsib vool antud katses kogu täistsükli vältel stabiilsena. Kuna akupatarei on selle katse hetkeks läbinud juba mitmeid laadimis- ja tühjendamistsükleid, siis tõenäoliselt on akuelementide parameetrid ühtlasemad, ning BMS ei ole sunnitud mõjutama akupatareid läbiva voolu suurust.



Joonis 4.27 Akupatarei tühjendamise- ja laadimistsükkel (täistsükkel) etteande vooluga 20 A

DCL-i väärtus järgib suure osas täistsüklist akupatarei pingekõvera muutust. Oluline erinevus on tühjendamistsükli lõpus, kus toimub voolu väärtuse järk langus kuni 23 A-ni. Üleminekul laadimistsükli akupatarei pinge ligi 30 V võrra tõuseb, ning DCL-i väärtus suureneb hüppeliselt 31 A-ni.



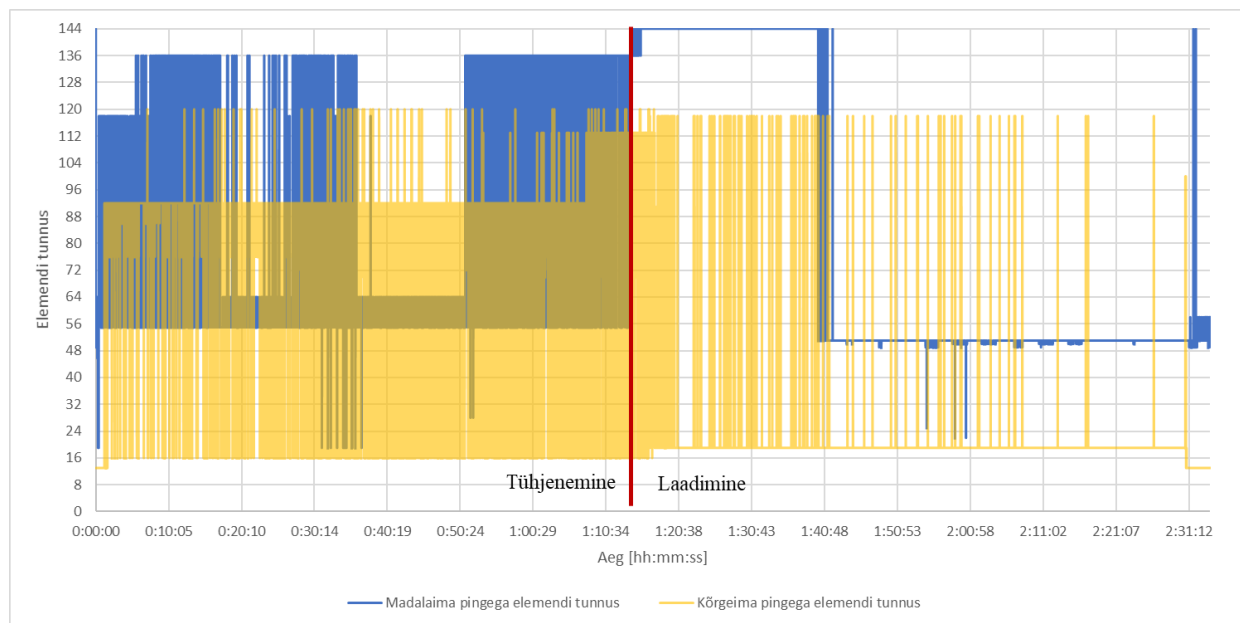
Joonis 4.28 Elementide pingete ja SOC muutus täistsükli kestel 20 A etteande vooluga

Joonisel (Joonis 4.28) (sama nähtus esines ka kõigil eelnevatel katsetel) on märgata olukorda, et laadimisel on kõrgema elemendi tunnusjoon on oluliselt ebahühtlasem võrreldes keskmise ja väikseima pingega elemendi korral. Samuti on algandmete kogum, mille põhjal kõrgeima elemendi tunnusjoone on koostatud, suurema hajuvusega. Akupatarei tühjendamisel on märgata sarnast nähtust madalaima pingega elemendi korral, kui samal ajal keskmise ja kõrgema elemendi pinge tunnusjoon on konkreetsemalt piiritletud. Graafiku hajuvust ei esine piirprotsessides, ehk vahetult peale tühjendamisprotsessi algust ja lõppu, samuti laadimisprotsessi lõppfaasis, kus akupatarei pinge kasvab eksponentsiaalselt. Selle võib olla põhjuseks asjaolu, et peaaegu kogu laadimisprotsessi vältel toimub piirpingega elemendi osas vahetus, selleks vaatleme järgnevat joonist.

Joonisel (Joonis 4.29), kus on kujutatud muutusi piirpingega elementide osas. On näha, et tsükli vältel toimub pidev elementide vahetumine. Piirprotsessides on vahetumine aeglasem ja näiteks laadimistsükli osas 1:38:00-2:31:00 omab madalaimat pinget enamuse aega üks ja sama element,

mis vastaks ka joonisel (Joonis 4.28) toimuvale. Samas toimub tühjendustsükli kestel kõrgeima pingega elemendi osas pidev muutus, mis jooniselt (Joonis 4.28) ei väljendu.

Teise võimaliku põhjusena võib antud nähtust põhjustada laadimis- ja tühjendusvoolu pidev muutumine. Kuna nähtus esineb tühjendamisel madalaima ja laadimisel kõrgeima elemendi pingega ehk elementide korral, mille inertsus pingele muutuste suhtes väiksem võrreldes teiste elementidega.

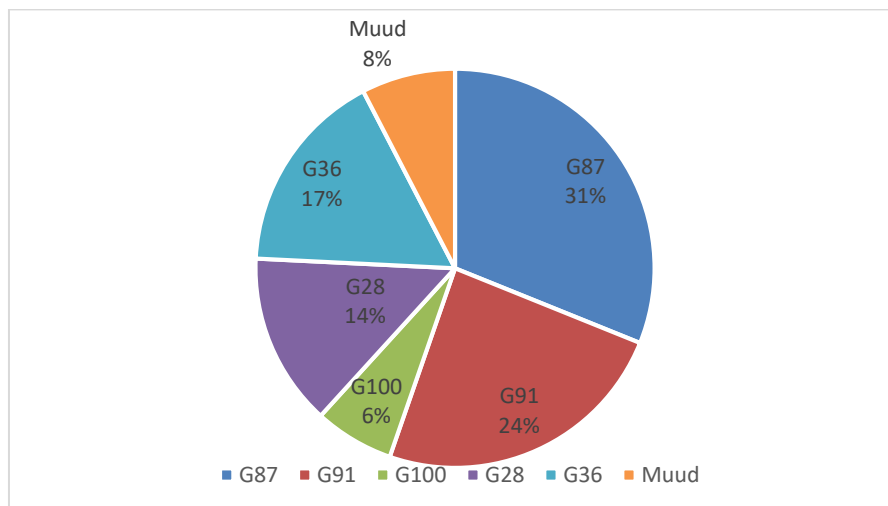


Joonis 4.29 Kõrgeima ja madalaima pingega elemendi muutus täistsükli kestel.

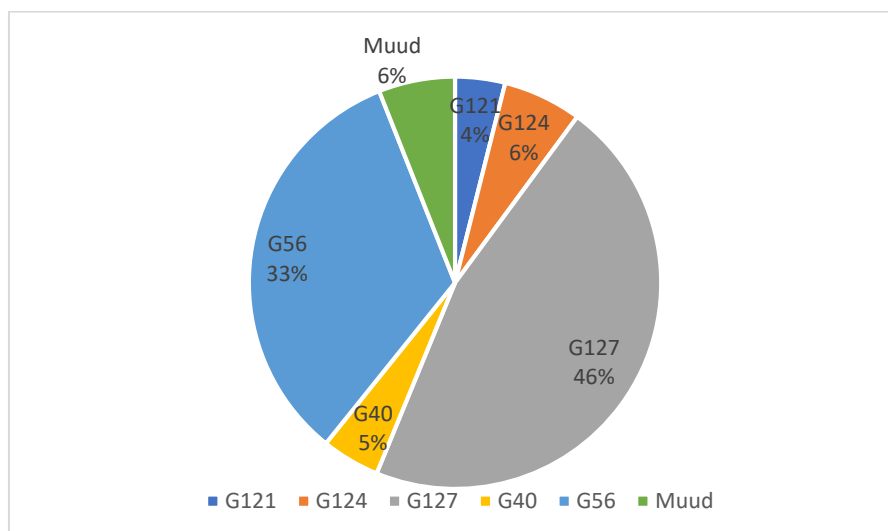
Joonistel (Joonis 4.30, Joonis 4.31) on konkreetsemalt vaadeldud üksikute elementide omadusi täistsükli vältel. Kuna BMS-i logi ja akupatarei koostejoonisel kujutatud akuelementide tunnused ei ole samad, siis kasutades vastavat teisendustabelit lisa (L.1) on joonistel (Joonis 4.30, Joonis 4.31) elementide tähised viidud vastavaks koostjoonise tähistusele.

Tsükli omavad madalaimat pinget peamiselt 4 elementi: G28, G36, G87, G91. Kõrgeima pingega elementide osas on jaotus toimunud peamiselt kahe elemendi vahel: G56, G127. Elementid G28 ja G36 kuuluvad samasse balansseerimisgruppi, ning pinged enne lahti monteerimist olid min. lubatud piiril (2,5 V). Elementid G87-G91 on samas balansseerimisgrupis, ning antud grupi pingele võrreldes ülejäänud akupatareiga oli halvim. Elementide pinged vastavalt 2,07 V ja 1,85 V. Kõrgeima pingega elementid G56 ja G127 ei kuulu samasse balansseerimisgruppi. Elementide pinged oli enne laadimist vastavalt 2,4 V ja 2,61 V.

Võrreldes elementide pingeid lahti monteerimise järgselt mõõdetud pingetega ja arvestades võrreldava andmete hulga suurust, siis selget seost ei ole võimalik tuvastada. Antud juhul ei ole võimalik eristada elementide eraldiseisva laadimisprotsessi käigus tekkinud võimaliku eabilansi ja akuelementide eksploatatsioonist tulenevaid erisusi.



Joonis 4.30 Madalaima pingega elemendid vastavalt nende esinemissagedusele



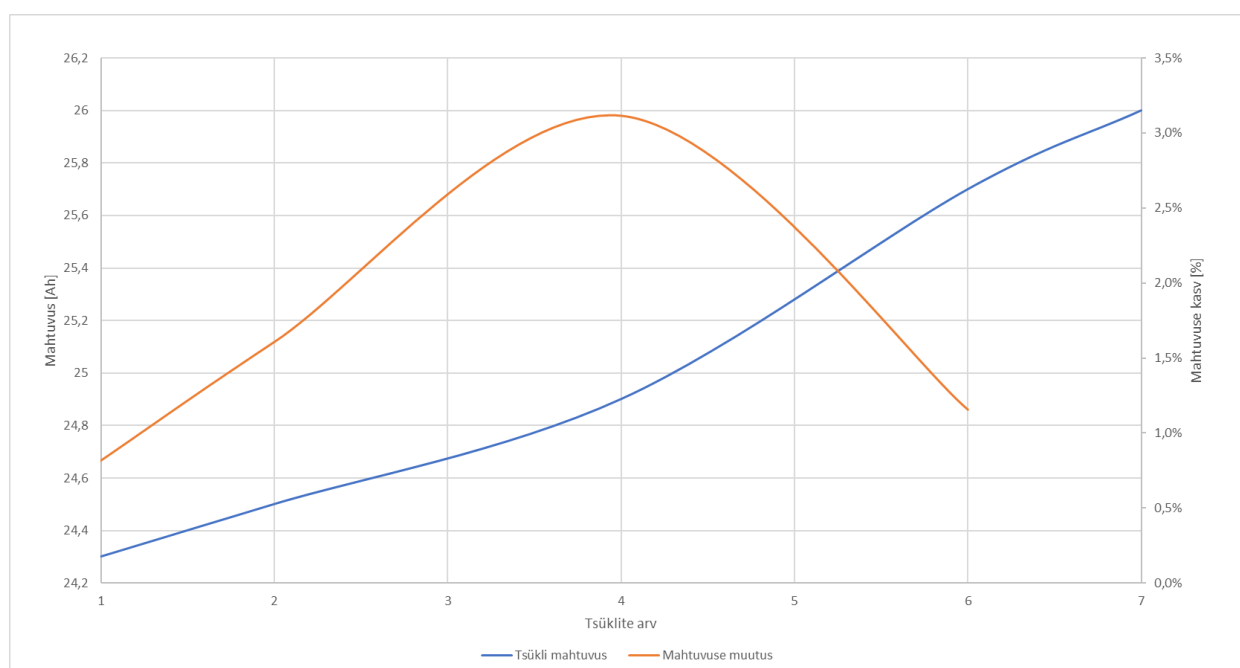
Joonis 4.31 Kõrgeima pingega elemendid vastavalt nende esinemissagedusele

4.11. BMS-i balansseerimisvõimekus

Antud akupatarei Orion BMS-i balansseerimisvõimekuse hindamiseks vaatleme toimunud muutusi akupatarei kasutatavas mahtuvuses peale täistsükli teostamist. Jooniselt (Joonis 4.32) on näha, et akupatarei mahtuvus on 7 tsükli vältel on suurenenud võrreldes montaaži järgse mahtuvusega 1,7 Ah võrra. Samal joonisel on kujutatud ka mahtuvuse muutus protsentides tsükli

vahel. Akupatareiga teostatud täistsükli sisendparameetrid olid erinevad, seetõttu on kasvu väärtus muutuv, ning sõltus eelkõige laadimis- ja tühjendamistsükli voolu etteande väärtusest. Keskmise mahtuvuse muutus tsüklite vahel oli 1,7 %.

BMS-i madala balansseerimisvõimekuse kompenseerimiseks tuleks laadimistsükkel teostada madala laadimisvoolu juures, et pikendada balansseerimise aega. Kuni 2 h peale laadimisstsükli lõppu toimub elementide balansseerimine, peale seda on akuelementide pinged piisavalt madalad ja balansseerimine lõpetatakse. Seetõttu toimub põhiline osa balansseerimisest laadimise ajal. Akuelementide eluea pikendamiseks soovitatakse neid laadida vooluga väärtusel üle 1 A [42].



Joonis 4.32 Akupatarei mahtuvuse muutus täistsükli teostamisel

Akupatarei tabelisse (Tabel 4.11) on koondatud akupatarei elementide pinged olukorras, kus 7. laadimistsükli lõpust on möödunud 4 h. Tabelis olevad pingeväärtused on seotud värvidega, kus punane vastab madalamale pingeniivoole ja roheline kõrgemale. Võrreldes elementide pingeid peatükis (4.6) tabelis (Tabel 4.6) visualiseeritud olukorraga, on elementide pingeväärtused oluliselt ühtlustunud. Eristada saab kolme teistest oluliselt madalama pingega elementi, millest kaks olid eelnevalt vaadeldud täistsükli kestel 31 % ajast madalaima pingega.

Olulisemad väärtused elementide pingete kohta on koondatud tabelisse (Tabel 4.12). Tabelitest on näha, et elementide vaheline pingete erinevus on väike. Kõrgeima ja madalaima elemendi

staatiline pingete vahe on 22 mV. Eelnevalt vaadeldud täistsükli lõpus, oli dünaamiline pingete erinevus 0,564 mV.

Tabel 4.11 Akupatarei pinged peale 7. laadimistsükli lõppu

Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5	Cell 6	Cell 7	Cell 8	Cell 9	Cell 10
3,334	3,334	3,332	3,331	3,332	3,331	3,332	3,332	3,332	3,33
3,33	3,333	3,329	3,332	3,332	3,332	3,332	3,331	3,333	3,332
3,33	3,328	3,317	3,329	3,327	3,332	3,331	3,327	3,332	3,331
3,331	3,333	3,332	3,331	3,331	3,335	3,331	3,327	3,33	3,331
3,332	3,331	3,332	3,332	3,332	3,332	3,324	3,334	3,332	3,325
3,329	3,333	3,334	3,332	3,329	3,334	3,333	3,327	3,332	3,334
3,33	3,334	3,331	3,33	3,333	3,331	3,332	3,332	3,33	3,332
3,33	3,335	3,333	3,331	3,33	3,331	3,332	3,331	3,332	3,332
3,331	3,33	3,331	3,333	3,331	3,336	3,335	3,333	3,332	3,333
3,333	3,332	3,334	3,332	3,333	3,335	3,33	3,334	3,331	3,33
3,328	3,331	3,331	3,332	3,333	3,332	3,33	3,334	3,331	3,334
3,331	3,332	3,333	3,332	3,335	3,333	3,332	3,332	3,333	3,334
3,33	3,336	3,333	3,332	3,333	3,333	3,333	3,334	3,334	3,333
3,33	3,335	3,329	3,332	3,33	3,316	3,33	3,329	3,33	3,329
3,331	3,331	3,331	3,314						

Suurt erinevust kahe väärtuse põhjustab peamiselt asjaolu, et peale laadimistsükli lõppu hakkavad kõrgema pingega elementide pinged kiiresti iseeneslikult vähenema kuni saabub stabiilne pingeniivoo 3,5 V-3,6 V juures. Täiendavalt alandab pinget BMS, mis balansseerib akuelemente etteantud väärtuseni.

Vaadates akuelementide staatilist pingeniivoo ja väga väikest pingerinevust elementide vahel, võib jääda mulje, et antud akupatareid on võimalik täiendavalt laadida. Alustades täiendava laadimisprotsessiga, hakkab kõrgema pingega elementide pinge sõltuvalt laadimisvoolu suuruselt kiiresti kasvama, ning elementide vaheline pingete erinevus muutub sarnaseks, nagu viimase täistsükli lõpul, ning täiendava laadimisega salvestatava energia maht on minimaalne.

Tabel 4.12 Akupatarei olulisemate parameetrite väärtused pinged peale 7. laadimistsükli lõppu

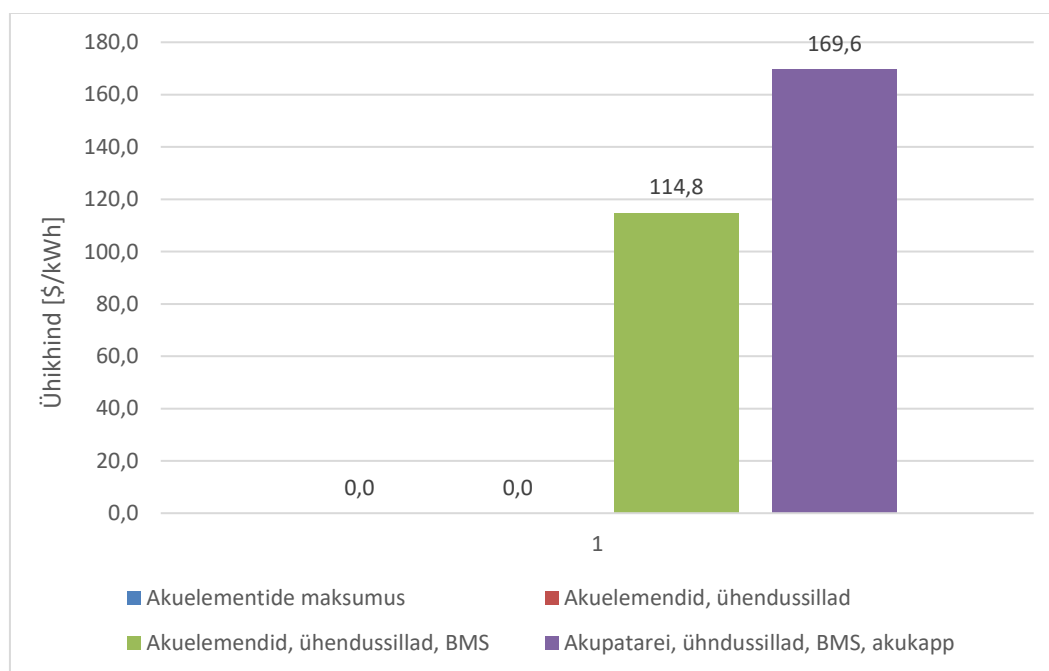
Minimaalne elemendi pinge [V]	3,314
Maksimaalne elemendi pinge [V]	3,336
Keskmine elemendi pinge [V]	3,331
Pingete erinevus [V]	0,022

4.12. TTÜ mikrovõrgu Li-ioon energiasalvesti majanduslikud näitajad

Energiasalvestite kasutamise peamiseks takistavaks teguriks olnud süsteemide kõrge maksumus. Antud peatükis uuritakse TTÜ mikrovõrgu energiasalvesti peamisi majanduslike näitajaid. Joonisel (Joonis 4.33) on kujutatud akupatarei ühikhind sõltuvalt komplekteerituse tasemest hetkel teada oleva hinna ja prognoositava hinna põhjal. Joonis on koostatud tabeli (Tabel 4.13) põhjal.

Tabel 4.13 TTÜ mikrovõrgu energiasalvesti majanduslikud näitajad

Komponent	Hind [€]	Arv [tk]	Summa [€]	Summeritud ühikhind [€/kWh]
Akuelemendid	49,7	214	10642	388,5
Ühendussillad	5,3	214	1123	429,5
BMS	1680	2	3145	544,3
Akukapp (kaitselülitid, kaabeldus, muu)	1500	1	1500	599,1
		Kokku	16410	



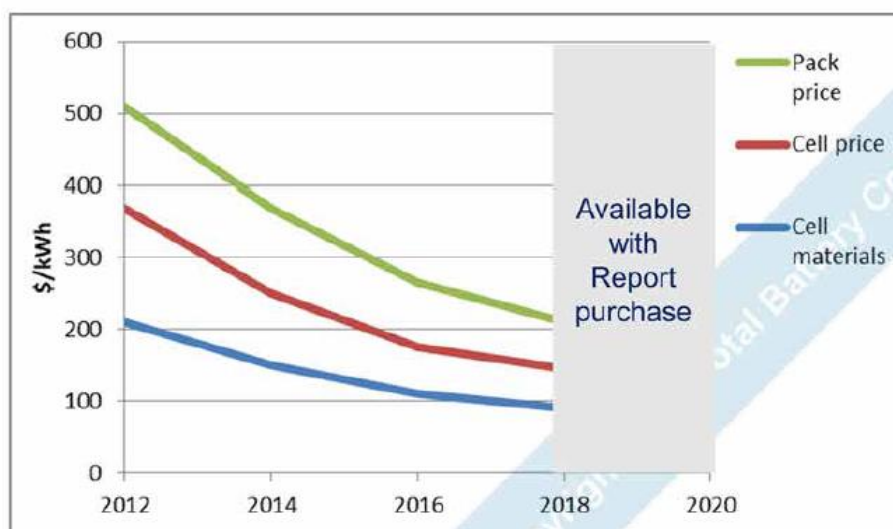
Joonis 4.33 Akupatarei erinevate komplekteerimistasemete ühikhinnad

Vaadeldava akupatarei ühikhinna arvutamise on arvestatud mahtuvusega 27,4 kWh. Komponentide hinnad on vastavalt tootja jaemüügi hinnakirjale (kuna enamus komponentide hinnad on kujutatud dollarites, siis täiendavat konverteerimist ei teostata) v.a akukapp koos muude materjalidega, mille hinnanguline väärtus on arvestatud 1500 \$.

Vaadeldava akupatarei elementide hind on 388,5 /kWh (10642,2 \$). Konkreetse tootja (Winston Batteries) elementide ühikhind ei sõltu märkimisväärselt akuelemendi mõõtmetest ega mahtuvusest. Ühikhinna erinevus 40 Ah ja 700 Ah elemendi vahel on 1 \$.

Akuelementide ühendussildade all on mõeldud vaskklemme, mille abil elemendid järjestikku ühendatud. Nende maksumus oluliselt akupatarei ühikhinda ei mõjuta, kuid moodustavad siiski arvestava osa maksumusest (kokku 1123,5 \$)

Oluliselt tõstab BES-i ühikhinda BMS (BMS-de maksumus: 3145 \$). Antud akupatarei puhul on kasutusel kaks BMS-i, mille juures ei ole ära kasutatud nende maksimaalne võimekus elementide osas (võimalik täiendavalt lisada 74 elementi). Seetõttu mõne teise akupatarei konfiguratsiooni korral, kus ei ole kahe BMS-i kasutamine vajalik või on BMS-ga ühendatud maksimaalne arv elemente, väheneks energiasalvesti vastava komponendi ühikhind oluliselt.



Joonis 4.34 Akude ühikhinnad autotööstuses 2017 a. uuringu kohaselt: roheline- akupatarei ühikhind, punane- elemendi hind, sinine-akuelemendi materjali hind [55]

Akupatarei hinnanguline maksumus koos elementide, ühendussilde, BMS-i, akukapi ja muud materjalidega on 16410,72 \$ ning komplekteeritud süsteemi ühikhind 599,1 \$/kWh. Järgnevates arvutustes on energiasalvesti maksumuse arvutamisel aluseks võetud joonisel (Joonis 4.34) kujutatud elektrisõidukite akupatarei ühikhind 200 \$/kWh aastal 2018, ning tulemused on koondatud tabelisse (Tabel 4.14). Muude energiasalvesti komponentide hinda pole muudetud.

Tulemustest selgub, et akuelemendi hinna ligi 50 % muutus põhjustas kirjeldatud komponentides koosneva energiasalvesti hinnas 31 % muutuse. Arvestades Li-ioon akude lähiaastate hinnatrendi,

siis suure tõenäosusega on mõne aasta küsimus, mil jaemüügis müüdavate akude ühikhind on saavutanud taseme 200 \$/kWh.

Tabel 4.14 TTÜ mikrovõrgu energiasalvesti prognoositavad majanduslikud näitajad

Komponent	Hind [\$]	Arv [tk]	Summa [\$]	Summeritud ühikhind [\$/kWh]
Akuelemendid	25,6	214	5478	200,0
Ühendussillad	5,3	214	1124	241,0
BMS	1680	2	3145	355,8
Akukapp (kaitselülitid, kaabeldus, muu)	1500	1	1500	410,6
		Kokku	11246,9	

Lõputöö kokkuvõte

Lõputöö eesmärgiks oli koostada ülevaade mikrovrõrkude arengusuundadest ja TTÜ mikrovrõrgu stendi kuuluva Li-ioon akudega akupatarei käivitamine ja käivitusprotseduuri kirjeldamine. Energiasalvesti uurimiseks oli vajalik teostada laadimise ja tühjendamise tsükkel, mille käigus oli võimalik määrata energiasalvesti oluliste tehniliste parameetrite väärtused.

Töö esimeses pooles kirjeldati mikrovrõrgu struktuuri ja funktsioone. Mikrovrõrkude olulisemaks arengusuunaks on akupatareil põhinevate energiasalvestite kasutuselevõtt. Vastavale funktsionaalsusele orienteeritud energiasalvestiga mikrovrõrk suudab toimida avariitoiteallikana, stabiliseerida võrgusagedust ning parandada hajaasustuspiirkonna elektrivarustust.

Autor andis ülevaate energiasalvesti olulisematest koostisosadest ja nende omadustest. Akupatareiga energiasalvesti projekteerimisel tuleb akutüübi valikul lähtuda planeeritava mikrovrõrgu peamisest funktsioonist. Laialt levinud pliiakud on asendumas järk järgult Li-ioon akudega, mis omavad kõrget energiatihedust ja kasutegurit. Lisaks on Li-ioon akude senist kasutust piiranud akutehnoloogia kõrge hind, mis on nüüdseks pidevas langustrendis.

Lõputöös kirjeldati TTÜ laboratooriumis asuva mikrovrõrgu ülesehitust ja struktuuri. Vaadeldi neljast fiidrist koosneva mikrovrõrgu koostisosasid ning nende olulisemaid nimiandmeid. Samas peatükis kirjeldati koostisosade vahelist andmeside toimimise põhimõtet mikrovrõrgu siseses süsteemis.

Viimases peatükis kirjeldas autor TTÜ laboratooriumis asuva mikrovrõrgu koosseisu kuuluva akupatarei laadimise eelset seisukorda. Akupatarei parameetrite väärtused oli u. aastapikkuse perioodi jooksul isetühjenemise tõttu saavutanud kriitilise piiri ja akupatarei käivitamiseks oli vajalik akuelementide eraldiseisev laadimine.

Töös analüüsiti TTÜ laboratooriumis teostatud katsete põhjal elementide seisukorda, ning hinnati akuelemendi elutsükli jooksul toimunud omaduste muutusi. Autor kirjeldab praktilise tegevuskava vormis akupatarei käivitamisprotsessi, mis koosnes akuelementide laadimisest, laetud elementide montaažist ja energiasalvesti käivitamisprotseduuridest.

Töökorda seatud akupatareiga teostati laadimis- ja tühjenemiskatseid, mille käigus fikseeriti olulisemate tehniliste parameetrite väärtused ja katseandmete põhjal koostati energiasalvestussüsteemi laadimis- ja tühjendamiskarakteristikud. Nende põhjal saab hinnata akupatareisse sisenevaid ja väljuvaid energiavoogusid ja akuelementide parameetrite väärtusi protsessi toimimise käigus.

Akupatarei BMS-i balansseerimisvõimekuse hindamiseks energiasalvestiga teostati korduvaid laadimis- ja tühjendamistsükleid. Katsete tulemusena sai kinnitus asjaolu, et passiivse BMS-i balansseerimisvõimekus on madal. Ühe täistsükliga on antud tootja BMS suuteline suurendama akupatarei mahtuvuse väärtust 1,7% võrra. Autor pakub välja praktilisi lahendusi BMS-balansseerimisvõimekuse kompenseerimiseks.

Viimases alapeatükis analüüsib autor akupatarei majanduslike näitajaid, kus on kirjeldatud akupatareiga energiasalvesti hinna kujunemise protsessi.

Käesolevat lõputööd saab kasutada praktilise juhendina akupatarei töökorda seadmiseks ning laadimis- ja tühjenemistsükli teostamiseks. Töö ülesandes püstitatud eesmärgid said täidetud ning TTÜ laboratooriumis asuv mikrovõrgu koosseisu kuuluv akupatarei on töökorda seatud ja võimaldab teostada katseid mikrovõrkude täiendavaks uurimiseks.

Kirjandus

- [1] Momoh, J., Smart Grid. Fundamentals of Design and Analysis, Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2012.
- [2] Lehtla, T., Vinnal, T., Elektrivarustuse tulevikuvisioonid, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2016.
- [3] Hatziargyriou, N., Microgrids: Architectures and Control, First Edition, 2014.
- [4] Hatziargyriou, N., Microgrids Architecture and controls, Wilwy, 2014.
- [5] Dr Bruccoli, M., O'Halloran, K., Arup, „Microgrids: reliable power while integrating renewable generation,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.engineersjournal.ie/2014/07/17/microgrids-cork-renewable-distributed-generation/>. [Kasutatud 04. 04. 2018].
- [6] Awasthi, A., Karthikeyan, V., Das, V., K. Singh, A., „Energy Storage Systems in Solar-Wind Hybrid Renewable Systems,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/316258240_Energy_Storage_Systems_in_Solar-Wind_Hybrid_Renewable_Systems. [Kasutatud 02. 05. 2018].
- [7] Hiiemäe, H., „Elektrilevi OÜ sisedokument,“ Tallinn, 2017.
- [8] Rosin, A., Link, S., Hõimoja, H., Drovtar, I., Energiasalvestid ja -salvestustehnoloogiad, Tallinn, 2015.
- [9] Alaboudy, A.H.K., Zeineldin, H.H., Kirtley, J., „Microgrid Stability Characterization Subsequent to Fault-Triggered Islanding Incidents,“ IEEE, 2012.
- [10] „TESLA,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tesla.com/blog/Tesla-powerpack-enable-large-scale-sustainable-energy-south-australia>. [Kasutatud 12. 03. 2018].
- [11] „hornsdaleswindfarm,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://hornsdaleswindfarm.com.au/>. [Kasutatud 12. 03. 2018].

- [12] „Tesla big battery outsmarts lumbering coal units after Loy Yang trips,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <http://reneweconomy.com.au/tesla-big-battery-outsmarts-lumbering-coal-units-after-loy-yang-trips-70003/>. [Kasutatud 12. 03. 18].
- [13] Ning, N., „CNESA Storage Market Analysis,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <http://en.cnesa.org/featured-stories/2017/12/11/cnesa-storage-market-analysis-q3-2017>. [Kasutatud 18. 04. 2018].
- [14] „ABB PowerStore,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://new.abb.com/distributed-energy-microgrids/our-offering/powerstore-battery>. [Kasutatud 23. 04. 2018].
- [15] Reinok, J. (2017), „Mikrovõrgu energiasalvesti arendamine,“ Tallinn, 2017.
- [16] „xStorage Residential,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://uk.eaton.com/content/gb/en/products/electrical/xStorage.html>. [Kasutatud 19. 04. 2018].
- [17] Strong, S., „Building Integrated Photovoltaics (BIPV),“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wbdg.org/resources/building-integrated-photovoltaics-bipv>. [Kasutatud 15. 04. 2018].
- [18] „California Energy Commission,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.energy.ca.gov/releases/2018_releases/2018-05-09_building_standards_adopted_nr.html. [Kasutatud 16. 05. 2018].
- [19] „We power,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://wepower.network/wpr-token#>. [Kasutatud 29. 04. 2018].
- [20] Guerrero, J., Lu, X., Sun, K., Vasquez, J., „State-of-Charge Balance Using Adaptive Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in DC Microgrid Applications,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6584748/>. [Kasutatud 03. 05. 2018].
- [21] Nitta, N., Wu, F., Lee, J.T., Yushin, G., „Li-ion battery materials: present and future,“ Atlanta, 2015.
- [22] Chenab, H., Conga, T.N, Yanga, W., Tanb, C., Lia, Y., Dinga, Y., „Progress in electrical energy storage system: A critical review,“ Sience Direct, Leeds, 2009.

- [23] Shi, J., Xia, Y., Yuan, Z., Hu, H., Li, X., Zhang, H., Liu, Z., „Porous membrane with high curvature, three-dimensional heat-resistance skeleton: a new and practical separator candidate for high safety lithium ion battery,“ *Scientific Reports*, Zhejia, 2015.
- [24] Bartlett, D., Herman, T., Klinkman, A., „BUSINESS MODELS FOR EXTRACTING MORE USEFUL LIFE,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/14080/Final%20Masters%20Project%20-%20Bartlett_Herman_Klinkman%20-%20Second%20Life%20Li-ion.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Kasutatud 04. 05. 2018].
- [25] Manthiram, A., „An Outlook on Lithium Ion Battery Technology,“ *ACS Central. Science*, Austin, 2017.
- [26] Mägi, M., *Elektriauto energiasalvesti ja elektriyaotusvõrgu energiavahetusprotsesside uurimine ja juhtimine*, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2013.
- [27] Poullikkas, A., „A comparative overview of large-scale battery systems,“ *Electricity Authority of Cyprus*, Nicosia, 2013.
- [28] Ruetschi, P., „Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries,“ *Grandevent*, 2004.
- [29] „Carbon Lead Battery,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.giantpower.com.au/batteries/1800AH-2V-Carbon-Lead-Battery>. [Kasutatud 02. 04. 2018].
- [30] Divya, K.C., Østergaard, J., „Battery energy storage technology for power systems—An overview,“ *Technical University of Denmark*, Lyngby, 2008.
- [31] Rydh, C.J., Sandén, B. A., „Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements,“ *Elsevier*, 2005.
- [32] C.Nair, N-K., Garimella, N., „Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration,“ *Auckland*, 2010.
- [33] Zhu, W.H., Zhu, Y., Tatarchuk, B.J., „Self-discharge characteristics and performance degradation of Ni-MH batteries for storage applications,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991402672X>. [Kasutatud 19. 04. 2018].

- [34] „Battery University,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries. [Kasutatud 04. 01. 2018].
- [35] Wen, Z., Hu, Y., Wu, X., Han, J., Gu, Z., „Main Challenges for High Performance NAS Battery: Materials and Interfaces,“ WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2013.
- [36] Wang, W., Luo, Q., Li, B., Wei, X., Li, L., Yang, Z., „Recent Progress in Redox Flow Battery Research and Development,“ 2012.
- [37] Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval E., Milanes-Montero, M.I., Guerrero-Martinez, M.A., „Battery equalization active methods,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313013669>. [Kasutatud 15. 04. 2018].
- [38] „Orion BMS manual,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.orionbms.com/manuals/utility/>. [Kasutatud 01. 05. 2018].
- [39] „Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6043010/>. [Kasutatud 01. 05. 2018].
- [40] „Isabellenhuettenwerke,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.isabellenhuettenwerke.de/fileadmin/Daten/Praezisionsmesstechnik/Datasheet_IVT-S.pdf. [Kasutatud 02. 05. 2018].
- [41] „Vacon NX Active Front End User Manual - Danfoss Drives,“ [Võrgumaterjal]. Available: drives.danfoss.ru/workarea/downloadasset.aspx?id=17179980613. [Kasutatud 14. 05. 18].
- [42] Korõtko, T., Peterson, K., Pettai, E., Möller, T., Rassõlkin, A., Janson, K., „Energiasalvestiga alajaama arendamine,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2015.
- [43] „Orion BMS – Extended Size,“ Orion, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.orionbms.com/products/orion-bms-original/>. [Kasutatud 28. 11. 2015].
- [44] „DHR C420 - Current Transducer manual“.
- [45] „Magna Power Programmable DC Power Supply,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://magna-power.com/products/magnadc/ts>. [Kasutatud 29. 04. 2018].

- [46] „Vacon 8000 solar inverters,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://pdf.directindustry.com/pdf/vacon/vacon-8000-solar-inverter/7193-301131.html>. [Kasutatud 24. 04. 2018].
- [47] „SynchroMax PID datasheet“.
- [48] „Detailed information for: ACS550-01-023A-4,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://new.abb.com/products/ACS550-01-023A-4>. [Kasutatud 14. 04. 2018].
- [49] „RTU32 Series – Powerful Compact Utility RTU Datasheet,“ 2011.
- [50] „GWL Power,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/>. [Kasutatud 05. 04. 2018].
- [51] Agubra, V., Fergus, J., „Lithium Ion Battery Anode Aging Mechanisms,“ Auburn, 2013.
- [52] Chen, Z., Chris Mi, C., „Loss-Minimization-Based Charging Strategy,“ IEEE, 2015.
- [53] „Winston Battery,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp40aha?category_id=176. [Kasutatud 01. 04. 2018].
- [54] „Graohtec GL200 service manual,“ [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.graphteccorp.com/support/manuals/GL200/GL200-UM-251%20\(03-9370\).pdf](http://www.graphteccorp.com/support/manuals/GL200/GL200-UM-251%20(03-9370).pdf). [Kasutatud 02. 04. 2018].
- [55] Menahen, A., „xEV Industry Report,“ 2017.

Lisad

L.1 BMS-i tarkvaras kasutatava tähistuse ja tegelike akuelementide tähistuse seos

L.2 Akuelementide ühendusvaade

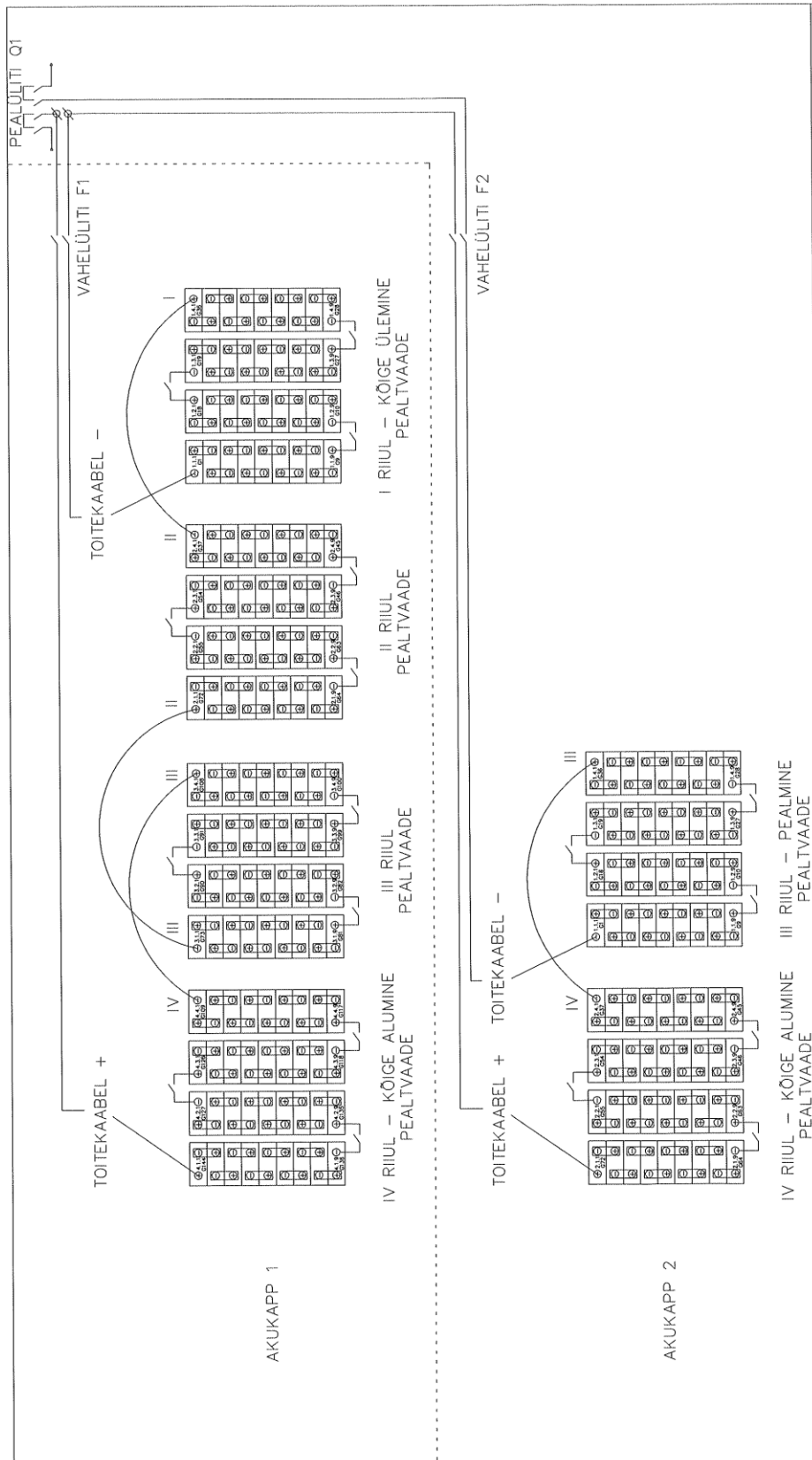
L3. Mikrovõrgu PC kasutajaliidese avamise juhend

L4.Mikrovõrgu ELFAK stsenaariumi käivitamine

L.1. BMS-i tarkvaras kasutatava tähistuse ja tegelike akuelementide tähistuse seos

Tegelik	BMS		Tegelik	BMS		Tegelik	BMS		Tegelik	BMS
G1	109		G37	73		G73	37		G109	1
G2	110		G38	74		G74	38		G110	2
G3	111		G39	75		G75	39		G111	3
G4	112		G40	76		G76	40		G112	4
G5	113		G41	77		G77	41		G113	5
G6	114		G42	78		G78	42		G114	6
G7	115		G43	79		G79	43		G115	7
G8	116		G44	80		G80	44		G116	8
G9	117		G45	81		G81	45		G117	9
G10	118		G46	82		G82	46		G118	10
G11	119		G47	83		G83	47		G119	11
G12	120		G48	84		G84	48		G120	12
G13	121		G49	85		G85	49		G121	13
G14	122		G50	86		G86	50		G122	14
G15	123		G51	87		G87	51		G123	15
G16	124		G52	88		G88	52		G124	16
G17	125		G53	89		G89	53		G125	17
G18	126		G54	90		G90	54		G126	18
G19	127		G55	91		G91	55		G127	19
G20	128		G56	92		G92	56		G128	20
G21	129		G57	93		G93	57		G129	21
G22	130		G58	94		G94	58		G130	22
G23	131		G59	95		G95	59		G131	23
G24	132		G60	96		G96	60		G132	24
G25	133		G61	97		G97	61		G133	25
G26	134		G62	98		G98	62		G134	26
G27	135		G63	99		G99	63		G135	27
G28	136		G64	100		G100	64		G136	28
G29	137		G65	101		G101	65		G137	29
G30	138		G66	102		G102	66		G138	30
G31	139		G67	103		G103	67		G139	31
G32	140		G68	104		G104	68		G140	32
G33	141		G69	105		G105	69		G141	33
G34	142		G70	106		G106	70		G142	34
G35	143		G71	107		G107	71		G143	35
G36	144		G72	108		G108	72		G144	36

L.2. Akuelementide ühendusvaade



L.3. Mikrovõrgu PC kasutajaliidese avamise juhend

PC Kasutajaliidese avamine

1. Käivita arvuti. Password on *elmo*
2. Ühenda PC võrgukaabli abil switchi.
3. Veendu ühenduse olemasolus, *pingides* PLC-d. Selleks vajutage klahvikombinatsiooni *Windows+R*, trükkige sinna „cmd“ ning vajutage *ENTER*. Avaneb Windowsi süsteemi konsool.
4. Trüki Windows süsteemi konsooli „ping 192.168.0.100“. Kui vastus on:
 - a. „Reply from 192.168.0.100: bytes=32 time=1ms TTL128“ või midagi sarnast, on ühendus PLC-ga olemas ning Windows süsteemi konsooli võib sulgeda ning jätkata punktiga nr. 4.
 - b. „Request timed out.“ – PLC-ga ei saa ühendust. Peaks proovima muuta arvuti IP aadressi:
 - i. Vajuta „Windows“ klahvi ning trüki „Search“ väljale „Network and sharing center“ ning vali „Control Panel“ valimi all „Network and Sharing Center“.
 - ii. Vali vasakult menüüst „Change Adapter Settings“.
 - iii. Vali „Local area connection“ ning tee sellel paremklõps ja vali „Properties“.
 - iv. Avanenud aknas leia „Internet Protocol Version 4(TCP/IPv4), vajuta sellel ning vali „Properties“.
 - v. Tee linnuke lahtris „Use the following IP address“ ning trüki väljale:
 1. IP address: 192.168.0.55
 2. Subnet mask: 255.255.255.0
 - vi. Vajuta „OK“ ning seejärel „Close“
 - vii. Proovi uuesti PLC-d *pingida* (Punkt 3). Kui saad taaskord vastuseks „Request timed out“, veendu et oled ikka switchiga ühendatud. Kui oled selles veendunud, konsulteeri vastava valdkonna spetsialistiga.
5. Ava töölaual (Desktop) oleva ikooni „RTU View“ abil programm „X5Viewer“.
6. „X5Viewer“ programmi menüüst vali *File* → *Open from file* → „ELFAK_1.X5T“ (Visualiseerimisrakenduse faili tee: „C:\Alajaam tarkvarad\STRATON\ESS_v00\ELFAK.X5T“).
7. „X5Viewer“ programmi menüüst vali *View* → *Status bar* (eemalda linnuke *Status bar* valiku eest). Maksimeeri programmiaken üleval paremal nurgas asuva ruudukujulise nupu abil.
8. Parema kuva saavutamiseks, peida Windowsi käsupaneel (Taskbar):
 - a. Tee käsupaneelil paremklõps ning vali „Properties“.
 - b. Tee linnuke valiku juures „Auto-hide taskbar“ (tagasi saamiseks võta linnuke uuesti ära)
9. Pildi kuvamiseks ühendatud ekraaniga, vajuta „Windows“ + P ning vali „Projector Only“ (arvutisse tagasi samamoodi aga valik „computer only“).
10. Kui TV ühendatud, vali screen resolution ekraan II peal 1920x1080

NB!

*Ühenda läpakas laadima

*Windows control panel -> power option -> high performance -> kõik never peale

L.4. Mikrovõrgu ELFAK stsenaariumi käivitamine

Energiasalvesti ja mikrovõrgu käivitusjuhend

63A pesa sisse -> 63A automaat sisse standile -> 3VL sisse -> Akupatarei pealüliti sisse
VT KÄIVITAMINE (messi hommikul)

1. Kilbi „MIKROVÕRK“ uksele asuvad juhtnupud peavad olema järgmistes asendites:
 - a. „JAOTUSVÕRK“ – K;
 - b. „PÄIKSEJAAM DC“ – A;
 - c. „PÄIKSEJAAM AC“ – A;
 - d. „TARBIAJAD“ – A.

Hoia UPSil „ON“ nuppu pikalt peal kuni „INVERTER“ asendisse.

2. Kontrolli, kas kõik „HÄDASTOPP“ turvalülid on seatud rakendamata asendisse
Kontrolli, et AC isol.seadmel pole veateadet (vajadusel „RESET“ nuppu all hoida)
3. Kontrolli kas kilbis „EN. SALVESTI MP JP“ asuvad releed KB2 ja KB3 on rakendunud, kui ei, siis vajuta kilbis asetsevat lüliti „S5“ ca. 3 sekundit.
4. Kui energiasalvesti operaatorpaneel on visualiseerimise rakenduse käivitanud, vajuta selle menüüs klahvil „SEADED“.
 - a. Kui kasutaja pole sellel hetkel sisse logitud, avatakse sisselogimise aken. Sisesta vastavalt kasutajanimi: *admin* ja parool: *elmo* ning vajuta „OK“, misjärel on vaja uuesti vajutada klahvil „SEADED“.
5. Veendu, et energiasalvesti kilbi uksele asuv „DC EELLAADIMINE“ lüliti on asendis 0.
6. Kontrolli, kas energiasalvesti operaatorpaneeli „SEADMED“ ekraanil on seadme töörežiimiks valitud „Pac“ (roheline kastike), *Pac Eiteanne = 0 kW* ning *ESS REŽIIM = „STOPPED“*.
 - a. Kui *ESS REŽIIM <> „STOPPED“*, vajuta operaatorpaneeli „SEADED“ ekraanil klahvil „SEISKU KOHESELT“.
7. Kui eelnevad tingimused on kõik täidetud, alles siis vajuta energiasalvesti operaatorpaneeli „SEADED“ ekraanil kõigepealt klahvi „LÄHTESTA“ ning seejärel klahvi „KÄIVITU“.
8. Peale „J.V V.LÜLITI“ indikaatoritule süttimist energiasalvesti kilbi uksele, pööra „DC EELLAADIMINE“ lüliti asendist 0 asendisse 1 ning seejärel asendisse START (tagastub asendisse 1).
9. Kui energiasalvesti kilbi uksele on süttinud indikaator „STANDBY“, vajuta energiasalvesti operaatorpaneeli „SEADED“ ekraanil klahvile „TÖÖTA“ (standby lamp kustub).
10. Kui energiasalvesti kilbi uksele on süttinud „AKUD ÜHENDATUD“ indikaator, vajuta energiasalvesti operaatorpaneeli ekraanil „SEADED“ asuvale klahvile „ELFAK Seaded“.
11. Vajuta energiasalvesti operaatorpaneeli ekraanil „ELFAK Seaded“ klahvile „KÄIVITA STSENAARIUMID“.
12. Navigaatori energiasalvesti operaatorpaneelil uuesti avaekraanile, vajutades esmalt klahvile „TAGASI“ ning seejärel menüüribal „ENGLISH“ -> menüüribal „LOG OFF“ -> menüüribal olevale klahvile „MIKROVÕRK“.
13. 8000 Solar inverteri juhtpaneelil vajuta klahvile „Enter“ (alumise ovaalne nupp), oota ca. 20 s. ning vajuta klahvile „Select“ (siis solari display enam ei vilgu).

ELFAK SEADED -> EDASI (järgmisele stseenile üleminek / skippimine)