

**TAL  
TECH**

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO**

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**UNIVERSAALNE ELEKTRITOITESÜSTEEM  
SEADMETE AUTONOOMSEKS KASUTAMISEKS**

**ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEM FOR THE  
AUTONOMOUS USE OF DEVICES  
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Tamur Talviku

Üliõpilaskood: 185877EAAB

Juhendaja: Lauri Kütt

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

## **AUTORIDEKLARATSIOON**

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

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

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina \_\_\_\_\_ (autori nimi)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ ,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

\_\_\_\_\_ ,

(juhendaja nimi)

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

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

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

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

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

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

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Tamur Talviku

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Universaalne elektritoitesüsteem seadmete autonoomseks toiteks

*Kuupäev:*  
18.05.2022

62 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* Lauri Kütt

*Töö konsultant (konsultandid):* Martin Jaanus

*Sisu kirjeldus:*

Lõputöö kirjeldab Tallinna Tehnikaülikooli õppelaborites kasutatud M2M analüsaatori toiteks mõeldud akudel põhineva elektritoitesüsteemi arendamist. Kujundatav süsteem sisaldab akulaadijat ja energiahaldussüsteemi, mille abil on võimalik väliseid seadmeid toita. Esitatav toitesüsteem on ka laiemat kasutust võimaldav, s.t vajadusel saaks seda ka rakendada muude sobilike seadmete toiteks. Seadme tööoleku parameetrid on jälgitavad nii seadme osaks olevalt kuvarilt kui ka andmesideühenduse kaudu. Mugavuse ja töökindluse eesmärgil plaaniti kasutada juhtmevaba toitelahendust akude laadimiseks.

Töö käigus seatakse vajalikud lähtespetsifikatsioonid ja nõuded tööle, tutvustatakse kaitse- ja talitluskindlusfunktsioone ning kujundatakse seejärel nõuetele vastav terviklik süsteem. Esitatud on olulisimate komponentide valiku alused ning arvutatakse nende parameetrite seadmiseks vajalikud väärtused.

Lõputöö tulemusena kujundati kõikidele lähtespetsifikatsioonidele vastav elektriskeem, kaitseahelate ja energiahaldusfunktsioonidega. Läbi on viidud esmased katsed funktsioonide kontrolliks.

*Märksõnad:* aku, aku laadimine, trükkplaat, elektritoide

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Tamur Talviku	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Electrical power supply system for the autonomous supply of devices	
<i>Date:</i> 18.05.2022	<i>62 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Lauri Kütt	
<i>Consultant(s):</i> Martin Jaanus	
<i>Abstract:</i> <p>Thesis presents an overview of the developments of a battery-powered electric power supply for the M2M power meters used in study laboratories of Tallinn University of Technology. The developed electric power supply includes battery charger and energy management subsystem. The presented solution is available for more universal use, i.e it can be used for various devices' power supply. The operating parameters of the system are displayed on an integrated display but are also available via data connection to external system. For the more reliable but also comfortable user experience, the battery charging is intended to be carried out via wireless power transfer.</p> <p>In the thesis, specifications and requirements are declared, protection and operational functionality is introduced and full system designed. Selection criteria for the most critical components is presented, calculations carried out for the most essential parameters.</p> <p>Result of the thesis is an electric layout of the system corresponding to the initial requirements, protective circuits and energy management functions. Initial tests are done for the verification of the functionality.</p>	
<i>Keywords:</i> battery, battery charging, power supply, PCB design	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Elektritoitesüsteem laboriseadmete autonoomseks kasutamiseks</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Electrical power supply system for the autonomous use of laboratory devices</b>
Üliõpilane:	<b>Tamur Talviku, 185877EAAB</b>
Eriala:	
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Lauri Kütt</b>
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	<b>Martin Jaanus</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>2022/2023</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>18.05.2022</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

---

Kaasjuhendaja (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Õppelaborites on kasutusel valik mõõteriistu, millest osad vajavad tööks vahelduvvoolu-võrgutoidet. Nende mõõteriistade võimekus on töötada ka alalisvoolu-toitelt, varustades seadmed akudega on võimalik nende kasutamine ka välise võrgutoite vabalt. Selleks on vaja platvormi, mis korraldaks akude laadimist, akude taseme jälgimist, toite sisse- ja väljalülitamist ja toitepinge taseme muundamist.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on kujundada modulaarse ülesehitusega süsteem, mis võimaldaks seda kasutada erinevates seadmetes, erineva aku mahuga ja erineval väljundpingel. Täiendavalt on vajalik paindliku ja töökindla akude laadimislahenduse väljatöötamine.

### **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- 1) Milliste komponentidega ja skeemiga on võimalik realiseerida töökindel akuhaldussüsteem?
- 2) Kuidas on võimalik teostada toiteväljundi sisse- ja väljalülitused?
- 3) Kuidas on võimalik teostada töökindel akulaadimislahendus?

### **4. Lähteandmed**

Lähteandmeteks on näite-mõõtevahendi parameetrid andmelehel. Täiendavalt akude ja akulaadimislülituste andmelehed ja rakendusmärkmehed.

### **5. Uurimismeetodid**

Töö alguses on sisendiks analüütiliselt leitud, algandmetel tuginevad põhiparameetrite arvutused. Arvutused teostatakse Exceli tarkvaras. Näitelahenduste põhjal kujundatakse elektriskeemid, trükkplaadid. Loodud lahenduse töökindluse kontroll toimub realselt valmishitatud seadmel. Valmis seadmel kontrollitakse parameetreid mõõtmiste teel.

### **6. Graafiline osa**

Elektriskeemid, struktuuri skeemid, parameetrite tabelid, komponentide joonised. Graafiline osa on nii töö põhiosas aga ka lisades.

### **7. Töö struktuur**

1. Sissejuhatus. Toitemuundurite ja akude põhiparameetrid.
2. Näidis-laborseadme üldvaade ja parameetrid, nõuded toitesüsteemile.
3. Põhikomponentide valik akutoite-osale
4. Akulaadimisskeemi kujundamine
5. Juhtmeta toite ülekandesüsteemi komponentide valik
6. Juhtmeta toite ülekandesüsteemi skeemi kujundamine
7. Haldus ja sisse/väljalülitus-üksuse kujundamine
8. Ülevaade komponentide valikust elektriskeemile
9. Valmis seadme katsetamine ja parameetrite kontroll
10. Kokkuvõte ja järeldused

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

Andmelehed

ABB M2M

LTC4015

LiFePo 18650 akude datasheet

## **9. Lõputöö konsultandid**

Lauri Kütt – laboriseadme vajadused, süsteemi üldised töötingimused

## **10. Töö etapid ja ajakava**

18.05.2022 – valmis lõputöö esitamine



# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	6
EESSÕNA .....	11
Lühendite ja tähiste loetelu .....	12
1. SISSEJUHATUS.....	15
1.1 Nõuded süsteemile.....	16
1.1.1 Kasutus ja ühendumine muude seadmetega .....	16
1.1.2 Peamised funktsionaalsed suurused .....	18
1.1.3 Töökeskkond ja ohutus .....	18
1.1.4 Nõuded aku mahutavusele .....	19
1.2 Kujundatava toitesüsteemi eeldatav struktuur .....	21
1.3 Akutehnoloogia.....	21
1.3.1 Liitumioonaku laadimine .....	21
1.3.2 Aku laetuse monitooring .....	22
1.4 Turul olevad moodulid .....	24
2. Põhifunktsioonid .....	28
2.1 Arendatav struktuurskeem .....	28
2.2 PARAMEETRITE MÄÄRAMINE .....	29
2.3 TALITLUSVIISID JA PIIRANGUD .....	31
2.4 KAITSE RAUDVARAS JA KOMPONENDID .....	32
2.4.1 Akulaadija kaitseskeem .....	32
2.4.2 Polaarsuskaitse .....	32
2.4.3 Voolukaitse.....	33
2.4.4 Liigpinge kaitse .....	33
2.4.5 Komponentide valik. ....	33
3. Komponentide valik .....	36
3.1 Sisendtoide .....	36
3.2 Aku.....	38
3.3 Akulaadija valik .....	40
4. Akulaadija alamüksus ja põhikomponentide arvutused .....	43
5. Energiahaldussüsteem ja selle komponendid .....	49
5.1 Eesmärk .....	49

5.2 Mikrokontroller .....	49
5.3 Toitelülitid.....	51
5.4 Komponentide valik .....	52
5.4.1 Mikrokontroller.....	52
5.4.2 MOSFET lülitid .....	53
5.4.3 Kaitseahel .....	53
5.5 Monitooring.....	53
5.5.1 Mõõtereister .....	54
5.5.2 Olekuregister .....	54
5.5.3 Seaderegister .....	54
5.5.4 Hoiatusregistrid.....	54
5.6 Olekuparameetrite arvutus .....	55
5.6.1 Aku laetustase .....	55
5.6.2 Tarbitav võimsus.....	56
5.6.3 Tööaeg aku tühjenemiseni.....	56
5.7 Energiahaldussüsteemi algoritm .....	56
6. Praktilised katsed .....	58
6.1 Katseskeem ja komponendid.....	58
6.2 Katsete käik.....	59
KOKKUVÕTE .....	61
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	62
LISAD .....	66

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema valik tulenes akudel põhineva, mugava ja universaalse, mõõteseadmele M2M suunatud toitemooduli puudumisest õppelaboris. Teema valiku pakkus välja elektroenergeetika ja mehhatroonika programmijuht ning professor Lauri Kütt, kes antud süsteemi puudumist märkas. Ühtlasi oli Lauri Kütt ka lõputöö juhendaja.

Kõik töö käigus tehtud katsed sooritati Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi õppelaborites.

Siinkohal sooviksin tänada professor Lauri Kütti meeldiva koostöö eest lõputöö valmimisel.

## Lühendite ja tähiste loetelu

$\Delta E^*$  - aku tühjenemistase

$\Delta I_{p-p}$  - voolu pulseerimine induktiivpoolil

$\Delta T$  - temperatuur võrreldes 25°C tasemega

$\Delta V_{SYS}$  - süsteemipinge pulsatsiooni tase

$A_{kas}$  - kasulik töö

$A_{kogu}$  - kogu töö

$a_n$  - geomeetrilise jada element

$a_{n-1}$  - geomeetrilise jada eelmine element

$C_{BAT}$  - aku poolne kondensaator

$C_{RSS}$  - paisu ja neelu vaheline mahtuvus

$C_{SYS}$  - süsteemi poolne kondensaator

$E^*$  - aku laetustase

$E_{aku,min}$  - aku minimaalne nõutav mahutavus vatt-tundides

$E_{ES}(t)$  - aku energiajäak

$E_{ES,N}$  - aku nimimahutavus

$ESR_{CBAT}$  - kondensaatori  $C_{BAT}$  takistus

$ESR_{CSYS}$  - kondensaatori  $C_{SYS}$  takistus

$f$  - lülitussagedus

$F_{LYL(MHz)}$  - lülitussagedus, ühikutes MHz

$f_{SW}$  - lülitussagedus

I<sup>2</sup>C - mitme võimaliku ülemaga jadasiin (ingl k *Inter-Integrated Circuit*)

$I_{aku}$  - akult toidetav toiteväljund, koormusvool

$I_{CHG(MAX)}$  - maksimaalne laadimisvool

$I_{IN(MAX)}$  - maksimaalne sisendvool

$I_k$  - välisseadme alamosa „k“ poolt tarbitav vool

$I_{M2M}$  - võrguanalüsaatori M2M tarbitav vool

$I_{MK}$  - mikrokontrolleri tarbitav vool

$I_{sis}$  - sisednvool välisest toiteallikast

$I_{välj,otse}$  - välise otsetoiteühenduse vool

$L$  - LTC4015 akulaadija induktiivpool

LCD - vedelkristallkuvar (ingl k *Liquid Crystal Display*)

LCD - vedelkristallkuvar (ingl k *Liquid Crystal Display*)

MOSFET - isoleeritud paisuga väljatransistor (ingl k *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*)

$N_{elemente}$  - akuelementide arv

OLED - orgaaniline valgusdiood (ingl k *organic light-emitting diode*)

$P_{aku}$  - sisendtoitelt nõutav võimsus

$P_{COND(BOT)}$  – alumise väljatransistori juhtivuskadu  
 $P_{COND(TOP)}$  – ülemise väljatransistori juhtivuskadu  
 $PG$  – paisu laadimise kadu  
 $P_{M2M+MK}$  – välisseadme summaarne tarbitav võimsus ilma kasutegurita  
PTC – isetaastuv kaitse (ingl k *polymeric positive temperature coefficient device*)  
 $P_{TRAN}$  – MOSFET-i üleminekukadu juhtivast kinnisesse asendisse  
 $P_V$  – välisseadme summaarne tarbitav võimsus koos kasuteguriga  
 $P_{väljund}$  – välisseadme nõutav võimsus  
 $Q_{BOT}$  – alumise väljatransistori paisu laeng  
 $Q_G$  – paisu laeng  
 $Q_{GTOP}$  – ülemise väljatransistori paisu laeng  
 $Q_{min}$  – nõutav minimaalne aku mahutavus amper-tundides  
 $Q_{XTAR}$  – XTAR 3300 mAh aku mahutavus amper-tundides  
 $R_{DS(ON)}$  – väljatransistori lätte ja neelu vaheline takistus, kui väljatransistor on juhtivas asendis  
 $R_{SNSB}$  – laadimisvoolu mõõtmiseks mõeldud šunttakisti  
 $R_{SNSI}$  – sisendvoolu mõõtmiseks mõeldud šunttakisti  
 $R_T$  – LTC4015 lülitussageduse määrav takisti, kilo-oomides  
 $T_{keskk}$  – ümbritseva keskkonna temperatuur  
 $t_{nõutav}$  – seadme nõutav tööaeg  
TVS diod – supressordiod (ingl k *transient voltage suppressor diode*)  
 $U_{aku}$  – akult toidetav toiteväljund, ping  
 $U_{aku,tüüp}$  – XTAR 3300 mAh aku tüüpiline akupinge  
UART – asünkroonse jadaliides (ingl k *Universal asynchronous receiver-transmitter*)  
 $U_k$  – välisseadme alamosa „k” poolt kasutatav ping  
 $U_{M2M}$  – võrguanalüsaator M2M toitepinge  
 $U_{MK}$  – mikrokontrolleri toitepinge  
 $U_{PL(N-KANAL)}$  – paisu ja lätte vaheline ping N-kanaliga MOSFET-il  
 $U_{PL(P-KANAL)}$  – paisu ja lätte vaheline ping P-kanaliga MOSFET-il  
USB – universaalne järjestik siin (ingl k *Universal Serial Bus*)  
 $U_{sis}$  – stisendpinge välisest toiteallikast  
 $U_{šTP}$  – šunttakisti ping tundlikkuspiir  
UVCLFB – LTC4015 akulaadija pin, mis takistab liiga madala sisendpinge korral akulaadija töö  
 $U_{välj,otse}$  – välise otsetoiteühenduse ping  
 $V_{BAT}$  – akude maksimaalne ping  
 $V_{BAT(MAX)}$  – maksimaalne akupinge  
 $V_{IN}$  – sisendpinge

$V_{IN(MAX)}$  – maksimaalne süsteemi sisendpinge

$V_{SYS}$  – maksimaalne süsteemi sisendpinge

$\eta$  – kasutegur

$\delta$  – temperatuuritegur, väljatransistoride jaoks tüüpiliselt  $0,005/^{\circ}\text{C}$

# 1. SISSEJUHATUS

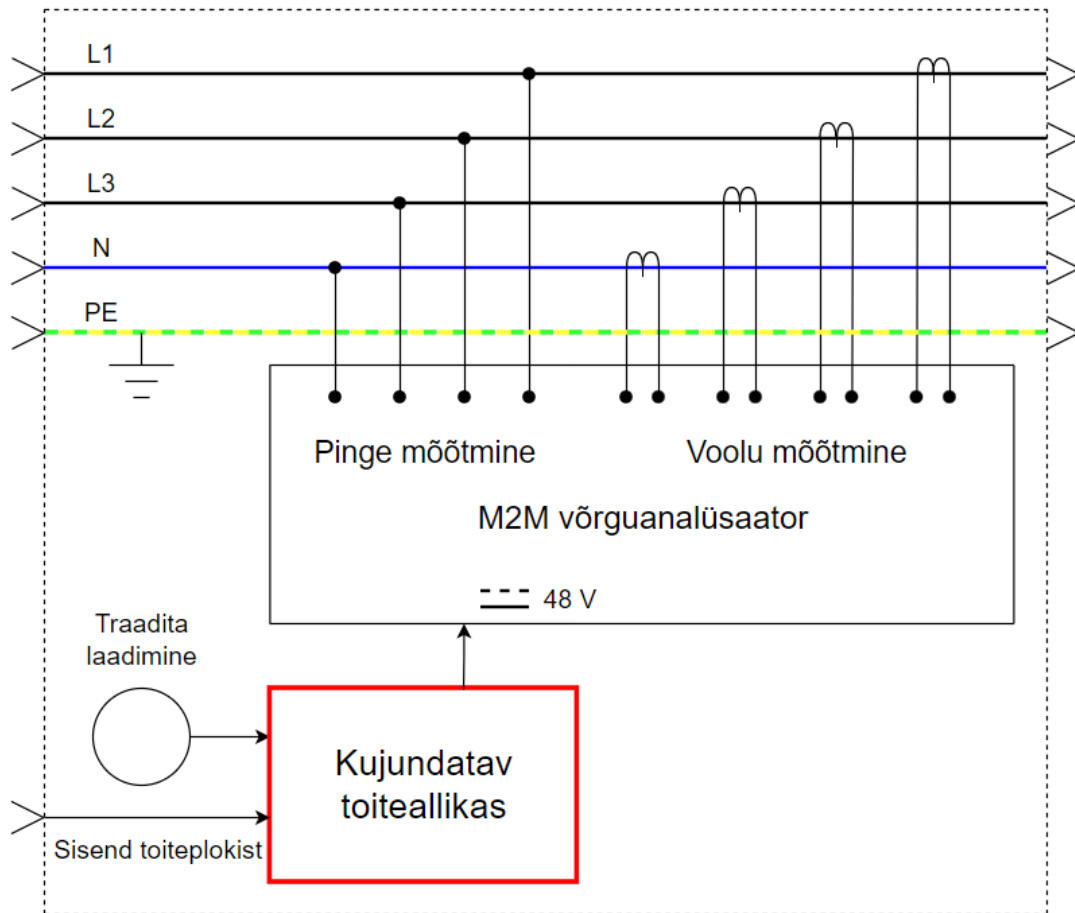
Lõputöö eesmärgiks on kujundada toitesüsteem, mis on ette nähtud eeskätt õppelaboris kasutatavate mõõteseadmete toiteks. Näitena sellisest seadmest võib tuua 3-faasilise võrguanalüsaatori ABB M2M (vt Joonis 1.1) [1], mis on ka elektrotehnika laborites kasutamiseks hangitud.



Joonis 1.1 ABB võrguanalüsaator M2M [1]

ABB võrguanalüsaator M2M on digitaalne mõõteseadme, mis suudab mõõta nii 3- kui 1-faasilise süsteemi mitmeid erinevaid elektrilisi parameetreid ning energiatarvet. [1]

M2M analüsaator on ette nähtud toiteks võrgupingel. Vajalik on kasutada seda ka ülejäänud ahela suhtes pingevabas olukorras. Kujundatava toitesüsteemi ülesanne on tagada M2M analüsaatori toide terveks laboratoorseks päevaks. Kujundava toitesüsteemi positsioon on näitena esitatud M2M analüsaatori tugisüsteemina joonisel.



Joonis 1.2 Kujundatava toiteallika positsioon M2M analüsaatori skeemil

## 1.1 Nõuded süsteemile

Lõputöö eesmärgiks on koostada elektritoite süsteem, mis oleks võimeline varustama energiaga autonoomselt, akule toetuvalt, eeskätt laboratoorseid mõõte- ja ehitatavaid katseseadmeid.

Lähtespetsifikatsioon on alljärgnev:

### 1.1.1 Kasutus ja ühendumine muude seadmetega

- **Välised toiteallikad** – välised toiteallikad on vajalikud seadmes oleva aku laadimiseks.
  - **Toitesisend 1:** Traadita energia ülekandega laadimismoodul
  - **Toitesisend 2:** Välise toiteallika juhtmeühendus



- **Toidetavad välisseadmed** – süsteemi eesmärk on toita väliseid seadmeid läbi ühenduse aku klemmidelt ja välisest toiteallikast.
  - **Toiteväljund 1:** akult toidetav seade, väljalülitatav kaitsefunktsiooniga aku tühjenemisel. Koormus kuni 16,8 W. Märkus: toiteväljundite 1 ja 2 lubatud summaarne koormus.
  - **Toiteväljund 2:** akult toidetav seade, väljalülitatav kaitsefunktsiooniga aku tühjenemisel. Koormus kuni 16,8 W. Märkus: toiteväljundite 1 ja 2 lubatud summaarne koormus.
  - **Toiteväljund 3:** Otsetoide välisest toiteallikast, väljalülitatav. Koormus kuni 9 W.
  - **Toiteväljund 4:** Otsetoide välisest toiteallikast, väljalülitamiseta. Koormus kuni 9 W.

- **Andmeühendused**

Andmeühendus peab võimaldama muu süsteemi ühendamisel edastada aku oleku taseme ja süsteemi talitusinfot, samuti välise seame poolt antud korralduse alusel lülitada välisseadmete toite välja.

Andmeühendus välise seadmega toimub asünkroonse jadaliidese (ingl.k *universal asynchronous receiver transmitter*, UART) ühenduse kaudu, kasutades ühte andmeliini andmete edastamiseks ja ühte andmeliini andmete vastuvõtuks. UART signaliseerimispinge on seejuures 0 ... 5 V.

- **Indikatsioon**

Süsteemil peab olema indikatsioon tema talitusoleku kohta, lisaks ka indikeerima põhilisi talitlussuursusi:

- välise toite olemasolu indikatsioon valgudiodiga;
- aku laadimise indikatsioon valgusdiodiga;
- tühja aku indikatsioon valgusdiodiga;
- helisignaal talitluse jaoks ebasobivas olukorras;

- o vedelkristalltabloo kaudu põhisuuruste numbriline indikatsioon (aku pinge, aku laetustase, eeldatav aku kasutusaeg tühjenemiseni, eeldatav aku laadimisaeg täitumiseni).

### 1.1.2 Peamised funktsionaalsed suurused

Süsteemi kujundamise aluseks olevad lähtesuurused on kirjeldatud allolevas tabelis (vt Tabel 1.1).

Tabel 1.2 Süsteemi kujundamise aluseks olevad lähtesuurused

Parameeter	Tähis	Nimi- ja piirtasemed	Märkused
Sisendpinge välisest toiteallikast	$U_{sis}$	Nimipinge: 12 V Lubatud: 8,4 ... 18 V	Nii välise toiteallika kui traadita laadimise moduli sisendid
Sisendvool välisest toiteallikast	$I_{sis}$	Nimivool: 2 A* 0 ... 3 A	
Välise otse-toiteühenduse pinge	$U_{välj,otse}$	Sama, mis sisendpinge välisest toiteallikast 8,4 ... 18 V	Läbiv toiteühendus otse välisest allikast või traadita laadimise moodulist
Välise otse-toiteühenduse vool	$I_{välj,otse}$	0,5 A	
Akult toidetav toiteväljund, pinge	$U_{aku}$	6,4 ... 8,4 V	Sõltub aku laetustasemest. Reguleerimata pinge, kasutuse ajal võib varieeruda.
Akult toidetav toiteväljund, koormusvool	$I_{aku}$	2 A	
Ümbritseva keskkonna temperatuur	$T_{keskk}$	10 – 30 °C	Kujundatud kasutuseks siseruumis

\* Nimivool määratud vastavalt aku mahtuvusele (leitud punktis 5)

### 1.1.3 Töökeskkond ja ohutus

Seadet on plaanis kasutada õppelaborites, kus tudengid võivad eksida toiteparameetritega. Seetõttu tuleb seadet luues arvestada, et süsteem peab olema turvaline ning kaitstud võimalike liigvoolude ja -pingete eest. Selle jaoks on plaanis disainida süsteemi sisendtoidetetele kaitseahelad.

### 1.1.4 Nõuded aku mahutavusele

Kuigi arendatava süsteemi puhul on tegemist universaalse laadimissüsteemiga, millega on võimalik ühendada mitmeid erinevaid välisseadmeid erinevate voolunõuetega, on vajalik näidisseade, mille andmete abil saaks valida akuelemendid. Näidisseadmeks on valitud ABB võrgu analüsaator M2M. Võrgu analüsaator M2M valiti, kuna seade on kasutusel õppelaboris ning oleks üks potentsiaalsetest välisseadmetest, mida loodud süsteemiga toita oleks võimalik. Näidiseks võetud välisseade töötab 48 V pingega ning tarbitavaks vooluks on mõõdetud 50 mA. Laboris kasutuseks on arvestatud, et seade võiks töötada umbes 6 tundi. See tähendaks, et seadet saaks kasutada päeva jooksul mõõtmiste sooritamiseks ning öösel saaks seadme asetada laadimismatile laadimiseks. Samuti on vaja akude pealt toita mikrokontrollerit, mis vajab töötamiseks 5 V pinget ning mille töövooluks on mõõdetud umbes 20 mA. Antud andmetele põhinedes saab teha aku mahutavuse nõuete umbkaudsed arvutused kasutades võimsuse arvutamise valemit [2]:

$$P_{väljund} = \sum_{k=1}^n U_k * I_k \quad (1.1)$$

kus  $P_{väljund}$  – välisseadme nõutav võimsus, W,

$U_k$  – välisseadme alamosa „k“ poolt kasutatav pinge, V,

$I_k$  – välisseadme alamosa „k“ poolt tarbitav vool, A.

Välisseadme alamosadeks on:

- Võrguanalüsaator M2M toitepingeks  $U_{M2M} = 48$  V [1] ja vooluks  $I_{M2M}$  on mõõdetud 50 mA.
- Abiseadmena töötab väli süsteemis mikrokontrolleril baseeruv tugiüksus (nt kasutajaliidese ohjurina). Mikrokontrolleri pingeks on  $U_{MK} = 5$  V ja vooluks  $I_{MK} = 20$  mA.

Tabel 1.3 Toidetavate välisseadmete tarbitavad võimsused

Välisseadme alamüksus	Tähis	Nimisuurused	Tarbitav võimsus
Võrguanalüsaator M2M	$U_{M2M}$ $I_{M2M}$	48 V 0,05 A	2,4 W
Mikrokontroller	$U_{MK}$ $I_{MK}$	5 V 0,02 A	0,1 W
Välisseade kokku	$P_{M2M+MK}$		2,5 W

Liites võrguanalüsaatori M2M ja mikrokontrolleri tarbitavad võimsused leiame, et tarbitav võimsus  $P_{M2M+MK}$  on 2,5 W.

Kujundatava süsteemi akust tarbitav võimsus on suurem, kui süsteemi enda funktsioonide käigushoidmiseks on vajalik teatud võimsus. Seda võetakse arvesse läbi kasuteguri. Eeldame kasuteguriks esialgses vaates 0,9. Kasuteguri arvutamiseks kasutame valemit [3]:

$$\eta = \frac{A_{kas}}{A_{kogu}} \quad (1.2)$$

kus  $\eta$  – kasutegur,

$A_{kas}$  – kasulik energia (sama, mis  $P_{M2M+MK}$ ),

$A_{kogu}$  – kogu energia (sama, mis  $P_V$  ehk summaarne väljundvõimsus).

Asendades valemisse (1.2) vastavad arväärtused ning avaldades valemist  $A_{kogu}$  leiame, et summaarne tarbitav võimsus  $P_V$  on 2,78 W.

Näidiseks võetud välise seadme tööajaks on arvestatud 6 tundi. Selle järgi saab arvutada aku minimaalse nõutava mahutavuse vatt-tundides [4]:

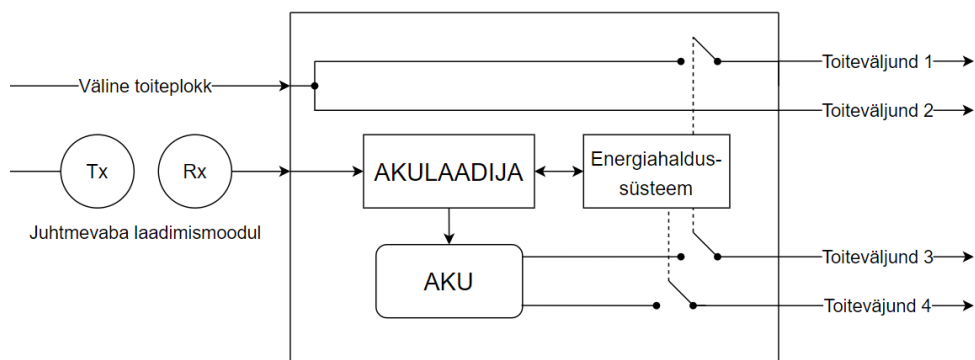
$$E_{aku,min} = P_V * t_{nõutav} = 16,68 \text{ Wh} \quad (1.3)$$

kus  $E_{aku,min}$  – aku minimaalne nõutav mahutavus, Wh,

$t_{nõutav}$  – seadme nõutav tööaeg, h.

Aku mahutavus peaks seega olema vähemalt 17 Wh. See on aluseks hilisemale aku laadija ja aku tüübi valikule.

## 1.2 Kujundatava toitesüsteemi eeldatav struktuur



Joonis 1.3 Kujundatava toitesüsteemi esialgne üldine struktuur

## 1.3 Akutehnoloogia

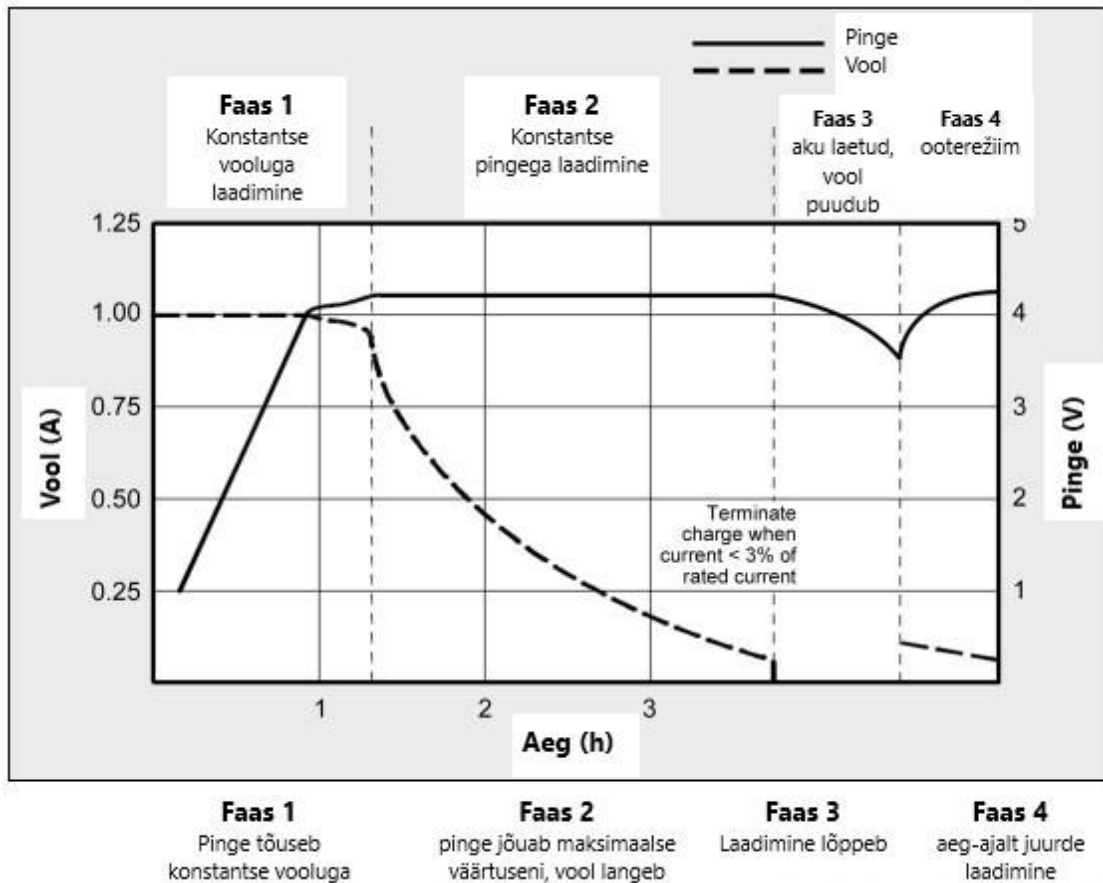
Laborikomplekti ja ka hilisemate võimalike kasutusviiside vaates on sisendsoovitus rakendada liitium-ioon tehnoloogial akusid. Need võimaldavad piisava energiahulga salvestamist väikese massi ja ruumala juures.

### 1.3.1 Liitiumioonaku laadimine

Igal akutüübil, olenevalt akukeemiast, on erinev laadimisviis. Nii peab ka liitiumioonakut laadima just sellele akule sobival viisil. Õigesti laadimine aitab pikendada aku eluiga ning hoiab ära aku hävinemise. Liitiumioon akude laadimine toimub põhiliselt kahes osas: konstantse voolu faas ja konstantse pinge faas. [5]

Konstantse voolu faasis toimub aku laadimine konstantse vooluga. Laadimisvooluks on tavaliselt umbes 0,5-1 C. See tähendab, et näiteks 2500 mAh akut laetakse selles faasis konstantse 1250-2500 mA vooluga. Samal ajal pinge pidevalt tõuseb, kuni see jõuab aku maksimaalse pingeni, milleks liitiumioonakudel on umbes 4,2 V. Laadimine üle selle piiri võib tekitada ohtliku olukorra, kus aku temperatuur tõuseb ning aku plahvatab. Vähem ohtlik mõju üle antud piiri minemisel on oksüdatsioon akus, mis vähendab aku eluiga ja mahutavust. Akut ostes saab aga valida ka kaitstud akude seast, mis ei lase akut laadida üle antud piiri. [5]

Peale laadimisfaasi lõpetamise pingeni jõudmist, algab teine faas – konstantse pinge faas. Selles faasis jääb pinge püsima 4,2 V peale, kuid vool tasapisi väheneb. Faas on peetud lõppenuks ning aku täis laetuks siis, kui vool on jõudnud alla 0.03-0.1 C. [6]



Joonis 1.4 Liitium-ioon aku laadimise graafik. [6]

Liitiumioonaku sisemise keemia tõttu ei või aku tühjenedes lasta aku pingel langeda alla aku andmelehes täpsustatud pingele. Juhul kui hakatakse laadima aga akut, mille pingeväärtus on alla andmelehes täpsustatud miinimumpinge, tuleb kasutada esmalt eellaadimist. Eellaadimine on aku laadimise alustamisel väiksema voolu kasutamine, umbes kuni 100 mA, et kaitsta akut korrosiooni eest. [7]

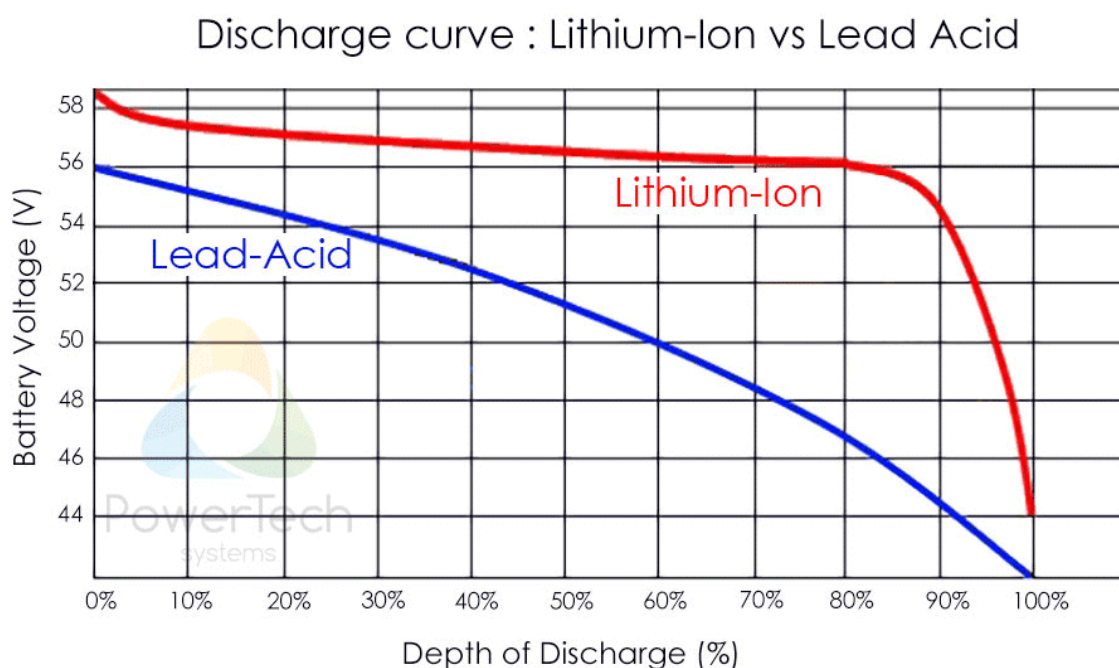
### 1.3.2 Aku laetuse monitooring

Et akut kaitsta, vältida üle tühjenemist ja pikendada aku eluiga, on oluline aku laetustaseme monitooring. [8] Laetustase  $E^*$  näitab energiasalvesti suhtelist energijääki, st energijäägi  $E_{ES}(t)$  ja nimimahutavuse  $E_{ES,N}$  suhet: [9]

$$E^* = \frac{E_{ES}(t)}{E_{ES,N}} * 100 \quad (1.4)$$

Kuna aku on keemiline energiasalvestuse allikas, ei saa aku mahutavust otse mõõta. See teeb aku laetustaseme täpse mõõtmise raskeks ülesandeks, kuid siiski on mõned matemaatilised meetodid, kuidas seda probleemi lahendada. [8]

Kaks põhilist viisi, kuidas liitiumioonaku laetustaset mõõta saab, on avatud ahela pinge meetod ning kulonimõõtmise meetod. Avatud ahela pinge meetodi puhul mõõdetakse akuklemmidelt aku pinget. Kuna aku pinge langeb aku tühjenedes ning tõuseb aku täienemisel, saab aku mahutavust umbmääraselt hinnata. Aku pinge ning laetustaseme suhe oleneb akutüübist. Kuna pliiakul on aku pinge ja laetustaseme suhe peaaegu lineaarne, saab pliiaku laetustaset antud meetodil üpris hästi mõõta. Liitiumioonaku puhul aga aku pinge ja laetustaseme suhe lineaarne ei ole ning selle tõttu on avatud ahela pinge meetod liitiumioonaku puhul ebatäpne. Alltoodud joonisel (vt Joonis 1.5) võib näha akupinge ja tühjenemistaseme  $\Delta E^*$ , mis on  $1 - E^*$ , suhete võrdlust pliiaku ja liitiumioonaku puhul. [10]



Joonis 1.5 Liitiumioon aku (joonisel *lithium-ion*) ja pliiaku (joonisel *lead-acid*) pinge võrdlus aku tühjenemisel 0 ... 100 %. *Battery voltage* (V) – akupinge, *Depth of discharge* (%) – aku tühjenemise maht [10].

Parem meetod liitiumioonaku laetustaseme mõõtmiseks on kuloniloendamise meetod. Kuloniloendamise meetodi korral toimub akust väljuva ja akusse laadimisel siseneva voolu mõõtmine. Voolutugevuse hetkväärtuste summeerimine laadimisel annab tulemuseks laenguühiku, mis on akusse salvestunud. Akuga seotud voolutugevuse mõõtmine on teostatav näiteks läbi väikese šunttakisti. Kuloniloendamise meetodi abil tehtud laetustaseme mõõtmiste veatäpsus on alla 1%. Kuloniloendamise meetodi eeliseks avatud ahela pinge meetodi ees on ka see, et laetustaseme näitajat saab mõõta aku töötamise ajal. [10]

## 1.4 Turul olevad moodulid

Enne ülesande täitma asumist otsiti turult erinevaid süsteeme, mis täidaks samu või sarnaseid funktsioone meie seatud kriteeriumitele.

Võrreldi viit erinevat süsteemi:

Liitiumil põhinevaid akusid toetav akulaadija kontrolleri XY-CD60L on saadaval AliExpress veebikeskkonna kaudu [11]. Kontrolleri vajab töötamiseks eraldi ühendusena akulaadijat ning akut. Kontrolleri asub vedelkristallkuvar ehk LCD-kuvar, mille kaudu saab kasutaja infot aku laetustaseme kohta. Kontrolleri abil suudab LCD-ekraan kuvada aku pinget, hinnata aku laetustaset protsendina ning mõõta aku laadimiseks läinud aega. Kontrolleri abil saab samuti määrata aku pinget parameetreid, et vältida aku üle laadimist ning üle tühjenemist. Kahjuks puudub moodulil piisav dokumentatsioon selle täpsema töö kohta. [11]



Joonis 1.6 XY-CD60L akulaadija kontrolleri moodul [11]

Kaitsega liitiumioonaku 18650 laadimissüsteemi mooduli leiab HandsOn Tech veebikeskkonna kaudu [12].

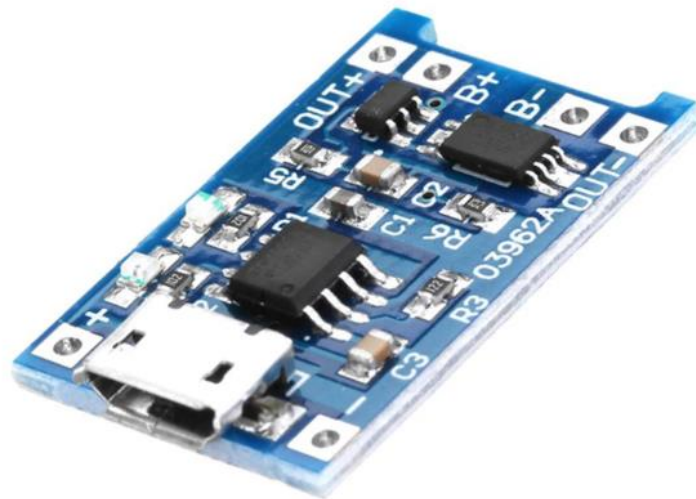
- Laetavaid liitiumaku elemente: 1
- Maksimaalne laadimisvool: 1 A
- Sisendpinge vahemik: 4,5 – 5,5 V



Andmelehes [13] on ka esitatud, et süsteemi on sisse ehitatud kaitseahel. Akulaadijaks kasutab süsteem TP4056 kiipi. Süsteem kasutab ka kasutajale info andmiseks kahte erineva värviga leedlampe:

- punane leedtuli tuli põleb, kui süsteemil on olemas sisendpinge või toimub laadimine;
- sinine leedtuli põleb, kui aku on täis laetud.

Akulaadija maksimaalset laadimisvoolu saab seadistada takisti valikuga. Samuti võimaldab akulaadija välisseadme toitmist akudelt. [12]



Joonis 1.7 HandsOn Tech laadimissüsteem [12]

Kaitseahelaga liitiumioonaku 18650 laadimissüsteem on saadaval joom.com veebikeskkonna kaudu. [14]

- Laetavaid liitiumaku elemente: 1, pingevahemik 3 – 4,2 V, aku mahutavus ei tohi ületada 200 000 mAh.
- Sisendpinge: 5 V USB (universaalne järjestiksiin) ühenduse kaudu.

Lisaks akude laadimisele võimaldab süsteem ka välise seadme toitmist. Kahjuks puudub süsteemil täielikult dokumentatsioon, et selle kohta täpsemat infot saada. [14]

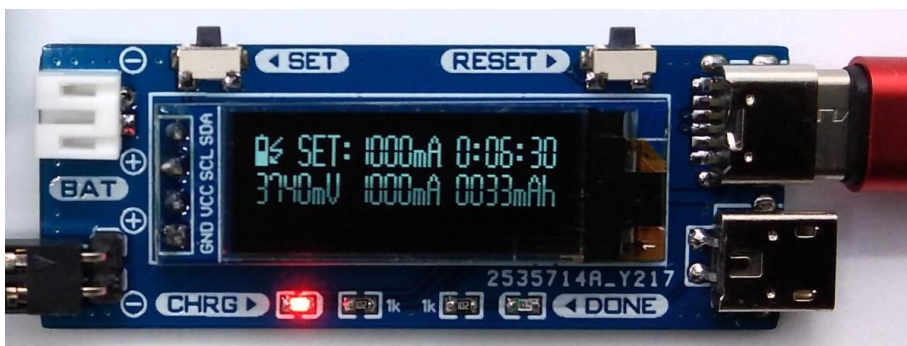


Joonis 1.8 Kaitseahelaga liitiumioonaku 18650 laadimissüsteem [14]

Programmeeritav laadimissüsteem TinyCharger on saadaval Electronics-lab veebikeskkonnas [15].

- Laetavaid liitiumaku elemente: 1, kuni 4,2 V
- Maksimaalne laadimisvool: 1 A
- Sisendpinge: 5 V Micro-USB ning USB-C ühenduse kaudu.

Ka TinyCharger laadimissüsteem kasutab akulaadijat TP4056. Samuti võimaldab antud süsteem voolu mõõtmist ning aku laetustaseme arvutamist. Voolu mõõtmine toimub INA219 [16] kiibi abil, mis saadab mõõteandmed I<sup>2</sup>C jadasiini abil mikrokontrollerisse ATiny. ATiny mikrokontrolleris toimub aku laetustaseme arvutamine, mis omakorda saadab lõplikud andmed OLED ekraanile kuvamiseks. [15]

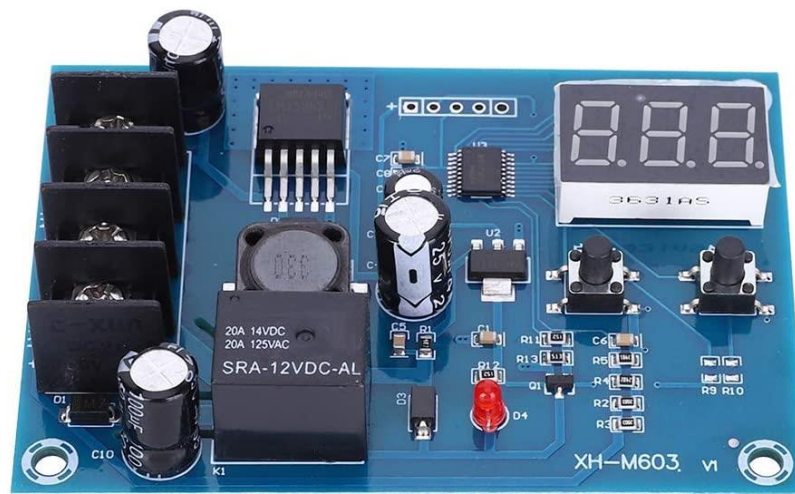


Joonis 1.9 TinyCharger akulaadimissüsteem [15]

Liitiumakudele mõeldud kaitseahelaga laadimissüsteem on saadaval Amazoni veebikeskkonna kaudu [17].

- Akupinge vahemik: 12-24 V
- Sisendpinge vahemik: 10-30 V.
- Laadimisvool: info puudub

Süsteem võimaldab ka osaliselt laadimisparameetrite seadistamist: seadistada saab akupinge alampiiri, kust maalt süsteem akut laadima hakkab ning akupinge ülempiiri, kust maalt süsteem aku laadimise lõpetab. Jällegi on laadimissüsteemi dokumentatsioon olematu ning täiendav info süsteemi töö kohta puudub. [17]



Joonis 1.10 Releega varustatud laadimiskontroller [17]

Kokkuvõttes leiti turult küll mitmeid analoogseid akulaadimissüsteeme, mis täidavad osi nõutavatest funktsioonidest, kuid ei leitud ühtegi moodulit, mis täidaks terviklikult kõiki soovitud ülesandeid. Mitmetel leitud moodulitest puudus näiteks paindlikkus akupinge ja aku elementide arvu kohta, maksimaalne laadimisvool oli liialt väike või puudus võimalus laadimisparameetrite täpseks seadmiseks ja monitooringuks. Kõige paremini antud töös seatud kriteeriumitele vastav süsteem oli TinyCharger-i laadimissüsteem. Samas suudab TinyCharger-i akulaadija laadida vaid ühte aku elementi maksimaalse pingega 4,2 V. Süsteemil puudub ka õppelabori jaoks vajalik sisendtoite kaitseahel.

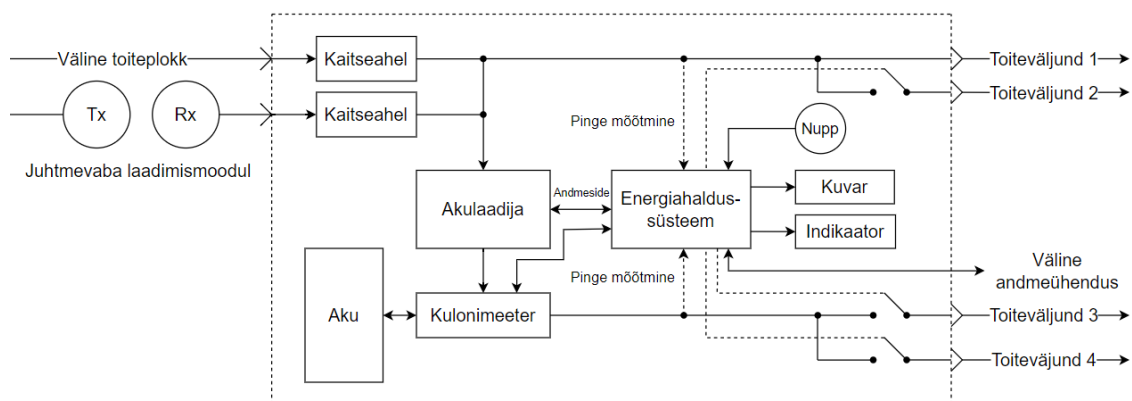
## 2. Põhifunktsioonid

### 2.1 Arendatav struktuurskeem

Uurimustöös arendatav laadimissüsteem peab olema paindlik ja täpne ning lubama võimalikult mugavat laadimist mistahes tarbijale. Antud süsteemi toimimiseks on vaja leida ja kokku sobitada põhikomponentidest:

- juhtmevaba laadimise moodul;
- akulaadija;
- aku;
- energiahaldussüsteem aku laadimise jälgimiseks, toitelülituste lülitamiseks, pinge mõõtmiseks ja vajaliku informatsiooni kuvamiseks.

Et süsteemi paremini visualiseerida ning aru saada erinevate komponentide kokkusobivusest, on vajalik süsteemi üldine struktuur plokk skeemi abil.



Joonis 2.1 Arendatav struktuurskeem

Joonisel Joonis 2.1 esitatud skeem annab üldise ülevaate loodava süsteemi toimimisest. Sisendiks kasutab süsteem kahte kavandatavast seadmest eraldiolevat toiteallikat. Põhilseks toiteallikaks on juhtmevaba laadimise moodul ning lisaks on võimalus süsteemi toita ka välisest toiteplokkist. Juhtmevaba laadimisseadme vastuvõtja saab toidet laadimismooduli saatjalt ning on ühendatud ühenduspesa abil akulaadija

trükkplaadile. Läbi teise ühenduspesa on akulaadija trükkplaadiga ühendatud väline toiteallikas.

Juhtmevaba laadimisseadme või välise toiteallika ühenduspesast liigub vool läbi kaitsehela akulaadijasse ning sealt edasi akudele nende laadimiseks. Lisaks liigub vool ka ühenduspesale, kust see omakorda liigub edasi mikrokontrollerisse pinge mõõtmiseks ning ühenduse korral kahele toiteväljundile.

Akulaadija ning seda ümbritsevate komponentide abil toimib aku laadimine. Aku laetustaseme mõõtmiseks on vajalik kulonimeeter, mis eelneb ahelas akule. Aku laadimise taseme jälgimiseks ning toite sisse- ning väljalülituseks on akulaadijaga läbi ühenduspesa ühendatud eraldi trükkplaat, millel asub mikrokontroller, nupp toitelülituseks, LCD ekraan seadme kasutajale andmete kuvamiseks ning nende seadmete toimimiseks vajalikud ümbritsevad komponendid. Läbi sama ühenduspesa toimub ka väliste seadmete toitmise akuelementidelt.

## 2.2 PARAMEETRITE MÄÄRAMINE

Akulaadija trükkplaadil asub neli ühenduspesa:

- juhtmevaba laadimismooduli sisendtoiteühendus;
- välise toiteallika sisendtoiteühendus;
- aku ühendus;
- välise seadme toide, andmeside signaalid, otseühendus aku klemmiga.

Ühenduspesa J1 on mõeldud juhtmevaba laadija sisendtoite ühenduseks. Ühenduspesa koosneb kahest klemmist: toite klemmist ning GND ehk maa klemmist.

Tüüp: Micro-Fit 3.0 3 mm sammuga

Kontaktide paigutus: 2 kontakti üksteisega kõrvuti

Tabel 2.1 Ühenduspesa J1 klemmide omadused

Klemm	Funktsioon	Lubatud pingnivood	Lubatud voolutugevus	Märkused
1	Maa (GND)	0 V		Toide välisele seadmele
2	Toide sisse 1	-0,7 V ... +18 V	6 A	Toide välisele seadmele

Ühenduspesa J2 on mõeldud välise toiteploki sisendtoite ühenduseks. Ühenduspesa koosneb kahest klemmist: toite- ja GND ehk maa klemmist

Tüüp: Alalisvoolutoitepesa, silindrilist tüüpi, välisläbimõõt 5,5 mm; siseläbimõõt 2,1 mm.

Kontaktide paigutus: Silindri välimine pind – maa (GND), sisemine pind – positiivne klemm.

Tabel 2.2 Ühenduspesa J2 klemmide omadused

Klemm	Funktsioon	Lubatud pingnivood	Lubatud voolutugevus	Märkused
1	Maa (GND)	0 V		Toide välisele seadmele
2	Toide sisse 1	-0,7 V ... +18 V	2 A	Toide välisele seadmele

Ühenduspesa J3 on mõeldud toiteks välisele seadmele, andmevahetuseks kasutajaliidesmooduliga, otseühenduseks aku klemmiga mikrokontrolleri toiteks ning otseühenduseks välise toiteplokiaga.

Tüüp: piigiriba 2,54mm sammuga

Kontaktide paigutus: 16 kontakti 2 reas.

Tabel 2.3 Ühenduspesa J3 klemmide omadused

Klemm	Funktsioon	Lubatud pingnivood	Lubatud voolutugevus	Märkused
1	Toide toite sisendist	-0,7 ... 18 V	0,5 A	Toiteploki 15 V + varu 20 %
2	Maa (GND)	0 V		Otseühendus toiteploki
3	Toide välja	7,2 ... 8,4 V	0,5 A	Toide välisele seadmele
4	Maa (GND)	0 V		Toide välisele seadmele
5	Toide välja	7,2 ... 8,4 V	0,5 A	Toide välisele seadmele
6	Maa (GND)	0 V		Toide välisele seadmele
7	Aku ühendus	-0,7 V ... 8,4 V	0,5 A	Otseühendus aku klemmiga
8	Maa (GND)	0 V		Otseühendus aku klemmiga
9	DVCC	3,3 V ... 5,0 V	Alla 0,1 A	I <sup>2</sup> C liidese toide
10	SCL	0 V ... DVCC	Alla 0,1 A	Serial clock line
11	ALERT	0 V ... DVCC	Alla 0,1 A	Serial management bus alert
12	SDA	0 V ... DVCC	Alla 0,1 A	Serial data line

Klemm	Funktsioon	Lubatud pingeniivood	Lubatud voolutugevus	Märkused
13				
14	Maa (GND)	0 V		Digitaalsignaaside maa
15				
16	Maa (GND)	0 V		Digitaalsignaaside maa

Tabel 2.3 järg

Ühenduspesa J4 on mõeldud aku ühenduseks. Ühenduspesa koosneb neljast klemmist: aku positiivne ja negatiivne klemm, termotakisti positiivne klemm ja GND ehk maa.

Tüüp: : Micro-Fit 3.0 3 mm sammuga

Kontaktide paigutus: 4 kontakti üksteisega kõrvuti

Tabel 2.4 Ühenduspesa J4 klemmide omadused

Klemm	Funktsioon	Lubatud pingeniivood	Lubatud voolutugevus	Märkused
1	Aku + klemm	0 ... 8,4 V	2 A	Aku positiivse klemmi ühendus
2	Termistori ühendus	1,2 V	< 0,1 A	Termistori ühendusklemm
3	Maa (GND)	0 V		Termistori maa ühendus
4	Maa (GND)	0 V		Aku negatiivse klemmi ühendus maaga

## 2.3 TALITLUSVIISID JA PIIRANGUD

Akulaadija LTC4015 tööpinge on jaotatud viite kategooriasse: negatiivne pinge, alapinge, spetsifitseeritud nimitalitluspinge, rikkekindel hoiatuspinge ning ülepinge.

Tabel 2.5 Süsteemi sisendpingevahemikud

Pingevahemik	Pinge, V
Negatiivne pinge	-0
Alapinge	0-8,4
Nimitalitluspinge	8,4-18
Rikkekindel hoiatuspinge	18-24
Ülepinge	24-

Negatiivne pinge on pinge alla 0 voldi. Negatiivse pinge korral akulaadija tööle ei lähe.

Alapinge on määratud nullist voldist maksimaalse akupingeni  $V_{BAT(MAX)}$  [18]. Antud töös kasutatava 2 liitiumioonaku puhul on see väärtus 8,4 V. Selles vahemikus akulaadija laadima ei hakka.

Alapinge vahemikule järgneb spetsifitseeritud nimitalitluspinge ala. Nimitalitluspinge ala on pingevahemik, kus toimub LTC4015 abil korrektne akude laadimine. Nimitalitluspinge vahemikuks on maksimaalne akupinge  $V_{BAT(MAX)}$  kuni töö autori poolt spetsifitseeritud süsteemi toiteks sobilik talitluspinge koos varuga. Süsteemi talitluspingeks on valitud 15 V. Varuks on arvestatud 20% talitluspingest. Talitusvaru alas töötab süsteem sama hästi kui talitluspingel, kuid pinge tase on ületatud. Nimitalitlusala pinge ei tohi ületada LTC4015 lubatavat maksimaalset sisendpinge  $V_{IN}$  väärtust, milleks on 35 V. [18]

Rikkekindel hoiatusala on pingevahemik, kus toimub akulaadija LTC4015 korrektne töö, kuid süsteem hoiatab kasutajat liigse pinge eest. Rikkekindla hoiatusala ülempiiriks on arvestatud 24 V. Ka rikkekindla hoiatusala pinge ei tohi ületada LTC4015 lubatavat maksimaalset sisendpinge  $V_{IN}$  väärtust, milleks on 35 V. [18]

Rikkekindlale hoiatusalale järgneb ülepinge ala. Ülepinge alal on ohutu toitepinge ületatud ning rakendub sisendtoitekaitse. Sisendtoitekaitse koormab toiteallikat ning rakendab PTC kaitsme või sulatab sulavkaitsme.

## **2.4 KAITSE RAUDVARAS JA KOMPONENDID**

### **2.4.1 Akulaadija kaitseskeem**

Et akulaadija töötaks probleemideta ning ei oleks ohtu, et liigne või negatiivne pinge või vool põletab läbi akulaadija, teda ümbritsevad komponendid või välisseadme, tuleb kasutada kaitseahelat. Kaitseahela eesmärk on kaitsta akulaadija süsteemi liigse pinge, voolu ning vale polaarsuse eest. Kuna planeeritav akulaadimiseseade on mõeldud kasutamiseks õppelaboris, kus kogemata võidakse toitepingega eksida, on kaitseahelat planeerides arvestatud juhtumitega, kus teadmata põhjusel on näiteks toiteallikast kogemata akulaadija ahelasse suunatud liigne pinge või on eksitud akulaadija toitel polaarsusega.

### **2.4.2 Polaarsuskaitse**

Polaarsuse kaitseks on kavas kasutada Schottky diodi. Diod on pooljuhtseade, mis juhib voolu vaid ühes suunas. Diodi püsivalt talutav võimsus on aga piiratud ning



piisava voolu korral võib see läbi põleda. Schottky diodi tüüpi planeeritakse kasutada selle väiksema pingelangu eesmärgil. [19]

### **2.4.3 Voolukaitse**

Liigvoolu kaitseks on võimalik kasutada sulavkaitset. Sulavkaitse koosneb kergsulavast metallist ning kuumeneb elektrivoolu mõjul. Jõudes komponendile kindlaks määratud rakendusvooluni sulavkaitse sulab, katkestades ahela. Sulavkaitse on lihtsaim ja odavaim seade vooluahela katkestamiseks ahelas, kuid kui sulavkaitse rakendub ning katkestab voolu, tuleb sulavkaitse füüsiliselt trükkplaadi pealt ära vahetada. Selle tõttu on antud projekti ahelas mõistlik seda kasutada väga suure voolu korral ( $5A <$ ) ahela katkestamiseks. [20]

Teine variant akulaadimise ahelat liigvoolu ja liigtemperatuuri eest kaitsta on PTC kaitse. PTC kaitse töötab nagu sulavkaitse – katkestades ahela peale rakendusvooluni jõudmist. PTC eelis sulavkaitsme ees on see, et PTC kaitse ei sula rakendusvooluni jõudes ära. (saaks rääkida miks keemiliselt) Kui vooluväärtus väheneb ning PTC maha jahtub, ühendab ta ahela uuesti kokku ning laseb voolul ennast läbida. [21]

### **2.4.4 Liigpinge kaitse**

Üks enim kasutatud viis, kuidas kaitsta akulaadija ahelat liigse pinge eest, on *crowbar* ahel. *Crowbar* ahela eesmärk on ahelasse siseneva liigse pinge korral tekitada lühis sisendpinge ja maa vahel enne välisseadmesse jõudmist. *Crowbar* ahela põhikomponentideks on türistor, stabilitron ja Schottky diod. Türistor on ühendatud otse ahela sisendi ning maa vahele. Tavaolekus on türistor suletud ning türistori pais maandatud. Kui sisendpinge ületab teatud stabilitroni abil paika pandud pingeväärtuse, hakkab stabilitron voolu juhtima. Selle tõttu jõuab pinge ka türistori paisule, muutes türistori avatud olekusse – tekib lühis maa ja sisendi vahele. Lühis juhib läbi enda maksimum voolu, isoleerides toiteallika akulaadija ahelast. [19]

Veel üks viis, kuidas ahelat liigse pinge eest kaitsta, on kasutada TVS diodi. TVS diodi eesmärk on kaitsta ahelat liigpinge pulsside eest. Normaalpinge korral töötab TVS diod kui avatud vooluring, kuid spetsifitseeritud pingetase ületades hakkab ta käituma kui lühis, voolutugevuse kasvamine avaldab liigpinge-impulsile pärssivat mõju. Seeläbi ei jõua tarbijani liigpingeimpulssi. TVS diodi eelis teiste diodide ees liigpinge pulsside kaitsmisel on tema robustsus ning ülikiire reageerimine. [22]

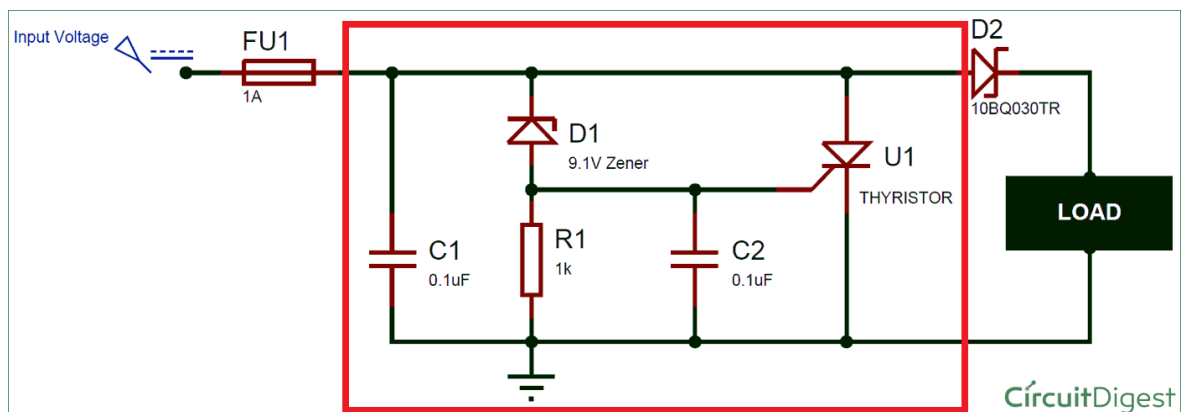
### **2.4.5 Komponentide valik.**

Et seade oleks turvaline ja kaitstud võimalike eksimiste eest pinget ja vooluga laboritingimustes planeeritakse kombineerida kõik eelnevalt mainitud ahela kaitseviisid.

Liigvoolu kaitseks planeeritakse kasutada jadamisi nii sulavkaitset kui PTC kaitset.

- PTC kaitset aktiveerivaks vooluks valiti 2,5 A. Selle järgi valiti PTC kaitsmeks Littlefuse toode LVR125K-240. LVR125K-240 andmelehel leiab, et kaitsme rakendusvool 25°C juures on 2,5A ning talutav pinge on 240 V. [23]
- Sulavkaitsme rakendusvooluks valiti 5 A ning rakendumiskarakteristikuks „kiire”. Selline kaitse sobib näiteks süsteemi kaitsmiseks *crowbar*-lülituse rakendamiseks.

Liigpinge kaitseks planeeritakse koostada *crowbar* ahel lisa TVS diodiga. TVS diodi eesmärk on reageerida kiiresti liigpinge pulssidele. Kuna *crowbar* ahela reageerimiskiirus on aeglasem, on *crowbar* ahela eesmärk reageerida pikematele liigpingetele. *Crowbar* ahela kujundamisel võeti aluseks järgmine ahel: [19]



Joonis 2.2 *Crowbar* ahela kujundamisel näiteks võetud ahel [19]

- Stabilitroniks (joonisel 2.2 D1) valiti 20 V vastupinge korral voolu juhtima hakkav 1N4747A. [24]
- Türistoriks (joonisel 2.2 U1) valiti [19] põhjal TYN612. TYN612 paisu pinge on 5 V ehk 5 V pinge korral paisule muutub türistor juhtivaks. [19]
- Kuna kaitseahela rakenduspingeeks valiti 24 V, sobib TVS diodi, mille nimipinge oleks 24 V või rohkem. Sobiv komponent on 1.5KE30A/CA diod, mis st 1500 W, rakendub keskväärtusega 30 V ning töötab kahesuunaliselt. [25]

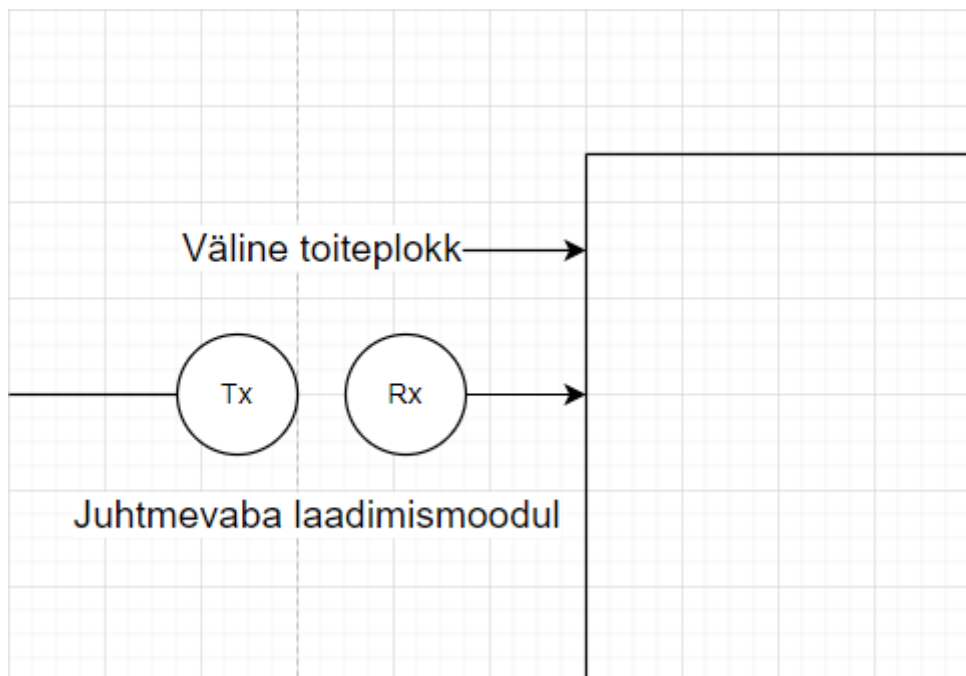
Polaarsuskaitseks on kaitseahelas kasutusel Schottky diod ning negatiivse lekkevoolu vältimiseks jaoks samuti diod.

- Schottky diodiks (graafikul D2) valiti MBR3100, suurima lubatava vastupingega 100 V ja vastuvooluga 3 A. [26]

- Lekkevoolu tõttu tekkiva pinge jaoks valiti diod MBR1100, mis on suurima lubatava vastupingega 100 V ning talub 1 A voolu. [27]

## 3. Komponentide valik

### 3.1 Sisendtoide



Joonis 3.1 Sisendtoide kujundatavale süsteemile

Kuna antud uurimustöö eesmärgiks oli mugava ja kompaktsel laadimissüsteemi loomine, sai põhiliseks toiteallikaks valitud juhtmevabal laadimisel põhinev toiteallikas.

Juhtmevaba laadimine on elektrienergia ülekandmine toiteallikast tarbijani ilma otsese juhtmega ühenduseta tarbija ja toiteallika vahel. Energiaülekanne toimub mähiste kaudu elektromagnetilise induktsiooni abil. Elektromagnetiline induktsioon on nähtus, kus magnetvälja toimel indutseerub juhtmes elektromotoorjõud. Vahelduvvooluga toidetud mähises tekib vahelduva voolu abil vahelduv elektromagnetväli mis indutseerib pinget teisele, vastuvõtvale mähisele. [28][29]

Et teostada juhtmevaba laadimist on antud projekti jaoks vajalik nii saatjat kui vastuvõtjat sisaldavat terviklikku juhtmevaba laadimise moodulit. Juhtmevaba toide peab olema piisava võimsusega, et toita akulaadijat ning võimaldada kiiret akulaadimist. Akut soovitakse laadida 3 ampriga 8,4 V juures, vastavalt valemile (1.1) saab välja arvutada, et sisendtoitelt nõutav võimsus  $P_{aku}$  on vähemalt 25,2 W [2].

Eeldades kasuteguriks 0,9 selgub, et nõutav võimsus sisendtoitelt võiks olla umbes 30 W.

Ettevõtted, kes pakuvad juhtmevabalaadimise mooduleid on näiteks DF Robot, Adafruit ja Sparkfun. Moodulid erinevad üksteisest enamasti väljundpinge ja väljundvoolu poolest.

Juhtmevaba laadimise mooduleid pakub näiteks tootja DF Robot. Neli versiooni pakuvad viie voldist väljundpinget, mis erinevad väljundvoolu poolest – saadaval on 0,3 ... 5 A versioonid. Saadavalolevatest süsteemidest sobib antud töö jaoks ainukesena 12 V väljundpinge ning 3 A väljundvooluga moodul. [30]

Adafruit'i tootevalikus [31] on üks 3,3 V väljundiga ja kaks 5 V väljundiga moodulit, mis erinevad väljundvoolu poolest. 3,3 V väljundpingega mooduli väljundvooluks on maksimaalselt 500 mA ning 5 V moodulitel 500 mA ja 1,3 A. Saadaval on ka eraldi variantidena voolu saatja ja vastuvõtja. Eraldi ostmiseks pakutavad saatja ja vastuvõtja on Qi standardil põhinevad lahendused. See tähendab, et signaali saatmiseks peavad nii saatja kui ka vastuvõtja olema mõlemad Qi standardil põhinevad. Kuna juhtmevaba laadimisseade, mida uurimistöö raames valmistatakse, koosneb nii saatja kui vastuvõtja poolest, puudub vajadus Qi standardi ühilduvusest. [32]

Sparkfun veebikeskkonnast leiti vaid üks saatja moodul WTM905525-12F2-12V-G [33] ning üks vastuvõtja moodul WRM483265-10F5-12V-G [34]. Saatja WTM905525-12F2-12V-G vajab 5 V ja 15 W signaali saatmiseks 12 V sisendpinget. Vastuvõtja WRM483265-10F5-12V-G on piisava sisendivõimsuse olemasolul suuteline väljastama 12 V ja 1,25 A. [33][34]

Tabel 3.1 Turul pakutavad juhtmevaba laadimise moodulid ja nende parameetrid [31][32][33][34]

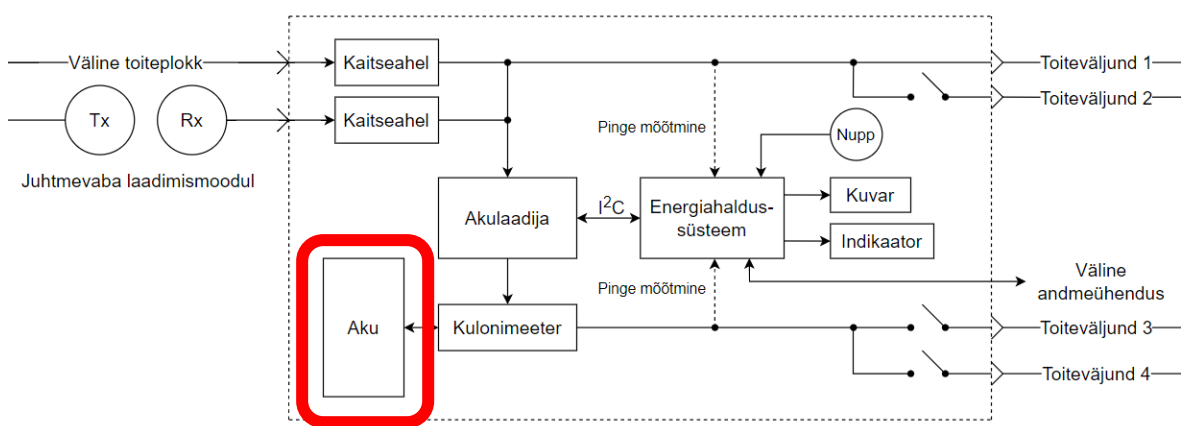
<b>Variant</b>	<b>Tootja</b>	<b>Sisend- pinge, V</b>	<b>Väljund- vool, A</b>	<b>Väljund- pinge, V</b>	<b>Väljundvõimsus, W</b>
1	DFRobot	5	0,3	5	1,5
2	DFRobot	5	1	5	5
3	DFRobot	12	2	5	10
4	DFRobot	24	5	5	25
5	DFRobot	12	3	12	36
6	Adafruit	9-12	0,5	3,3	1,65
7	Adafruit	9-12	0,5	5	2,5
8	Adafruit	24	1,3	5	6,5
9	Adafruit	5	0,5	5	2,5

10	Sparkfun	12	1,25	12	15
----	----------	----	------	----	----

Tabel 3.1 järg

Antud töö jaoks valiti **Error! Reference source not found.** esitatud variant 5 ehk DF Roboti 12 V ja 3 A juhtmevaba laadimismoodul. Antud juhtmevaba laadimise moodul oli leitud moodulite seast ainuke, mis vastas seatud kriteeriumitele ehk oli vähemalt 30 W võimsusega.

### 3.2 Aku



Joonis 3.2 Aku positsioon arendataval struktuurskeemil

Antud uurimustöös on kavas kasutada liitiumioonakusid. Liitiumioonaku valiti selle akutüübi paljude eeliste pärast teiste akutüüpide, näiteks pliiaku ja nikkel-metallhüdriidaku ees.

Liitiumioonaku üheks suurimaks eeliseks teiste aku tüüpide ees on selle suurem energiatihedus, mis on kilogrammi kohta umbes 150 Wh elektrienergiat. [35]. Võrdluseks liitiumioonakule suudab üks nikkel-metallhüdriidaku hoida umbes 60-120 Wh/kg ja pliiaku vaid 30-50 Wh/kg. Liitiumioonaku pakub ka teiste akutüüpidega võrreldes suuremat väljundpinget, umbes 3,7 V. Pliiakul on see väärtus umbes 2 V ning nikkel-metallhüdriidakul 1,2 V. [36] Liitiumioonaku kasuks räägib ka selle isetühjenemise väike intensiivsus. Kui näiteks nikkel-metallhüdriidakul on isetühjenemise protsent 30 % aku nimimahutavusest kuu aja jooksul, siis liitiumioonakul on isetühjenemise protsent kuu aja jooksul alla 10 %. Võrreldes teiste konkureerivate akutüüpidega puudub liitiumiooniakul ka mälu efekt, mis tähendab, et aku ei vaja täielikku tühjenemist enne selle uuesti laadima panemist. [37]

Et pikendada aku eluiga ning vältida ohtlikke olukordi, oli antud töö jaoks seatud kriteerium, et aku oleks kaitstud. Kaitstud aku tähendab, et liitiumioon akupulga külge on integreeritud väike kaitseahel, mis kaitseb akut näiteks üle laadimise, üle tühjenemise ja lühise eest ning samuti kontrollib aku temperatuuri. [38].

Kasutatavaks akuks osutus liitiumioonaku 18650 suurusklassiga. Liitiumioonaku üks laiemaid valikud on leitav ettevõtte NKON poolt pakutavast valikust [39]. Antud projekti osas otstarbekamad on esitatud tabelis 3.3, kus kirjeldatakse olulisimate kriteeriumide osas sisemise kaitseühenduse olemasolu ja aku mahutavust.

Tabel 3.1 Võrreldavad akud [39]

Variant	Mahutavus, mAh	Mahutavus, Wh	Kaitstud või mitte	Hind, €
Sanyo NCR18650GA	3350	12,06	Mitte kaitstud	4,85
LG INR18650-M36	3450	12,42	Mitte kaitstud	4,35
Nitecore NL1832	3200	11,52	Kaitstud	12,95
XTAR 3500 mAh	3500	12,6	Kaitstud	12,95
XTAR 3300 mAh	3300	11,88	Kaitstud	7,95

Eespool oli selgitatud vajadus 17 Wh energiamahutavuse kohta. Kasutades aku pingeks liitiumioonakude keskmist pinget  $U_{aku,tüüp}$  3,6 V [40] saab leida vajaliku akuelementide summaarse laengumahutavuse  $Q_{min}$ :

$$Q_{min} = \frac{E_{aku,min}}{U_{aku,tüüp}} = \frac{17}{3,6} = 4,72 \text{ Ah} \quad (3.1)$$

Variant on kasutada nimetatud mahutavuse realiseerimiseks mitut akuelementi. Valituks sai ettevõtte XTAR 3300 mAh kaitseahelaga 18650 aku. XTAR-i 3300 mAh mahutavusega aku valiti, kuna see vastab kõikidele kriteeriumitele ning on kõige mõistlikuma hinnaga [40]. Väikesema mahutavusega aku ei annaks hinna- ega muud eelist.

Antud süsteemi puhul otsustati kasutada kahte XTAR 3300mAh aku elementi jadamisi. Kontrolliks arvutatakse välja välise toidetava seadme tööaeg kahe aku elemendi korral:

$$t = \frac{Q_{XTAR} * (N_{elemente} * U_{aku, tüüp})}{P_v} = 8,54 \text{ h} \quad (3.2)$$

kus  $Q_{XTAR}$  – XTAR 3300 mAh aku mahutavus amper-tundides, Ah

$N_{elemente}$  – akuelementide arv

Kasutades jadamisi kahte XTAR 3300 mAh aku elementi töötab süsteem 8,54 h, mis on isegi suurem nõutud ajast 6 h.

### 3.3 Akulaadija valik

Liitiumioonaku laadimisel on mitmeid nüansse (vt peatükk 1.3.1), mis vajavad spetsiifilist juhtimist ja jälgimist. Kujundatav süsteem peaks olema pikaajaline ja samas erinevaid vananemisest tingitud talitlusviise arvesse võttev. Seepärast on seatud eesmärgiks kasutada kaubanduslikku selleks otstarbeks välja töötatud akulaadimiskontrollerit.

Seega, valiku aluseks on akulaadija liitiumioonakule sobiv laadimistalitus, soovitatavalt ühendatuna aku laetustaseme mõõtevõimalusega (nt kuloniloenduri abil), talitusparameetrite jälgimine ja vähemalt kahe akuelemendi kasutamine. Maksimaalne laadimisvool peab olema vähemalt 3 A.

Akulaadijaid pakub tootja Analog Devices, kellel on mitmeid integreeritud akulaadimislahendusi. [41] Võrreldi järgmisi akulaadijaid:

Tabel 3.2 Võrreldavad akulaadimiskontrollerid [41]

Variant	Toetatud akukeemia	Toetatud liitiumioon-aku elementide arv	Maksimaalne laadimisvool	Andmeside võimalus	Kuloni loendamine
LTC4020	Liitiumioon, LiFePO <sub>4</sub> , plii, liitiumpolüm eer	Kuni 55 V summaarse pingega aku elemente	20	Puudub	Puudub
LTC4155	Liitiumioon, liitiumpolüm eer	1	3,5	Olemas	Puudub



LTC4162-L	Liitiumioon, liitiumpolümeer	1-8	3,2	Olemas	Puudub
LTC4015	Liitiumioon, LiFePO <sub>4</sub> , plii, liitiumpolümeer	1-9	20	Olemas	Olemas

Kriteeriumitele paremini vastavaks akulaadijaks oli LTC4015 [18]. LTC4015 võimaldab liitiumioonaku laadimist, omab kuloni loendamise funktsiooni ning võimaldab andmevahetust mikrokontrolleriga I<sup>2</sup>C jadasiini abil. LTC4015 suudab laadida kuni üheksat liitiumioonaku elementi ning maksimaalne laadimisvool 20 A on meie poolt seatud alampiirist, 3 A oluliselt suurem. [18]

Akulaadija LTC4015 võimaldab akude laadimist kasutades mitmekülgset algoritmi, vt alltoodud Joonis 3.3. [18]

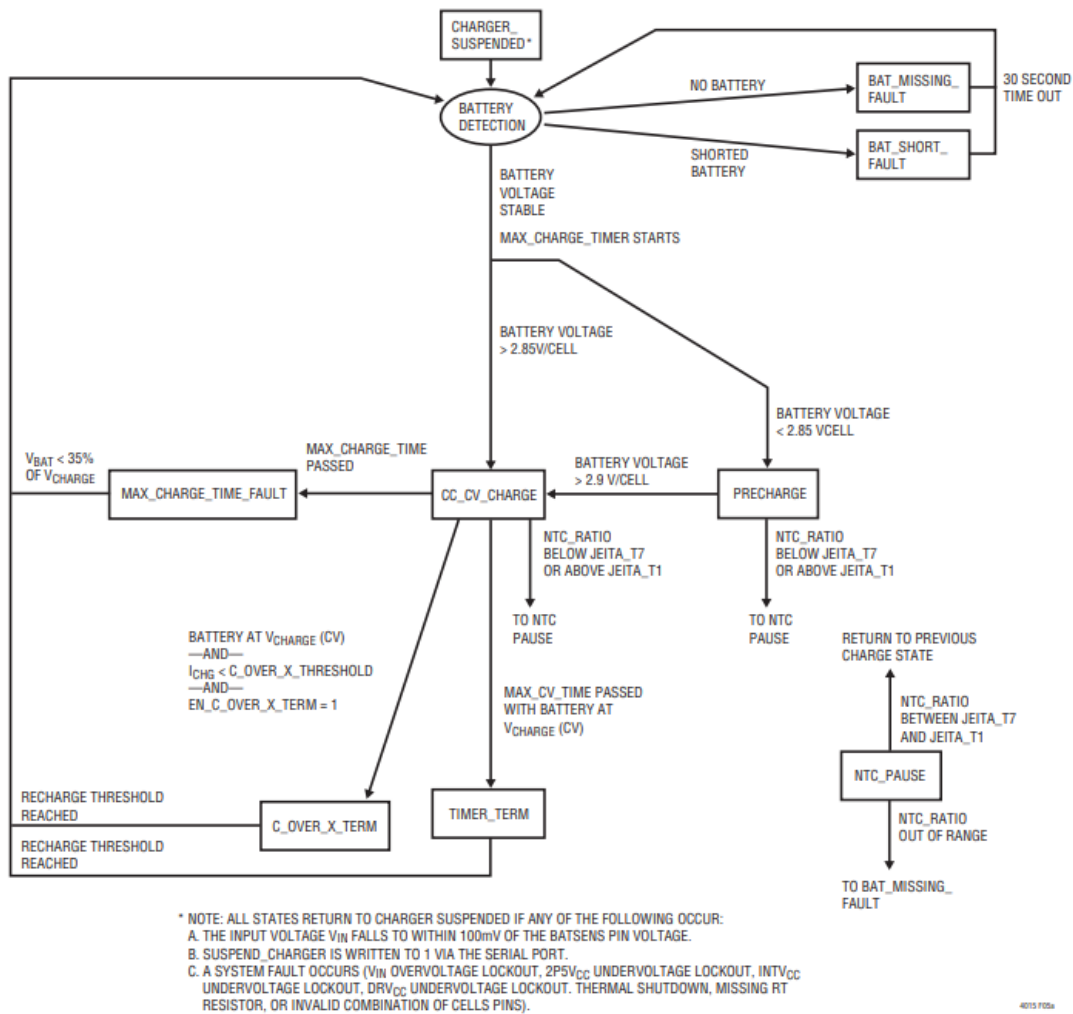


Figure 5A. Li-Ion Battery Charging State Diagram

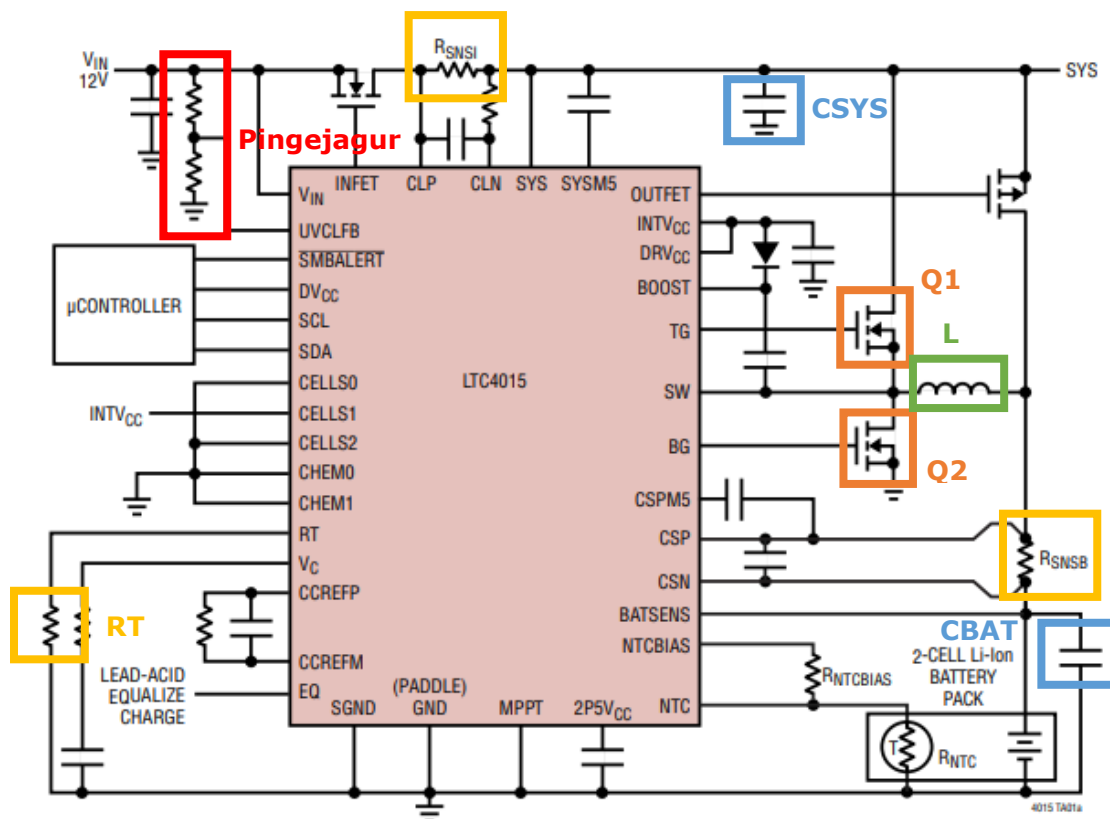
Joonis 3.3 LTC4015 aku laadimise algoritm [18]

LTC4015 laadimisalgoritm kaitseb akut mitmete erinevate ohutegurite eest. Näiteks oskab laadija:

- tuvastada aku olemasolu ja aku lühist,
- jälgida aku pinget ja otsustab selle järgi, kas on vajadus akut eellaadida,
- jälgida aku temperatuuri ning peatab liigse temperatuuri korral laadimise.

## 4. Akulaadija alamüksus ja põhikomponentide arvutused

Vastavalt andmelehele [18] on LTC4015 akulaadija töötamiseks liitiumioon akudega vajalik ühendada kiibiga mitmeid komponente. Andmelehes [18] on välja toodud erinevate komponentide üldised väärtused ning tähtsamate komponentide parameetreid arvutused, mis olenevad akukeemiast, süsteemi talitluspingetest ning sisend- ja laadimisvoolust. Olulisemad arvutatavad komponendid on märgitud järgmisel joonisel kastidega (Vt Joonis 4.1).



Joonis 4.1 Akulaadija LTC4015 skeem koos ümbritsevate komponentidega. Märgitud on tähtsamad, arvutusi vajavad komponendid. [18]

LTC4015 kontrolleri üheks olulisemaks alamosaks on pinget vähendav impulss-muundur transistoride Q1, Q2 ja induktiivpooli L ühenduses. Seetõttu tuleb skeem kujundada lähtudes lülitustalitluses töötava muunduri põhimõtetest.

### Lülitussageduse määramine

Lülitussagedusest oleneb edaspidine komponentide, näiteks induktiivpooli ja kondensaatorite valik. Antud töös on kasutatud andmelehel [18] toodud soovituslikku lülitussageduse väärtust 500kHz.

Lülitussagedus on määratav takisti  $R_T$  kaudu (vt skeem). Vastavalt andmelehes [18] välja toodud valemile saab välja arvutada vajaliku takisti  $R_T$ , mis on ühendatud  $R_T$  viigu ja maa vahele:

$$f_{LYL(MHz)} = \frac{47,65}{R_T(k\Omega)} \quad (4.1)$$

kus  $f_{LYL(MHz)}$  – lülitussagedus, ühikutes MHz.

Vastavalt valemile (4.1) saab tuletada valemi  $R_T$  leidmiseks:

$$R_T = \frac{47,65}{f_{LYL(MHz)}} = \frac{47,65}{0,5} = 95,3k\Omega$$

Arvutusest järeldame, et 500 kHz lülitussageduse seadmiseks peame kasutama 95,3 k $\Omega$  takistit  $R_T$ .

### Šunttakistid $R_{SNSI}$ & $R_{SNSB}$

Akust tarbitava ja akusse laetava voolu jälgimiseks kasutab LTC4015 akulaadimissüsteem šunttakisteid. Šunttakistite takistus tuleb valida neid läbivast maksimaalsest voolust ning pinge tundlikkuspiirist lähtuvalt [18] järgi. Tundlikkuspiiriks on selline šundi pinge, millest alates hakkab aku kontrolleri voolu piirama. Šunttakistite väärtuse saab välja arvutada andmelehe [18] järgi järgmiste valemitega:

$$I_{IN(MAX)} = \frac{U_{\$TP}}{R_{SNSI}} \quad (4.2)$$

$$I_{CHG(MAX)} = \frac{U_{\$TP}}{R_{SNSB}} \quad (4.3)$$

kus  $I_{IN(MAX)}$  – maksimaalne sisendvool, A,

$R_{SNSI}$  – sisendvoolu mõõtmiseks mõeldud šunttakisti, m $\Omega$ ,

$I_{CHG(MAX)}$  – maksimaalne laadimisvool, A,

$R_{SNSB}$  – laadimisvoolu mõõtmiseks mõeldud šunttakisti, m $\Omega$ .

$U_{\$TP}$  – šunttakisti pinge tundlikkuspiir, V.

Maksimaalne sisend- ja laadimisvool on töö autori poolt sisendpinge ja -voolu järgi spetsifitseeritud voolu väärtused, mis antud töö puhul on:

$$I_{IN(MAX)} = 2 \text{ A}$$

$$I_{CHG(MAX)} = 3 \text{ A}$$

Teades voolu maksimaalseid väärtusi saab vastavalt valemitele (4.3) ja (4.4) avaldada šunttakistite väärtused:

$$R_{SNSI} = \frac{32mV}{I_{IN(MAX)}} = \frac{0.032}{2} = 0.016 \Omega$$

$$R_{SNSB} = \frac{32mV}{I_{CHG(MAX)}} = \frac{0.032}{3} = 0.106 \Omega$$

Arvutuste järgi võiksid šunttakistite väärtused olla 0,016  $\Omega$  ning 0,106  $\Omega$ . Päril komponentide valikul tuleb eelistada standardiseeritud E-ridade nimisuuruste väärtustega. E-rida on geomeetriline jada, mille iga elemendi  $a_n$  väärtus on eelmisest väärtusest  $a_{n-1}$  rea teguri  $\sqrt[m]{10}$  kordselt suurem: [42]

$$a_n = a_{n-1} * \sqrt[m]{10} \quad (4.4)$$

Sellela arvestades on leitud, et  $R_{SNSI}$  väärtuseks jääb 16 m $\Omega$  ning  $R_{SNSB}$  takistile kõige lähedasem E-rea E3 väärtus on 10 m $\Omega$  ehk süsteemis kasutatakse 10 m $\Omega$  takistit. [42] 10 m $\Omega$  takisti kasutamine ei tekita süsteemis täiendavaid piiranguid.

### Induktiivpool L

Induktiivpooli L arvutuseks on andmelehes [18] antud järgmine valem:

$$L = \frac{V_{BAT} * (1 - \frac{V_{BAT}}{V_{IN(MAX)}})}{0.25 * f * I_{CHG(MAX)}} \quad (4.5)$$

kus  $V_{BAT}$  – akude maksimaalne pinge, V,

$V_{IN(MAX)}$  – maksimaalne süsteemi sisendpinge, V,

$f$  – lülitussagedus, Hz.

Asendades valemisse 4.5 vastavad arväärtused selgub, et induktiivpooli induktiivsus peaks olema 11,95  $\mu\text{H}$ . Lähim E12 rea väärtus on 12  $\mu\text{H}$  ehk süsteemis kasutatakse 12  $\mu\text{H}$  kondensaatorit. [42] Andmelehe [18] järgi on lisanõue induktiivpooli valikul, et küllastusvool oleks vähemalt 60% kõrgem maksimaalsest laadimisvoolust.

### Kondensaatorid $C_{SYS}$ & $C_{BAT}$

Kondensaatori  $C_{SYS}$  väärtuse arvutamiseks on andmelehes [18] antud järgmine valem:

$$\Delta V_{SYS} = \frac{V_{BAT}}{V_{SYS}} \left( 1 - \frac{V_{BAT}}{V_{SYS}} \right) \frac{I_{CHG(MAX)}}{C_{SYS} * f_{SW}} + I_{CHF(MAX)} * ESR_{CSYS} \quad (4.6)$$

kus  $\Delta V_{SYS}$  – süsteemipinge pulsatsiooni tase, V,

$V_{SYS}$  – maksimaalne süsteemi sisendpinge, V,

$f_{SW}$  – süsteemi lülitussagedus, Hz,

$ESR_{CSYS}$  – kondensaatori  $C_{SYS}$  ekvivalentne jadatakistus,  $\Omega$ .

Kuna lähtespetsifikatsioonis ei ole pulsatsiooni kohta eritingimusi, on pulsatsiooni ülempiiriks kasutatud suurus 5mV.

Kuna skeemis on kavas kasutada keraamilisi kondensaatoreid, siis takistus  $ESR_{CSYS}$  on sedavõrd väike (< 1 m $\Omega$ ), et selle väärtust käesoleval arvutusel ei arvestata.

Asendades valemisse 4.6 vastavad arväärtused selgub, et kondensaatori  $C_{SYS}$  mahtuvus peaks olema 296  $\mu$ F. Lähim E6 rea väärtus on 330  $\mu$ F ehk süsteemis kasutatakse 330 uF kondensaatorit. [42]

Kondensaatori  $C_{BAT}$  väärtuse arvutamiseks on andmelehes [18] antud järgmine valem:

$$\Delta V_{BAT} = \Delta I_{P-P} \left( \frac{1}{8 * C_{BAT} * f_{SW}} + ESR_{CBAT} \right) \quad (4.7)$$

kus  $\Delta I_{P-P}$  – voolu pulseerimine induktiivpoolil, mille väärtuseks on valitud 25% maksimaalsest laadimisvoolust  $I_{CHG(MAX)}$ , A,

$ESR_{CBAT}$  – kondensaatori  $C_{BAT}$  ekvivalentne jadatakistus,  $\Omega$ .

Kuna skeemis on kavas kasutada keraamilisi kondensaatoreid, siis takistus  $ESR_{CBAT}$  on sedavõrd väike (< 1 m $\Omega$ ), et selle väärtust käesoleval arvutusel ei arvestata.

Asendades valemisse 4.7 vastavad arväärtused selgub, et kondensaatori  $C_{BAT}$  mahtuvus peaks olema 37,5  $\mu$ F. Lähim E6 rea väärtus on 47  $\mu$ F ehk süsteemis kasutatakse 47  $\mu$ F kondensaatorit.

## Väljatransistorid Q1 & Q2

Väljatransistoride valik süsteemis sõltub nende võimsuskadudest. Olulised parameetrid, mida väljatransistoride valikul peab jälgima ja mis võimsuskadusid mõjutavad, on: [18]

$R_{DS(ON)}$  – väljatransistori lätte ja neelu vaheline takistus, kui väljatransistor on juhtivas asendis,  $\Omega$ ,

$C_{RSS}$  – paisu ja neelu vaheline mahtuvus, H,

$Q_G$  – paisu laeng, C.

Vastavad parameetrid on saadaval transistori andmelehes. Antud ülesande jaoks valiti väljatransistorideks FDS6612 MOSFET transistorid. Kasutades transistori andmelehes [43] toodud parameetreid ning andmelehes [18] toodud valemid saab välja arvutada mõlema väljatransistori juhtivuskaod:

$$P_{COND(TOP)} = \left( \frac{V_{BAT}}{V_{SYS}} * I_{CHG(MAX)}^2 * R_{DS(ON)} \right) * (1 + \delta\Delta T) \quad (4.8)$$

kus  $P_{COND(TOP)}$  – ülemise väljatransistori (joonisel Q1) juhtivuskadu, W,

$\delta$  – temperatuuritegur, väljatransistoride jaoks tüüpiliselt 0,005/°C

$\Delta T$  – temperatuur võrreldes 25°C tasemega

$$P_{COND(BOT)} = \left( \left( 1 - \frac{V_{BAT}}{V_{SYS}} \right) * I_{CHG(MAX)}^2 * R_{DS(ON)} \right) * ((1 + \delta\Delta T)) \quad (4.9)$$

kus  $P_{COND(BOT)}$  – alumise väljatransistori (joonisel Q2) juhtivuskadu, W.

Asendades valemitesse 4.8 ja 4.9 vastavad arväärtused leiame, et ülemise väljatransistori juhtivuskadu on 0,126 W ja alumise juhtivuskadu 0,144 W.

Juhtivuskadu esineb mõlemal väljatransistoril, kuid lülituskadu  $P_{TRAN}$  on vaid ülemisel väljatransistoril Q1. Arvutada saab seda andmelehes [18] toodud valemiga:

$$P_{TRAN} = \frac{1}{2} * (V_{SYS})^2 * I_{CHG(MAX)} * C_{RSS} * f_{SW} \quad (4.10)$$

Asendades valemisse 4.10 vastavad arväärtused leiame, et Q1 lülituskadu on 0,0134 W.

Samuti esineb paisu laadimisel ümberlaadimiskadu  $P_G$ , mida saab arvutada andmelehes [18] esitatud valemiga:

$$P_G = (Q_{GTOP} + Q_{GBOT}) * f_{SW} * V_{SYS} \quad (4.11)$$

kus  $Q_{GTOP}$  – ülemise väljatransistori paisu laeng, C,

$Q_{GBOT}$  – alumise väljatransistori paisu laeng, C.

Asendades valemisse 4.11 vastavad arväärtused selgub, et ümberlaadimiskadu on 0,0972 W.

### **Alapinge-talitluse blokeering**

LTC4015 akulaadija väärtalitluse välistamiseks, kui süsteemi sisendpinge on väikesem aku talitluspingest, on võimalik rakendada LTC4015 sisemist blokeeringut. Nn. alapinge blokeering kasutab pingejagurit, mille väljundpinge suunatakse LTC4015 kiibi UVCLFB viigule. Sellelt viigult mõõdab pinget sisemine blokeerimislülitus, mis rakendub viigul oleva pinge 1,2 V tasemelt. St akulaadija töö on katkestatud, kui pinge UVCLFB viigule maa suhtes on alla 1,2 V.

UVCLFB viiguga ühendatud pingejaguriga saab minimaalset sisendpinget spetsifitseerida. Andmelehes [18] on kirjas, et minimaalne sisendpinge, mis peaks olema üle 4,3 V ühe akuelemendi kohta või üle  $V_{BAT(MAX)}$  pinge, mis kahe liitium-ioon aku korral on 8,4 V. Antud töös kasutatakse pingejaguri takistite arvutamiseks  $V_{BAT(MAX)}$  pinge väärtust. Et sisendpinge 8,4 voldi juures oleks UVCLFB pinge veidi üle 1,2 V, peavad pingejaguri takistid olema vastavalt 60 k $\Omega$  ja 10 k $\Omega$ .



## 5. Energiahaldussüsteem ja selle komponendid

### 5.1 Eesmärk

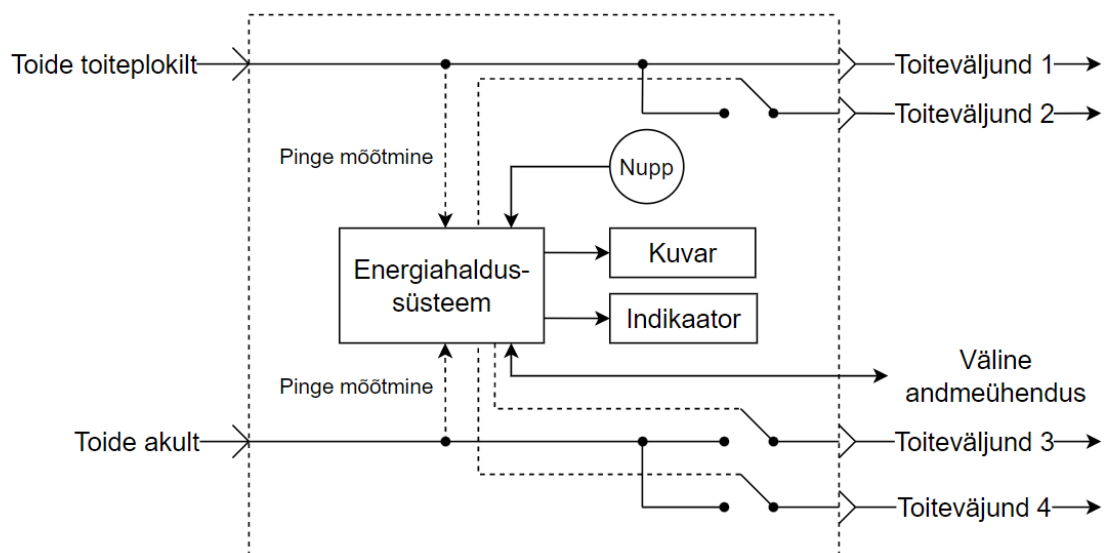
Energiahaldussüsteemi eesmärk on aku laadimise parameetrite jälgimine ja seadistamine ning toidetavate välise seadmete toitelülituste teostamine. Energiahaldussüsteem peaks võimaldama edastada kasutajale adekvaatset infot aku laadimise kohta ning võimaldama toite lülitamist kolmele välisele toidetavale seadmele.

Kasutaja informeerimiseks on rakendatud järgmised viisid:

- Leed-indikaatorid (aku laadimise olek)
- Vedelkristall-tabloo, millelt on nähtavad suurused
- Andmesideühendus (UART-liidese kaudu).

### 5.2 Mikrokontroller

Energiahaldussüsteemi ülesehitus on esitatud joonisel 5.1:



Joonis 5.1 Energiahaldussüsteemi ülesehitus

Energiahaldussüsteemi keskmeks on mikrokontroller, mille abil saadakse infot olekuparameetrite kohta ja mille kaudu juhitakse kolme MOSFET lülitit välise seadmete toite kommuteerimiseks. Välisseadmete lülitamine on vajalik näiteks selleks, et vältida

aku liigset tühjenemist. Seetõttu on kavandatud aku väljalülitamine peale aku laetuse taseme langemist alla kriitilise suuruse.

Mikrokontroller jälgib talitlussuurusi kahel viisil:

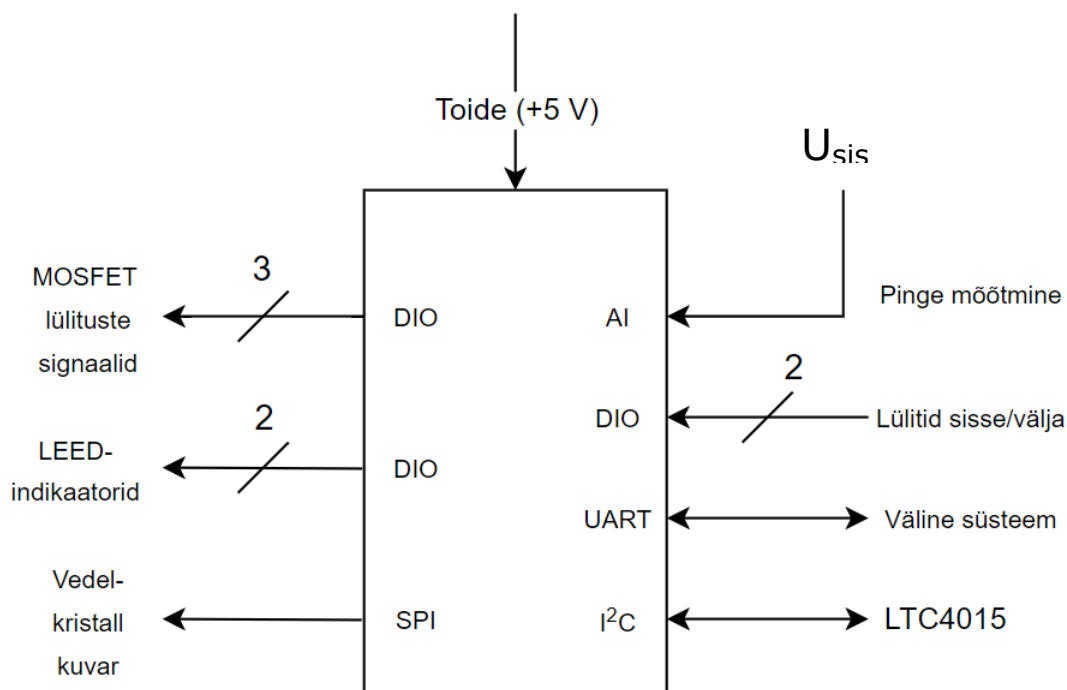
- 1) Otsest mõõtmiste kaudu, mida teostab mikrokontroller sellele sisse ehitatud analoog-digitaalmuunduri kaudu;
- 2) LTC4015-akukontrolleri poolt edastatud olekuparameetrite kaudu. Selleks on mikrokontrolleri külge on ühendatud ka akulaadijani viiv I<sup>2</sup>C andmeside siin, mille kaudu saab mikrokontroller informatsiooni akulaadija tööst.

Vedelkristallekraan, mille kaudu vajalik info kasutajani jõuab, on ühendatud mikrokontrolleriga SPI siini kaudu. Näitena on alloleval joonisel esitatud näide vedelkristallkuvarist, mis antud rakendusse planeeritud (vt Joonis 5.2).



Joonis 5.2 Näide OLED SPI-liidesega vedelkristallkuvarist (allikas: tme.eu)

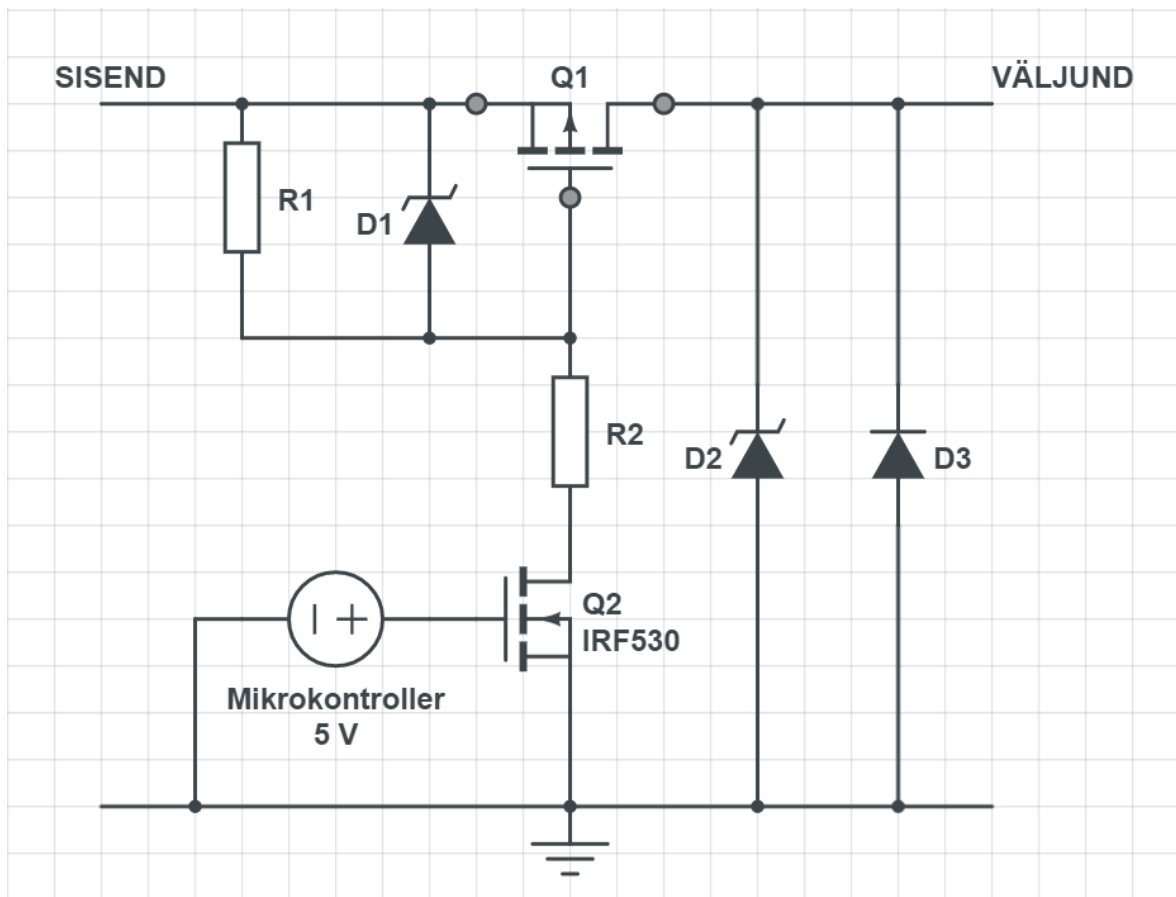
Välise toidetava seadmega andmeühenduseks on mikrokontrolleril UART ühendus.



Joonis 5.3 Energiahaldussüsteemi üldine ühendusskeem mikrokontrolleriga.

## 5.3 Toitelülitid

Et juhtida toitelülitusi mikrokontrolleri abil, disainiti kolm identset kahe MOSFET lülitiga lülitusskeemi. Võimsus, mida lülitatakse toiteploki või akust välise toidetava seadmeni, liigub läbi ülemise, P-kanaliga MOSFET lüliti. Et P-kanaliga MOSFET lüliti oleks juhtivas režiimis peab paisu ja läte vaheline pinge  $U_{PL(P-KANAL)}$  olema väiksem MOSFET-i andmelehes seatud lävipingest. Läte on ühendatud aku või toiteploki väljundile ehk negatiivse  $U_{PL}$  pinge jaoks peab pais olema ühendatud läbi takisti maaga. Kui paisu ja maa vahel aga ühendust ei ole, on MOSFET mitte juhtivas režiimis. Kuna P-kanaliga MOSFET-i juhtivuse režiim sõltub paisu külge ühendatud takisti ühendusest maaga, siis on takisti ja maa vahele ühendatud N-kanaliga MOSFET lüliti. N-kanaliga MOSFET lüliti vajab juhtivas režiimis oleku jaoks positiivset paisu ja läte vahelist pinget  $U_{PL(N-KANAL)}$  ning seda positiivset pinget pakub antud lahendusel mikrokontroller. Sellise lahenduse korral saabki toitelülitust teostava P-kanaliga MOSFET lüliti juhtida mikrokontrolleri signaali abil.



Joonis 5.4 MOSFET lülituse elektriskeem koos kaitsekomponentidega.

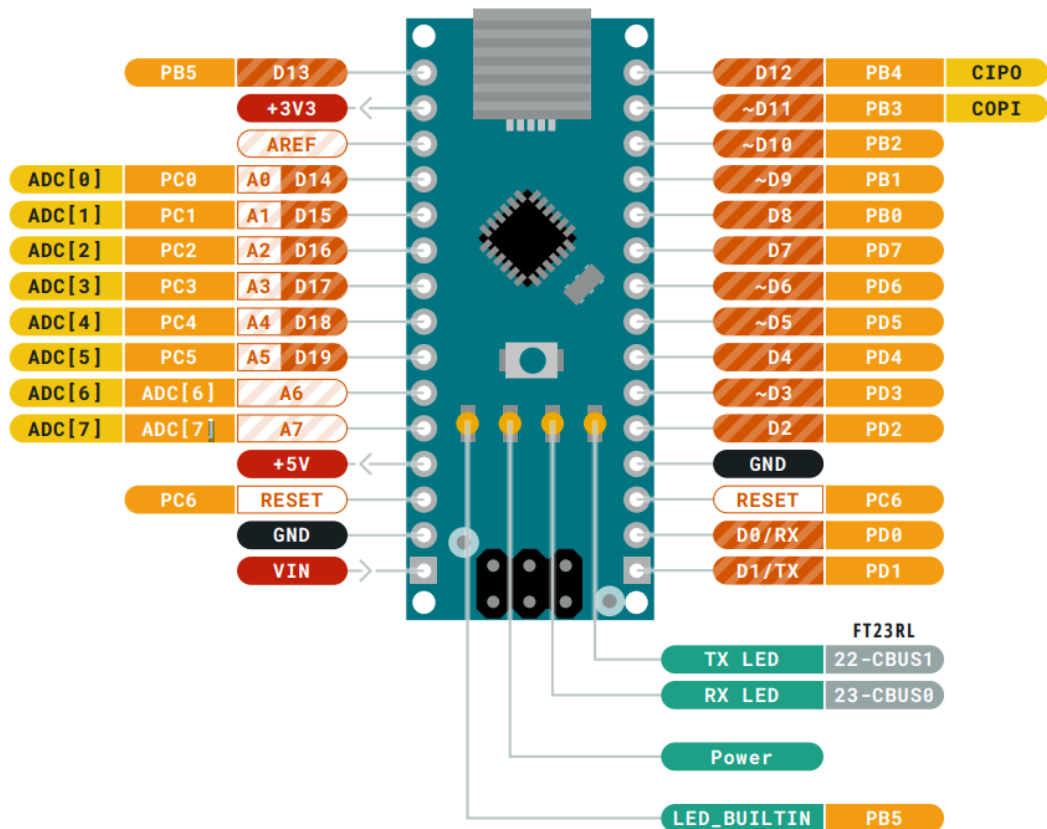
Kui lätte ja paisu vaheline pinge muutub liiga suureks, võib see kahjustada MOSFET lülitust. Selle jaoks lisati P-kanaliga MOSFET-i lätte ja paisu vahele takisti ning stabilitron. Stabilitron peab hakkama juhtima 15 V pinge korral ning joonisel 5.2 olevate takistite R1 ja R2 abil tekib pingejagur, mis vähendab lätte ja paisu vahelist pinget.

Induktiivse lülituse kaitseks peab kaitsehelas olema negatiivse tagasivoolu diod (joonisel 5.2 D3). Liigpinge kaitseks kasutatakse TVS diodi (joonisel 5.2 D2).

## 5.4 Komponentide valik

### 5.4.1 Mikrokontroller

Mikrokontrolleriks valiti Arduino Nano. Arduino Nano valiti selle kompaktse suuruse ning ülesande jaoks piisavate digitaal- ja analoogühenduste pärast. Arduino Nano võimaldab 14 digitaalühendust ning 8 analoogühendust. [44]



Joonis 5.2 Arduino Nano ühendused [44].

### 5.4.2 MOSFET lülitid

Kõigi kolme toitelülituse jaoks disainiti identsed ahelad identsete komponentidega. Maksimaalne pinge, mis P-kanaliga toitelülititeni jõuda võib, on 24 V. Maksimaalne läbitav vool võib olla kuni 5 A. Selle tõttu valiti MOSFET, mis taluks vähemalt 24 V pinget ning 5 A voolu. Valituks otsustus P-kanaliga MOSFET FDS4675. [45]

### 5.4.3 Kaitseahel

TVS diodiks valiti ka sisendkaitseahelas kasutatud 30 V pealt rakenduv 1.5KE30A. [25]

Tagasivooludiodiks valiti MBR1100. [27]

## 5.5 Monitooring

Et akulaadija süsteemi monitoorida, jälgida erinevaid parameetreid nagu aku laetuse tase ning sisend- ja väljundpinged, ja saada hoiatusi parameetritest väljas või valesti toimuvate protsesside kohta kasutab LTC4015 infoedastust I<sup>2</sup>C jadasiini abil. I<sup>2</sup>C

jadasiin on antud süsteemis ühendatud Arduino Nano mikrokontrolleriga, mis koostöös LTC4015-ga haldab akulaadija tööd ning edastab vajaliku informatsiooni süsteemi kasutajale.

### 5.5.1 Mõõteregeister

Oluline andmeside kasutus on mõõtetulemuste monitooring. Mõõtetulemuse, näiteks sisendpinge  $V_{IN}$  saamiseks tuleb mikrokontrolleril pöörduda sisendpinge mõõtetulemuse registri poole, mis asub kuueteistkümnenäädik koodis aadressil 0X3B. Andmelehe järgi tuleb  $V_{IN}$  väärtuse saamiseks registrist loetud väärtus korrutada 1,648 millivoldiga: [18]

$$V_{VIN} = [VIN] * 1.648 mV \quad (5.1)$$

### 5.5.2 Olekuregister

Veel üheks oluliseks monitooringu kasutuseks on süsteemi oleku monitooring olekuregistrite abil. Olekuregister SYSTEM\_STATUS asub aadressil 0x39 ning koosneb 16 bitist, millest kasutusel on 14. Näiteks saab olekuregistrist SYSTEM\_STATUS bitilt 6 lugeda ok\_to\_charge väärtust. Kui ok\_to\_charge väärtus on kõrge ehk 1 tähendab see, et kõik süsteemi tingimused aku laadimiseks on täidetud. [18]

### 5.5.3 Seaderegister

Laadimise seadesuursi saab konfigurereida seaderegistrite abil. Seaderegistrite hulka kuulub näiteks ICHARGE\_TARGET register, mis asub aadressil 0x1A ning koosneb viiest bitist. ICHARGE\_TARGET register reguleerib aku laadimisvoolu. [18]

### 5.5.4 Hoiatusregistrid

Süsteemilt tulevaid hoiatusi saab jälgida LIMIT\_ALERTS registri abil. LIMIT\_ALERTS register asub aadressil 0x36 ning koosneb kuueteistkümnest bitist, millest iga ühe väärtus näitab eraldi hoiatuse olekut. Erinevate bittide väärtuste abil saab mikrokontroller teada, mis hoiatusega tegemist on. Hoiatuste registrist saab monitoorida näiteks vin\_hi\_alert hoiatust. Kui aadressil 0x36 on 8. bitt ehk vin\_hi\_alert kõrge ehk 1 tähendab see, et sisendpinge on ületanud spetsifitseeritud väärtuse ning on põhjustanud SMBALERT hoiatuse. [18]

Samuti saab spetsifitseerida, mis hoiatusi me mikronkontrolleri abil näha tahame. Seda on võimalik teha EN\_LIMIT\_ALERTS registri abil. EN\_LIMIT\_ALERTS register asub aadressil 0x0D ning koosneb 16 bitist. Näiteks kui tahta, et sisendpinge spetsifitseeritud väärtuse ületamisel tuleks SMBALERT hoiatus hoiatuse registri 0x36 abil, peame me 0x0D registris aktiveerima 8. biti. [18]

## 5.6 Olekuparameetrite arvutus

Olulisimad olekuparameetrid on aku laetustase, akust kasutatav võimsus ja tööaeg aku tühjenemiseni. Need suurused leitakse läbi energiahaldussüsteemi algoritmi koosseisus teostatavate arvutuste.

### 5.6.1 Aku laetustase

Aku laetustase on leitav kasutades kuloniloenduri väärtust, milline on LTC4015 kontrolleri loetav numbrilise väärtusena.

Kuloniloenduri häälestamiseks kasutatakse andmelehes esitatud põhimõtteid. Nt 3500 mAh mahutavusega aku kogulaengu väärtuseks on:

$$Q_{aku,kokku} = Q'_{aku(Ah)} \cdot 3600s = 3,5 \cdot 3600 = 12600 C \quad (5.2)$$

Kuloniloenduri registri QCOUNT suurus on 16 bitti, mille abil saab salvestada väärtuse kuni 65536. Kuloniloenduri täpsuse määramiseks saab kasutada ka eelkordajat (ing k. prescaler), mille väärtuse saab seada selleks määratud registris (QCOUNT\_PRESCALE\_FACTOR). On otstarbekas seadistada kordaja selliselt, et see mahutaks laengu suuruse koos varuga, sest aku tegelik mahutavus võib olla suurem nimiandmetest. Eelkordaja määramiseks tuleks arvestada, et akus oleva laengu leidmiseks saab kasutada seost:

$$Q_{ES} = [QCOUNT] \cdot K_{QC} \cdot R_{SNSB} / [QCOUNT\_PRESCALE\_FACTOR] \quad (5.3)$$

Konstant  $K_{QC}$  on määratud seadme enda poolt, selleks on 8333,33 Hz/V

Arvestades voolu-tagasiside takisti  $R_{SNSB}$  väärtusega, saab leida kuloniloenduri jaoks sobiva eelkordaja väärtuse, soovitatavalt varuga 2 [18].

$$[QCOUNT\_PRESCALE\_FACTOR] \geq \frac{Q_{aku,kokku}}{65535} \cdot K_{QC} \cdot R_{SNSB} \cdot 2 \quad (5.4)$$

Näiteks kasutades LTC4015 näidisskeemi moodulit DC2039A, on  $R_{SNSB}$  väärtuseks 4 mΩ. Sellisel juhul on eelkordaja väärtuseks vähemalt:

$$[QCOUNT_{PRESCALE\_FACTOR}] \geq \frac{12600}{65535} \cdot 8333,33 \cdot 0,004 \cdot 2 = 12,8$$

Seega sobilik täisarvkordne eelkordaja väärtus on 3500 mAh aku korral 13.

Akuse järgi jäänud energia on leitav ligikaudse hinnanguna kasutades valemit:

$$E_{es}(t) = Q_{ES} \cdot U_{aku,tüüp} \cdot N_{el} \quad (5.5)$$

Siin lahenduses on kahe liitiumioonaku korral  $U_{aku,tüüp} = 3,6 \text{ V}$  ja kasutatud akuelementide arv  $N_{el} = 2$ .

### 5.6.2 Tarbitav võimsus

$$P_{aku} = U_{aku} \cdot I_{aku} \quad (5.6)$$

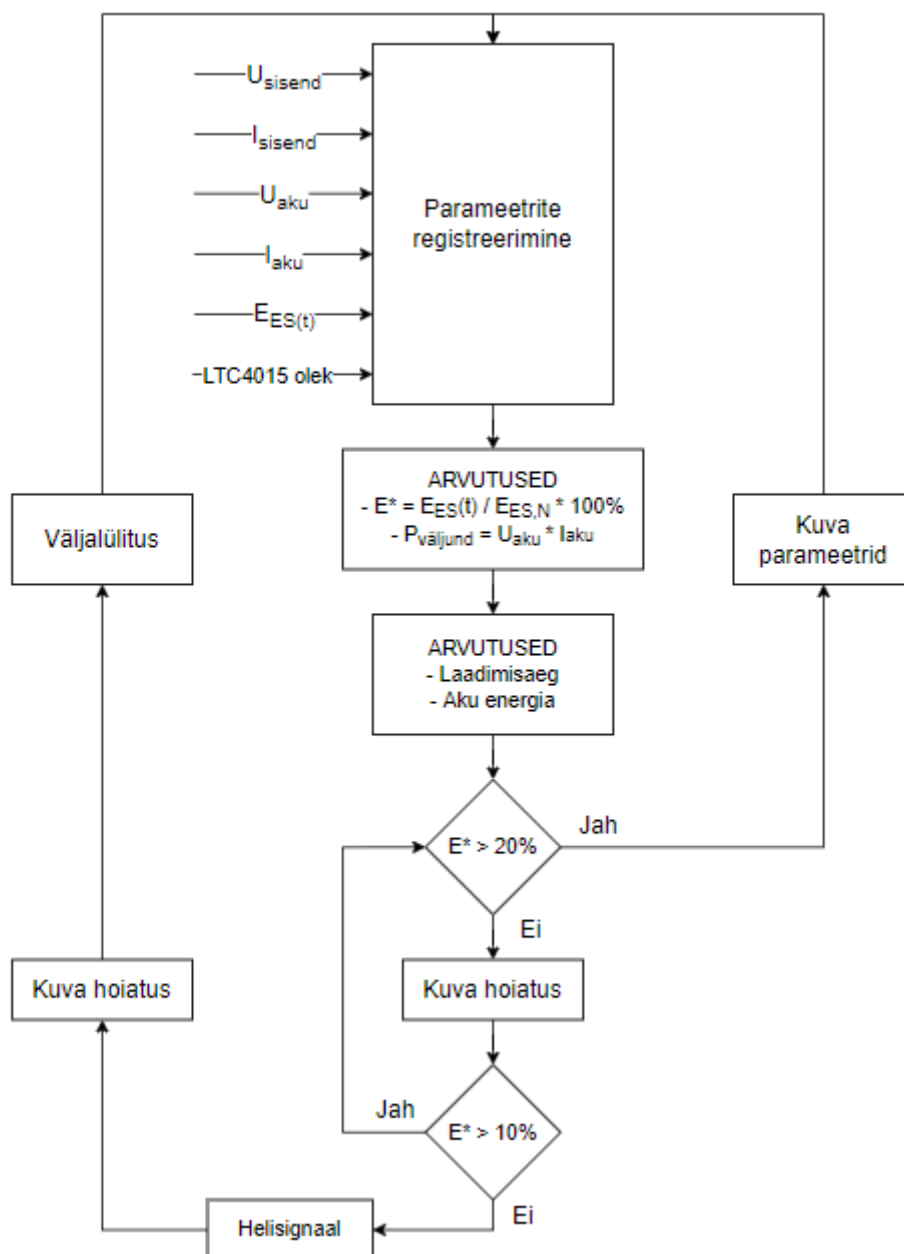
### 5.6.3 Tööaeg aku tühjenemiseni

$$t_{tühj} = \frac{E_{ES}(t)}{P_{aku}} \quad (5.7)$$

## 5.7 Energiahaldussüsteemi algoritm

Mõõteandmete kuvamine ning aku laetustaseme arvutamine ja väljalülitus toimuvad Joonisel 5.4 toodud algoritmi järgi. Kõik algoritmil välja toodud arvutused ja käsud teeb mikrokontroller Arduino. Sisendpingete  $U_{sis}$  ja  $U_{aku}$  mõõtmine toimub läbi pingejaguri, mille väljund on ühenduses mikrokontrolleriga. Voolu väärtused saadakse šunttakistite kaudu läbi I<sup>2</sup>C andmeühenduse. Esmalt registreerib mikrokontroller parameetrid ning seejärel toimub laetustaseme  $E^*$  ja väliseadme võimsuse  $P_{väljund}$  arvutus. Antud arvutuste järgi arvutab mikrokontroller ka järelejäänud/vajaliku laadimisaja ning aku energia. Juhul kui laetustase on alla 20 %, kuvab süsteem kuvarile hoiatuse. Kui laetustase on alla 10%, hoiatab süsteem kasutajat lisaks ka helisignaali ning lülitab akutoite välja. Kui aku laetustase on üle 20 %, kuvab süsteem parameetreid kuvaril.





Joonis 5.4 Energiahaldussüsteemi algoritm

## 6. Praktilised katsed

Praktilised katsed süsteemi töö kontrollimiseks toimusid võrreldes eespoolkirjeldatud struktuuriga väikesemas ulatuses. Põhjuseks oli LTC4015 kontrolleri ülipikk tarneaeg lahenduse ettevalmistava osa (sh trükkplaadi disain) valmimisel. Alternatiivina oli katsetamiseks saadaval LTC4015 akulaadija tootjapoolne näidismoodul DC2039A. Peamine antud töös kirjeldatud funktsionaalsus tugineski LTC4015 talitlusele ja funktsioonidele, seepärast kontrolliti andmevahetuse parameetreid ja LTC4015 talitlust, ülesseadmist ja põhiparameetrite määramist.

Katsetusteks on valitud eeskätt aku laadmist ja süsteemi olekut kirjeldavate parameetrite selgitamine

- Aku laetuse tase
- Akus olemasolev energiakogus
- Akust tarvitav võimsus

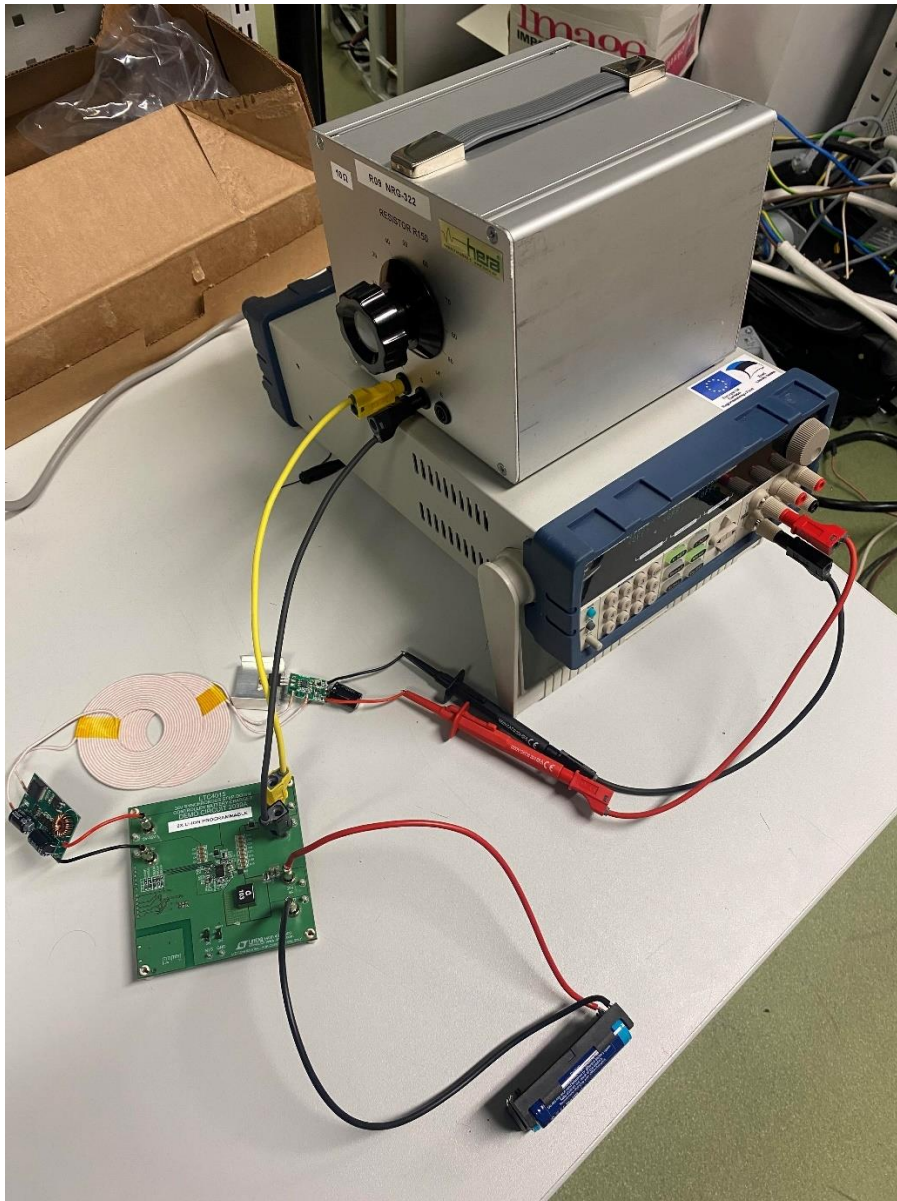
### 6.1 Katseskeem ja komponendid

Katseteks kasutatud skeemi üldine esitus on joonisel 6.1:



Joonis 6.1 Katseteks kasutatud skeem

Katseskeemis kasutati joonisel 6.2 näidatud komponente.



Joonis 6.2 Pilt katseskeemist

Akudena oli rakendatud 2 Li-Ioon aku elementi, mille mahutavus oli 3500 mAh.

Katseskeemi seadistuseks oli teostatud kuloniloenduri seadistamine, nagu on kirjeldatud alapeatükis 5.6.1, kasutades järgmisi suuruseid:  $R_{SNSB} = 4 \text{ m}\Omega$  [46], aku kogumahutavus  $Q_{\text{aku,kokku}} = 3500 \text{ mAh}$ .

## 6.2 Katsete käik

Katsete sooritamine koosnes kahest faasist:

- aku tühjendamine reostaadiga;

- aku laadimine.

Esmalt laeti aku tühjaks koormusreostaadiga ning jälgiti aku pinget, kuni see langes tühjenemiskiirini ning pandi kirja vajalikud parameetrid tühja aku korral. Seejärel laeti aku täis. Esmalt laeti akut konstantse vooluga ning seejärel konstantse pingega, kuni sisendvool langes alla 5 % aku spetsifitseeritud laadimisvoolu, milleks oli 2 A.

Tulemused on esitatud alltoodud tabelis:

<b>Kuloniloenduri algväärtus</b>	<b>Kuloniloenduri lõppväärtus</b>	<b>Akuse laetud laeng, C</b>	<b>Akuse laetud energia, Wh</b>
16395	44432	9889	19,8

Antud tulemustest lähtuvalt on võimalik kinnitada aku laadimisfunktsioonide töö, kuigi akude eeldatud mahtuvust 3500 mAh ei ole võimalik antud tulemustega kinnitada.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli kujundada toitesüsteem, mis on ette nähtud eeskätt õppelaboris kasutatavate mõõteseadmete toiteks. Uurimismeetoditena kasutati olemasolevate moodulite uurimist, komponentide analüüsimist, valimist ja arvutamist ning elektriskeem ja trükkplaadi kujundamist. Elektriskeem ja trükkplaat kujundati programmis *Altium*.

Töö käigus selgitati esmalt nõudeid süsteemile ning seati lähtespetsifikatsioon süsteemi kujundamiseks. Esitati peamised funktsionaalsed suurused, nagu sisend- ja väljundpinged, voolud ja võimsused, kirjeldati töökeskkonda ning arvutati välja nõuded aku mahutavusele. Tutvustati olemasolevaid sarnaseid mooduleid, mille käigus jõuti järeldusele, et kõikidele lähtespetsifikatsioonidele vastavat terviklikku moodulit turul saadaval ei ole, koostati struktuurskeem

Õppelaborites on tõenäolised rikked ja valeühendused, kus tudengid võivad eksida sisendtoite parameetritega, seega kujundati tugevad kaitseahelad ja pingevahemikud, mille kaitse peab töötama. Järgnevalt valiti süsteemi toimimiseks olulisemad komponendid: sisendtoitemoodul, akud ja akulaadija. Otsustati kasutada 2 liitiumioonakut ja 2 sisendtoidet, millest põhiline on juhtmevabal laadmisel põhinev moodul. Akulaadijaks valiti LTC4015, mille olulisemate ümbritsevate komponentide, näiteks kondensaatorite ja induktiivpooli, väärtused arvutati vastavalt sissejuhatuses seatud toiteparameetritele. Ülaltoodud info abil kujundati süsteemile vastav elektriskeem.

Eraldi üksusena koostati ka mikrokontrolleril põhinev energiahaldussüsteem, mille kaudu toimuvad välistoite lülitused ning mis kuvab kasutajale LCD ekraani abil vajalikud akulaadimisparameetrid. LTC4015 akulaadija tarneraskuste tõttu puudus võimalus trükkplaadi koostamiseks. Mõõtetulemuste tegemiseks kasutati tootjapoolse näidismooduli DC2039A võimalusi. DC2039A abil sooritati katsed aku tühjenemisel ning laadimisel.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] ABB, „M2M,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.alliedelec.com/m/d/61dde222c37fd1710651626eeb8856c0.pdf>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [2] ElectronicsTutorials, „Ohms Law and Power,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.electronics-tutorials.ws/dccircuits/dcp\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/dccircuits/dcp_2.html). [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [3] R. Maasik, „Kasulik töö. Kasutegur,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://vara.e-koolikott.ee/taxonomy/term/3715>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [4] Omni Calculator, „Battery Capacity Calculator,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.omnicalculator.com/other/battery-capacity>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [5] ElectronicsNotes, „Li-ion Lithium Ion Battery Charging,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-charging.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-charging.php). [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [6] Battery University, „BU-409: Charging Lithium.ion,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [7] B. Zollo, „Pre-Charging vs. Formation in Lithium-Ion Cells,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electronicdesign.com/power-management/whitepaper/21167948/keysight-technologies-precharging-vs-formation-in-lithiumion-cells>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [8] W. Chang, „The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/953792>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [9] A. Rosin, S. Link, H. Hõimoja, I. Drovtar, *Energiasalvestised ja -salvestustehnoloogiad*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika instituut, 2015.
- [10] PowerTech, „Lithium-Ion State of Charge (SoC) measurement,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-state-of-charge-soc-measurement>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [11] AliExpress, „Lithium Battery Charge Controller Battery Protection Board 6V-60V LCD Display Battery Charging Control Board 10A 20A,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.aliexpress.com/item/4000437563581.html>. [Kasutatud 09. 05. 2022].
- [12] Handson Technology, „18650 Battery Charging Module with Protection,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://handsontec.com/index.php/product/18650-battery-charging-module-with-protection>. [Kasutatud 09. 05. 2022].

- [13] Handson Technology, „18650 Lithium Battery Charger with Protection,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/18650-Lithium%20charger.pdf>. [Kasutatud 09. 05. 2022].
- [14] JOOM, „Automatic Protection! Dual USB 5V 1A 2.1A Mobile Power Bank 18650 Lithium Battery Charger Board Digital LCD Charging Module,” 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.joom.com/en/products/60a23e34c777ec0176d9259f>. [Kasutatud 09. 05. 2022].
- [15] Electronis-lab, „TINYCHARGER – SINGLE CELL LI-ION BATTERY CHARGER WITH MONITORING,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electronic-lab.com/tinycharger-single-cell-li-ion-battery-charger-with-monitoring>. [Kasutatud 09. 05. 2022].
- [16] Texas Instruments, „INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface,” August 2008 [Kontrollitud Detsember 2015]. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>. [Kasutatud 09. 05. 2022].
- [17] Amazon, „Lithium Battery Charging Control Protection Board Charger Switch Module for 12V-24V Storage Batteries,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.amazon.com/Lithium-Battery-Charging-Protection-batteries/dp/B07CTN2KT7>. [Kasutatud 09. 05. 2022].
- [18] Linear Technology Corporation, „Multichemistry Buck Battery Charger Controller with Digital Telemetry System,” 2015. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4015fb.pdf>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [19] A. Raj, „Crowbar Circuit,” 2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://circuitdigest.com/electronic-circuits/crowbar-circuit-diagram>. [Kasutatud 26. 03. 2022].
- [20] Tallinna Tehnikaülikool, „Sulavkaitse,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/3\\_1\\_Sulavkaitse.pdf](http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/3_1_Sulavkaitse.pdf). [Kasutatud 26. 03. 2022].
- [21] TE Connectivity, „PolySwitch Resettable Devices,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://web.archive.org/web/20150122051210/http://www.te.com/content/dam/te/global/english/products/Circuit-Protection/knowledge-center/documents/polyswitch-fundamentals.pdf>. [Kasutatud 26. 03. 2022].
- [22] Components101, „How to use TVS Diodes for Transient Voltage Suppression,” 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://components101.com/articles/how-to-use-tvs-diodes-for-transient-voltage-suppression>. [Kasutatud 26. 03. 2022].
- [23] Littelfuse Inc, „PolySwitch® Resettable PPTCs,” 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.littelfuse.com/media?resourcetype=datasheets&itemid=bb20f3f6-6a73->

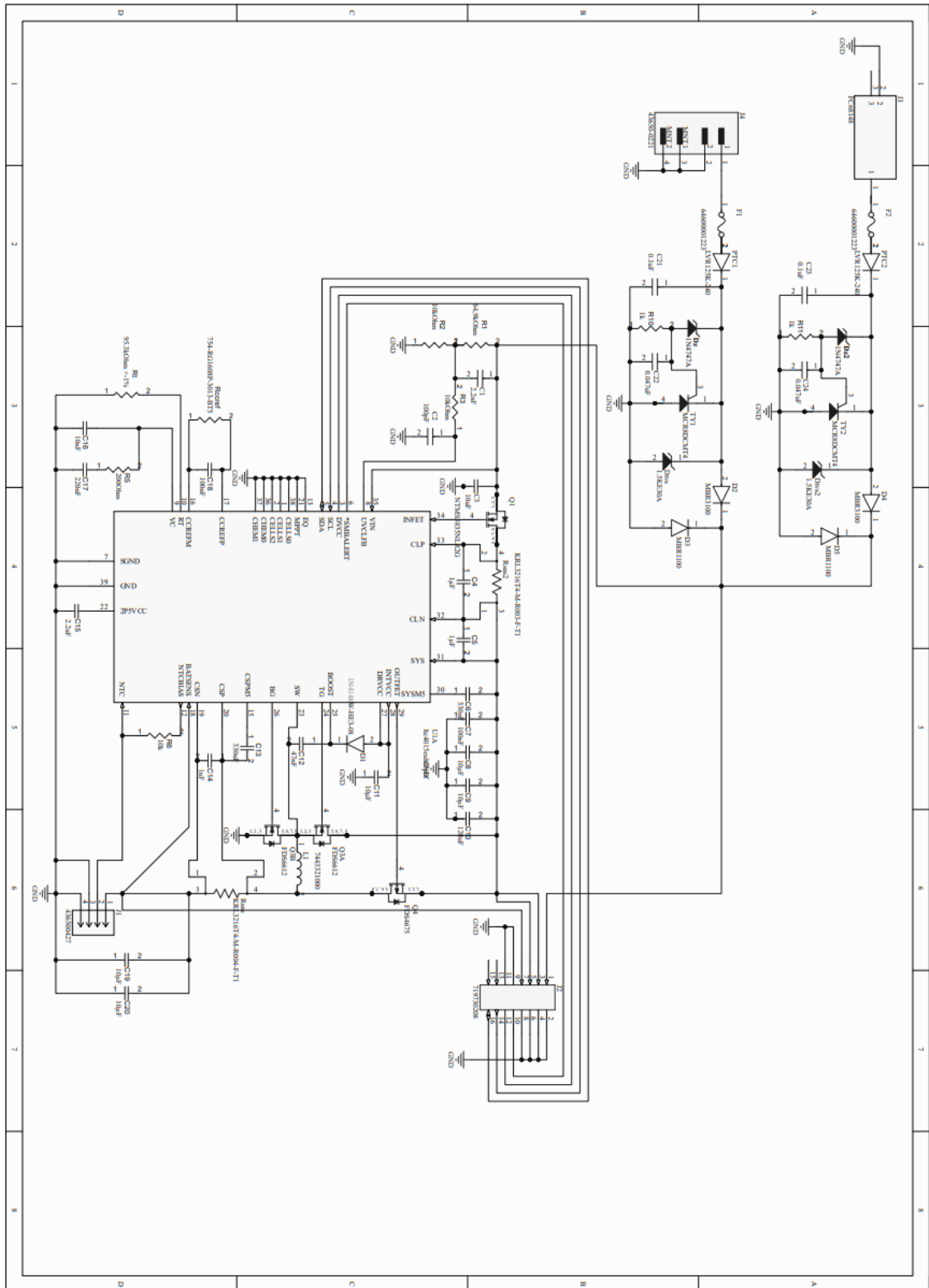
- 4212-849f-4059a7484948&filename=littelfuse-ptc-lvr-device-datasheet. [Kasutatud 27. 03. 2022].
- [24] Semiconductor Components Industries, „1N4728A - 1N4758A,” 2009 [Kontrollitud august 2021]. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.mouser.ee/datasheet/2/308/1N4736AT\\_D-2309095.pdf](https://www.mouser.ee/datasheet/2/308/1N4736AT_D-2309095.pdf) [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [25] STMicroelectronics, „1.5KE,” 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/389/cd00000663-1795614.pdf>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [26] Semiconductor Components Industries, „MBR3100,” 2006. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mbr3100-d.pdf>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [27] Semiconductor Components Industries, „MBR1100,” 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mbr1100-d.pdf>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [28] A. Gopinath, „All About Transferring Power Wirelessly,” 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://web.archive.org/web/20150119044123/http://www.efymagonline.com/pdf/52\\_Wireless%20Power%20Transfer\\_EFY%20August%202013.pdf](https://web.archive.org/web/20150119044123/http://www.efymagonline.com/pdf/52_Wireless%20Power%20Transfer_EFY%20August%202013.pdf). [Kasutatud 05. 03. 2022].
- [29] R. Lahtmets, „Elektrotehnika alused,” 2001. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro\\_alused/4Induktsioon.pdf](http://www.ene.ttu.ee/leonardo/elektro_alused/4Induktsioon.pdf). [Kasutatud 05. 03. 2022].
- [30] DFRobot, „Wireless Charging Module 5V/300Ma,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.dfrobot.com/product-1283.html>. [Kasutatud 05. 03. 2022].
- [31] DFRobot, „Power modules,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.dfrobot.com/category-70.html>. [Kasutatud 16. 05. 2022].
- [32] Adafruit, „Inductive Chargers,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.adafruit.com/category/331>. [Kasutatud 05. 03. 2022].
- [33] Sparkfun, „Wireless Power Transfer Tx Coil Module,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sparkfun.com/products/15935>. [Kasutatud 05. 03. 2022].
- [34] Sparkfun, „Wireless Power Transfer Rx Coil Module,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sparkfun.com/products/15934>. [Kasutatud 05. 03. 2022].
- [35] M. Brain, „How Lithium-ion Batteries Work,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [36] Epec, „Battery cell comparison,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>. [Kasutatud 06. 03. 2022].



- [37] Battery University, „BU-802b: What does Elevated Self-discharge Do?,” 2021. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://batteryuniversity.com/article/bu-802b-what-does-elevated-self-discharge-do>. [Kasutatud 06.03.2022].
- [38] Large, „Protected vs Unprotected Lithium Ion Battery,” 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.large.net/news/8pu43mh.html>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [39] NKON, „18650,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eu.nkon.nl/rechargeable/li-ion/18650-size/circuit-protection/protected.html>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [40] NKON, „XTAR 18650 3300mAh (protected) - 10A,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://eu.nkon.nl/rechargeable/li-ion/18650-size/xtar-18650-3300mah-protected-10a.html>. [Kasutatud 06. 03. 2022].
- [41] Analog Devices Inc, „Battery Charger IC,” 2022. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/en/product-category/battery-charger-ic.html> [Kasutatud 02. 04. 2022].
- [42] Wikipedia, „E-rida,” 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://et.wikipedia.org/wiki/E-rida>. [Kasutatud 27. 03. 2022].
- [43] Semiconductor Components Industries, „FDS6612A,” 2007 [Kontrollitud oktoober 2017]. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fds6612a-d.pdf>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [44] Arduino, „Arduino Nano,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://store.arduino.cc/products/arduino-nano>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [45] Fairchild Semiconductor Corporation, „FDS4675,” 2001. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fds4675-d.pdf>. [Kasutatud 10. 05. 2022].
- [46] ANALOG DEVICES, INC. 2015, „DEMO MANUAL DC2039A,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/DC2039A.pdf>. [Kasutatud 17. 05. 2022].

**LISAD**

# Lisa 1. Elektriskeem



## Lisa 2. Trükkplaat

