



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonika instituut

Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK40LT

*Rain Ellermaa*

**Liitium-polümeer aku balansseerimise  
ja pideva laadimise juhtsüsteem**  
Bakalaureusetöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2014

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis projektijuht, vanem teadur, Raivo Sell juhendamisel

“.....” .....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....201... a.

..... allkiri

## BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2014 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Rain Ellermaa 082775MAHB  
Õppekava: MAHB02/04  
Eriala: Mehhatroonika  
Juhendaja: Projektijuht, vanem teadur, Raivo Sell  
Konsultandid:

### BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Liitium-polümeer aku balansseerimise ja pideva laadimise juhtsüsteem

(inglise keeles) Lithium-polymer battery balancing and continuous charging control system

### Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Taustauuringud ja olemasolevate lahenduste analüüs	10. aprill
2.	Põhimõttelahenduse väljatöötamine	28. aprill
3.	Prototüübi arendus	13. mai
4.	Testimine ja dokumenteerimine	20. mai

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Laadimise lahendus akude eluea pikendamiseks ja laadimise ning kasutamise ohutuse tagamiseks.

### Täiendavad märkused ja nõuded:

**Töö keel:** Eesti keel

Kaitsmistaoitus esitada hiljemalt 12.05.2014

**Töö esitamise tähtaeg** 22.05.2014

Üliõpilane ..... /allkiri/ ..... kuupäev.....

Juhendaja..... /allkiri/ ..... kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

<b>BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE</b>	<b>3</b>
<b>SISUKORD</b>	<b>4</b>
<b>EESSÕNA</b>	<b>5</b>
<b>SISSEJUHATUS</b>	<b>6</b>
<b>1 TAUSTAUURINGUD JA OLEMASOLEVATE LAHENDUSTE ANALÜÜS</b>	<b>8</b>
1.1 Olemasolevate süsteemide võrdlus	8
<b>2 PÕHIMÕTTELAHENDUSE VÄLJATÖÖTAMINE</b>	<b>10</b>
1.2 Liitium-polümeer aku laadimine	10
2.1 Liitium-polümeer aku balansseerimine	12
2.2 Ühtne lahendus	13
<b>3 PROTOTÜÜBI ARENDUS</b>	<b>14</b>
3.1 Prototüübi elektroonika	14
3.1.1 Akuelementide valimine	14
3.1.2 Skeemi laadija osa projekteerimine	14
3.1.3 Skeemi balansseerija osa projekteerimine	19
3.2 Akupaki korpuse mehaaniline lahendus	23
<b>4 KALIBREERIMINE JA ANDMESIDE ÜHENDUS</b>	<b>27</b>
4.1 Kalibreerimine	27
4.2 Andmeside	28
4.3 Tarkvaralahendus akupaki ja roboti vahel	30
<b>KOKKUVÕTE</b>	<b>31</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>33</b>
<b>KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU</b>	<b>34</b>
<b>LISAD</b>	<b>36</b>

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema tuli TTÜ Robotiklubi vajadusest parema akude kaitsmise süsteemi järele.

Avaldan tänu TTÜ Robotiklubile labori kasutamise ning testakude eest, Kristjan Marustele ja Joonas Karule konsultatsioonide eest ning Raivo Sellile juhendamise eest.

## SISSEJUHATUS

TTÜ Robotiklubis arendatavatel robotitel kasutatakse toiteallikana liitium-polümeer akusid nende väga hea energiatiheduse ning madala hinna tõttu. Kuna kompaksete robotite puhul on väike mõõt ja kerge kaal väga olulised, siis sobivad liitiumakud võrreldes niklil või pliil põhinevate akudega kõige paremini. Siiaamaani on liitiumakude liigse tühjenemise vältimiseks kasutusel alarmskeem, mis annab tühjast akust märku helisignaaliga. Alarmskeemi miinusteks on pidev jälgimine, et see aku balansseerimiskaabliga ühendatud oleks ning suur voolutarve alarmi andes, mis mõjub tühjale akule lisakoormusena selle asemel, et kogu koormus välja lülitada. Kuna alarmskeem rakendub teatud pingest alates, siis kõikuva vooluga süsteemis, nagu robotis annab alarm väga palju valealarme näiteks mootorite käivitusel.

Akude laadimiseks on TTÜ Robotiklubis hetkel kasutusel eraldiseisev akude laadija ning balansseerija. Eraldiseisvad laadijad sobivad hästi roboti arendamiseks, kuna see tähendab, et saab kiiresti tühja aku täis aku vastu vahetada ja arendustööga jätkata. Kui robot on kasutusel laborist väljaspool ei ole välisele laadijale tavaliselt ligipääsu ning seega tuleks kasuks roboti võime laadida akusid pardal. Lisaks annab pardal laadimine laadimisahelale parema kontrolli aku üle võimaldades mõõta laadimisel aku temperatuuri, mida välised laadijad teha ei suuda. Temperatuuri jälgimine on väga oluline kiireks ja ohutuks liitiumakude laadimiseks. Praegu peab kogu laadimistsükli ajal akusid ise jälgima ning laadimise manuaalselt katkestama juhul kui akude temperatuur väljub normi piirest.

Olemasoleva akude laadimise ja -kaitsesüsteemide väljavahetamiseks otsustati luua ühtne süsteem, mis tegeleks aku kaitsmisega ning laadimisega. Kaitsehel peaks jälgima, et akut ei laetaks liiga tühjaks ega liiga täis ning tegeleks laadimise ajal ka akuelementide balansseerimisega. Laadimisahel peaks suutma jälgides pingeid ja temperatuure aku täis laadida kasutades tavalist alalisvoolu allikat võimaldades akut laadida laialt levinud toiteadapteritega. Uut süsteemi disainides tuleb arvestada TTÜ Robotiklubis laialt levinud kolmeelemendiliste liitium-polümeer akudega ning käimasolevate ja planeeritavate robotiprojektidega. Kolmeelemendilised akud on kasutusel kuna robotite elektroonika on loodud töötama pingevahemikus 11-13 V.

Lõputöö raames kirjeldatakse olulisi parameetreid, mida on vaja akude kaitsmisel ja laadimisel jälgida. Pakutakse välja lahendus, kuidas on võimalik lahendada korraga akupaki kaitsmise probleem ja laadimise skeemiosa. Välja on toodud üks võimalikest skeemilahendustest koos trükkpladijoonistega. Lisaks on näidatud elektroonikaplaadi kalibreerimine ning võimalik

tarkvaralahendus, mille järgi roboti juhtloogikat edasi arendada nii, et see arvestaks targa aku võimalustega.

Elektroonikaskeemid ning trükkplaadijoonised on koostatud kasutades Altium Designer nimelist tarkvara, mis võimaldab kogu elektroonika disaini teha ühe programmiga ning võimaldab lihtsat integratsiooni ka mehaanika joonestus tarkvaradega. Korpuse mehaaniline disain on joonestatud kasutades SolidWorks tarkvara, millest on võimalik luua kiiresti mudel 3D printimiseks. Aku kaitseplaadi kalibreerimiseks on kasutusel Texas Instrumendi bq3055 evaluatsiooni tarkvara koos EV2300 USB-SMBus muunduriga.

Lõputöös loodud laadimise lahendus on mehhatrooniline süsteem. Mehaanika osa süsteemis on korpus, mille eesmärk on kaitsta akuelemente väliskeskkonna mõjude ning löökide eest ning pakkuda juhtelektroonikale jahutust. Mehaanika osa on kirjeldatud peatükkides 2.2 ja 3.2.

Elektroonika osa süsteemis on kompaktne trükkplaat, mille eesmärk on tegeleda aku laadimisega, balansseerimisega ning kaitsmisega. Elektroonika osa on kirjeldatud peatükis 2.1.

Tarkvara osa süsteemis on kommunikatsiooni protokoll kirjeldus ning loogika aku parameetrite lugemiseks ning kaitsesüsteemide juhtimiseks. Samuti on kirjeldatud kaitseskeemi kalibreerimist. Tarkvara osa on kirjeldatud peatükis 3.

# 1 TAUSTAUURINGUD JA OLEMASOLEVATE LAHENDUSTE ANALÜÜS

Liitiumakud on erinevate häirete suhtes väga tundlikud ning seega on turul erinevaid kaitseskeeme suhteliselt palju. Tihti on seadme hind olulisem kui täielik kaitse, seega on paljud valmis moodulid osadest kaitseelementidest kas loobunud või vahetanud millegi ebaefektiivsema vastu. Suuremal osal lahendustel toimub balansseerimine ainult laadimistsükli viimases faasis, mis tähendab, et katkestatud laadimistsükli puhul balansseerimist ei toimu. Akuelementide erinev täituvus võib põhjustada nende erinevat koormatavust, mis omakorda viib aku veel rohkem balansist välja.

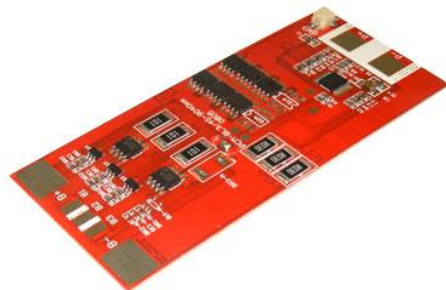
## 1.1 Olemasolevate süsteemide võrdlus

Järgnevalt on välja toodud paar turul olevat toodet, mis pakuvad korraga aku balansseerimist ja kaitset. Oluline on, et toode oleks mõeldud kolme elemendisele liitium-polümeer akupakile, suudaks jälgida akupaki pinget ning temperatuuri ja oleks võimeline kaitsma akut ülevoolu eest. Samuti peab süsteem olema võimeline tegelema aku laadimisega ning aku jälgimisega laadimise ajal. Olulised parameetrid seejuures on:

- Ülepinge kaitse 4,20 V elemendi kohta
- Alapinge kaitse 1,50 V - 3,00 V elemendi kohta, kasuks tuleb seadistamise võimalus
- Ülevoolu kaitse seadistatav, vähemalt 15 A
- Ületemperatuuri kaitse 50 °C, kasuks tuleb seadistamise võimalus
- Laadimisvool reguleeritav, vähemalt 3,6 A
- Laadimisrežiimide vahetus vastavalt temperatuurile ja aku olekule

### PCM-LI11.1V10A [1]

- 3 elemendine liitium-ioon või liitium-polümeer akupakk
- Ülepinge kaitse  $4,32 \text{ V} \pm 0,025 \text{ V}$
- Alapinge kaitse  $0,40 \text{ V} \pm 0,08 \text{ V}$
- Ülevoolu kaitse 12 A – 16 A
- Voolupiiraja 10 A
- Maksimaalne voolutarve 50  $\mu\text{A}$
- Lühisekaitse

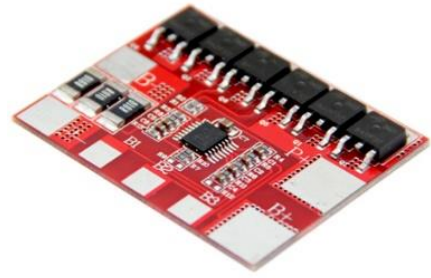


Sele 1.1. Akukaitse moodul PCM-LI11.1V10A



### HCX-D113V1 [2]

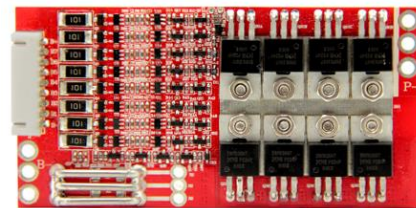
- 3 elemendine liitium-ioon või liitium-polümeer akupakk
- Ülepinge kaitse 4,2 V – 4,35 V
- Alapinge kaitse 2,3 V – 3,0 V
- Ülevoolu kaitse 15 A
- Balanseerimispinge elemendi kohta 4,2 V ± 0,025 V
- Maksimaalne voolutarve 20  $\mu$ A
- Lühisekaitse



Sele 1.2. Akukaitse moodul HCX-D113V1

### HCX-D120 [2]

- 3 elemendine liitium-ioon või liitium-polümeer akupakk
- Ülepinge kaitse 4,2 V – 4,35 V
- Alapinge kaitse 2,3 V – 3,0 V
- Ülevoolu kaitse 25 A
- Balanseerimispinge elemendi kohta 4,2 V ± 0,025 V
- Maksimaalne voolutarve 20  $\mu$ A
- Lühisekaitse



Sele 1.3. Akukaitse moodul HCX-D120

Kuigi kõik eelpool mainitud süsteemid pakuvad väga head kaitset, siis probleemiks on balansseerimise osa, kuna seda tehakse alles laadimistsükli lõpus. See tähendab, et poole pealt katkestatud laadimise puhul akut ei balansseerita. Kuna plaatidel puudub laadimist reguleeriv skeemiosa, siis peab akut kasutatav skeem tegelema laadimisvoolu reguleerimisega, pingete mõõtmisega ning temperatuuride jälgimisega mis tähendab, et igasse seadmesse tuleb lisada ka laadimise osa, mis jälgiks aku laadimist ja tegeleks intelligentse voolu jagamisega adapteri ja aku vahel. Seega on tegemist vaid poolikute süsteemidega ja ei täida täielikult süsteemi vajadusi.

Selleks, et tagada ühtne süsteem, mis vastaks täielikult kõikidele tingimustele ja oleks samal ajal kompaktne tuleb luua uus lahendus, mis suudaks aku kaitse ja laadimise eest vastutada pakkudes täielikku lahendust. Lisaks on valmislahendustel puudu temperatuuri sisend, mis sellistes kriitilistes süsteemides on väga oluline. Oluline on jälgida nii akuelementide temperatuuri kui ka juhtelementide enda temperatuuri, et vältida ülekuumenemist ja sellest tulenevaid rikkeid.

## 2 PÕHIMÕTTELAHENDUSE VÄLJATÖÖTAMINE

### 1.2 Liitium-polümeer aku laadimine

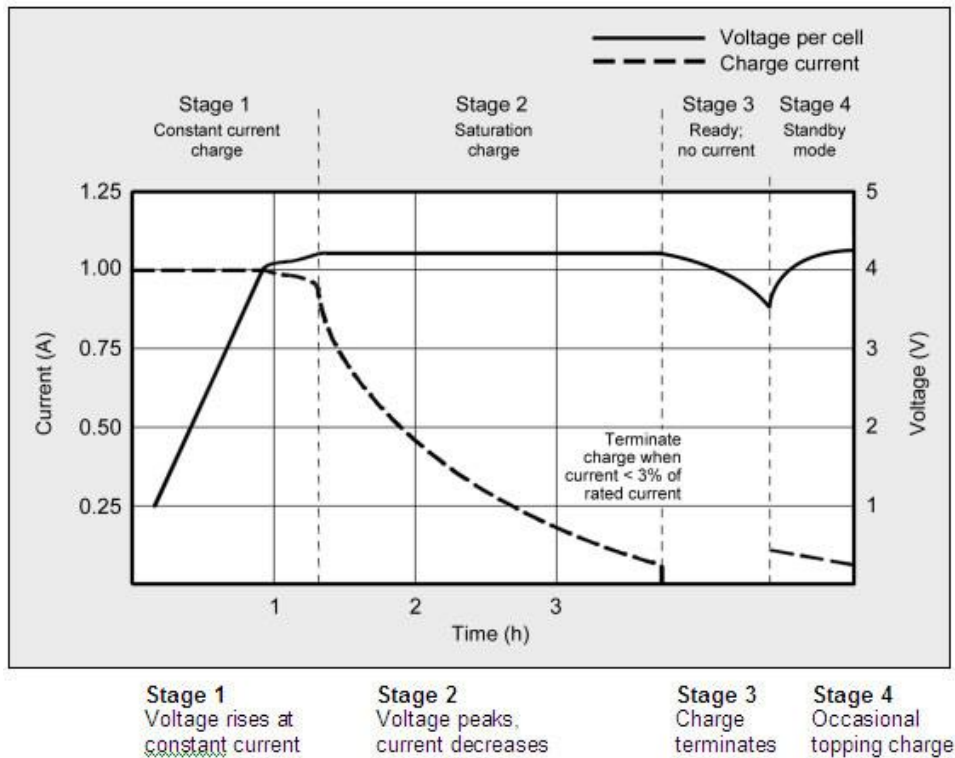
Akude laadimine ja tühjaks laadimine on tavaliselt keemiline protsess, kuid liitiumakusid käsitletakse tavaliselt erandina. Liitiumakudes käsitletakse energia liikumist kui ionide liikumist anoodi ja katoodi vahel. Loomulikult ei ole liikumine ideaalne ning nagu kõikide süsteemide puhul esineb ka liitiumakudes vananemine, mistõttu aku mahtuvus aja jooksul väheneb.

Erinevalt nikkel ja pliiakudest vajab liitiumakude laadimine keerulisemat juhtloogikat kui vaid voolu piiramine. Samas laadimise lõpetamine on liitiumakude puhul selgemalt välja toodud ning see ei sõltu aku vanusest nagu näiteks niklil põhinevad akud, kus laadimine lõpetatakse juhul, kui aku temperatuuri tõus minutis ületab  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  või aku pinge langeb  $5\text{ mV} - 10\text{ mV}$ . [3]

Liitiumakude laadimistsükkel jaotatakse tavaliselt kolme staadiumisse:

1. eel-laadimine – vähendatud vooluga laadimine juhul, kui aku elemendi pinge või temperatuur on allpool normi, kestab kuni aku pinge ja temperatuuri normaliseerumiseni
2. püsiva vooluga laadimine – aku laadimine piiratud vooluga, kestab kuni aku pinge on saavutanud ettenähtud maksimumi
3. püsiva pingega laadimine – aku laadimine piiratud pingega, mille jooksul laadimisvool väheneb, kestab kuni aku laadimisvool langeb alla 3 % maksimaalsest lubatud laadimisvoolust

Sele 2.1 on toodud liitium-polümeer aku laadimise režiimid ning voolu - pinge graafikud. Graafikul on näha lisaks ka järel-laadimise režiim (staadium 4), mida kasutavad vähesed laadijad ja mille ülesanne on akut pidevalt töövalmis hoida (näiteks käsiraadiojaamade laadijad).



Sele 2.1. Liitium-polümeer aku laadimise graafik [4]

Nagu kõikide akude puhul on oluline jälgida temperatuuri, et vältida akuelementide ülekuumenemist ning väga suuri erinevusi aku sisemise temperatuuri ja välitemperatuuri vahel olukordades, kus aku temperatuur on alla teatud miinimumi. Liiga madalate temperatuuride puhul piiratakse laadimise vool kuni neljandikuni üldisest laadimisvoolust kuni aku saavutab sobiva laadimise temperatuuri (tavaliselt on selleks 5 °C).

Liitiumakude puhul on väga oluline jälgida aku elementide pinget nii laadimisel kui ka töö ajal, kuna elemendid on väga tundlikud üle- ning alapinge suhtes. Ülepinge põhjustab akuelementides liigset oksüdeerumist ning lühendab oluliselt aku kasulikku eluiga ning põhjustab ohtlikke rõhkusi akus mis võivad viia akuelemendi paisumiseni kuni plahvatuseni ning põlema süttimiseni. Kui liitium-polümeer aku elementi laadida pikemat aega üle 4,30 V hakkab anoodile sadestuma metalliline liitium ning katood muutub oksüdeerivaks kehaks ning hakkab eralduma CO<sub>2</sub> gaas. [3]

Liitium-polümeer aku kasutamine tuleb lõpetada kui elemendi pinge on langenud alla 3,00 V, et vältida aku sisemisi kahjustusi. Akuelementi, mille pinge on olnud alla 1,50 V pikemat aega (üle nädala) ei tohi rohkem kasutada, kuna selles võivad olla tekkinud vase sillad põhjustades sisemisi lühiühendusi, mis omakorda põhjustavad akuelemendi ebastabiilsust ning liigset soojust ning võivad põhjustada muid anomaaliaid.

## 2.1 Liitium-polümeer aku balansseerimine

Tagamaks akupaki võimalikult pikka eluiga ning selleks, et kaitsta akuelemente üle- ja alalaadimise eest kasutatakse liitiumakude puhul balansseerimist. Balansseerivaks skeemiks nimetatakse skeemilahendust, mis hoiab jadamisi ühendatud akuelementide pingel laadimisel võrdsena. Järgnevalt on ära toodud põhilised põhjused, milleks akuelementide balansseerimine oluline on.

Esiteks on see oluline ohutuse seisukohalt. Kui liitium-polümeer aku elemendi pingel tõuseb üle 4,20 V põhjustab see akus kohese temperatuuri tõusu, ning akuelemendi hävimise, nagu on kirjeldatud eelnevas peatükis.

Teiseks on see oluline akuelemendi eluea seisukohalt. Kui elemendi pingel kasvab laadimisel kõigest 0,05 V üle 4,20 V suurendab see aku vananemise kiirust kuni 30 %. [5]

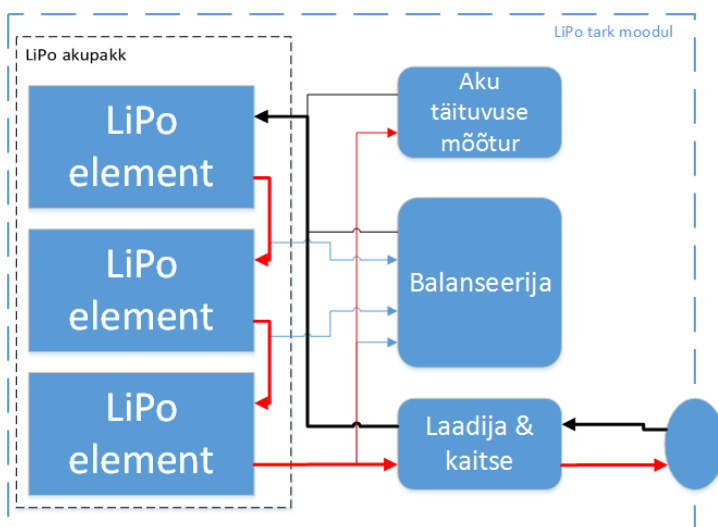
Kolmandaks põhjustab balansseerimata elementidega aku laadimine aku mitte täielikku kasutamist. Kui laadija kontrollib elementide pinget eraldi ning lülitab laadimise välja kui esimese elemendi pingel on tõusnud üle 4,20 V on ülejäänud elemendid madalama pingega ning terve akupaki pingel ning selles sisalduv energia madalam nominaalidest. Sarnaselt keelab aku kaitseskeem aku kasutamise, kui ühe akuelemendi pingel langeb allapoole miinimumpinget (liitium-polümeer elemendi puhul 3,00 V), kuid ülejäänud elementides on veel kasutamata energiat. Seega väheneb aku kasutatav tööpiirkond mõlemalt poolt ning aku mahtuvus väheneb märgatavalt iga laadimise tsükliga. [5]

Akuelementide pingete erinevust põhjustab tavaliselt kas elementide laetuse astme erinevus või elementide impedantsi erinevus. Laetuse astme erinevust põhjustab näiteks tehases akuelemendi kalibreerimise mõõtemääramatus ja akuelemendi isetühjenemise erinevus. Näiteks kui akupaki üks elementidest asetseb soojemas väliskeskkonnas kui ülejäänud elemendid toimub soojemas elemendis isetühjenemine suuremal määral (Iga 10 °C kohta kahekordistub) põhjustades akupaki elementides pingete erinevust. Laetuse astmest tulenev pingete erinevus tuleb esile juhul, kui akuelementides ei liigu vool. Impedantsi avaldub ainult juhul, kui akuelementi läbib mingi vool. Kui akuelementi läbib vool on negatiivne (tühjaks laadimine) on elemendi, mille impedants on suurem pingel madalam, ning kui vool on positiivne (laadimine), on sama elemendi pingel kõrgem ülejäänud elementide pingetest. [5]

Akupaki balansseerimise viise on kasutusel mitu. Üheks variandiks on akupaki balansseerimine laadimise lõppfaasis, kus akuelementide laadimine lõpetatakse üks haaval lastes madalama pingega akudel edasi laadida kuni kõik akupaki elemendid on saavutanud soovitud pinge. Teine variant on balansseerida elemente tühjakslaadimisel. Kolmas variant oleks akuelementide pidev balansseerimine aku tühjakslaadimisel koormates kõrgema pingega elemente või suunates energiat rohkem täis elementidest vähem täis elementidesse. Viimane balansseerimise viis tasub ära ainult väga suurte akupakkide puhul (elektri toitel sõidukid, suured UPSid), kuna balansseerimise skeemilahendus on väga suur ning kahekordistaks kogu aku jälgimise süsteemi hinna. Parim variant väiksemate akude balansseerimiseks on nende balansseerimine laadimistsükli ajal, sest siis balansseerides on energiakadu kõige väiksem ning akuelementide koormus ühtlane ning reguleeritud. [5] [6]

## 2.2 Ühtne lahendus

Akuelementide balansseerimine ning oluliste parameetrite mõõtmine toimub madalate vooludega, mis tuleb hoida eemal laadimisahela kõrgetest ja kiiresti lülitatavatest vooludest, mis võivad põhjustada müra mõõteahelates. Eelnevat arvesse võttes on mõistlik liitiumaku balansseerimiseks ja laadimiseks vajaminevad skeemilahendused üksteisest lahus hoida, et tagada aku kindel ohutus ning eelistada pigem kaitseahelate dubleerimist. Aku täituvuse mõõtur on täiesti eraldi seisev ahel ning ei ole aku kasutamise ohutuse seisukohalt kriitilise tähtsusega seega on see jäetud samuti eraldiseisvaks elemendiks. Sele 2.2 on ära toodud üks võimalik põhimõtte lahendus kogu akupaki disainile:



Sele 2.2. Liitium-polümeer aku tark moodul

## 3 PROTOTÜÜBI ARENDUS

### 3.1 Prototüübi elektroonika

#### 3.1.1 Akuelementide valimine

Akuelementide mahtuvuse valik sõltub sellest, kui palju akusid kasutav süsteem voolu tarbib ning mis on maksimaalne voolutarve, mida akut kasutav süsteem tarbib. Hobielektronikas kasutatavate liitium-polümeer elementide maksimaalne lubatud voolutarve on tavaliselt 20 – 30 korda suurem aku mahtuvusest. Roboti maksimaalne voolutarve ei ületa kunagi 40 A seega maksimaalse voolutarve koha pealt on minimaalne aku mahtuvus  $40 \text{ A} / 20 = 2 \text{ Ah}$ . Arvestades



Sele 3.1. Turnigy 3600 mAh aku

roboti kasutust on sobilik aga Turnigy 3600 mAh liitium-polümeer aku (Sele 3.1) [7], mis tagab roboti pika tööaja (keskmise kasutuse puhul minimaalselt 60 minutit) ning on piisavalt suure võimsusvaruga, et tagada roboti töö ka hetkeliste voolupiikide ajal (mootorite käivitusvool kokku kuni 30 A). Prototüübi puhul sai valitud valmis kolmest akuelemendist koosnev akupakk, mistõttu ei ole vaja kasutada elementide omavaheliseks ühenduseks punktkeevitust ning kõik vajalikud ühendused on juba välja toodud mis lubab keskenduda juhtelektroonikale.

#### 3.1.2 Skeemi laadija osa projekteerimine

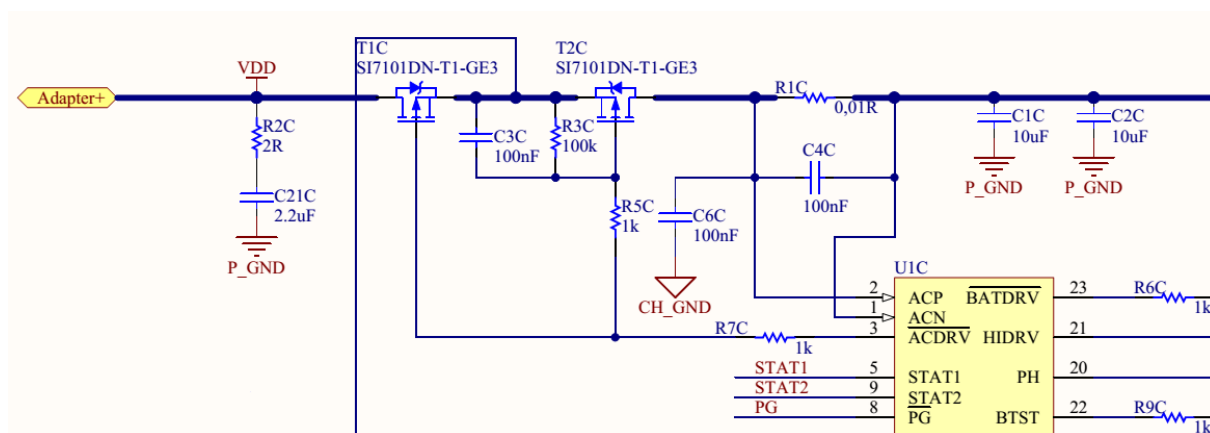
Laadimisahelat juhtiva mikroskeemi ning komponentide valiku olulisimateks kriteeriumiteks on:

- ohutus – aku temperatuur ei tohi väljuda laadimise ega kasutamise jooksul normaalpiirkonnast
- aku parameetrite mõõtmise täpsus – oluline on, et akut ei laetaks liiga täis ega liiga tühjaks
- väga madal voolutarve – oluline, et akut kaitsev skeem ei põhjustaks akule suurt lisakoormust, mis võib akut kahjustada kui aku pinged on langenud miinimumi

- akut kaitsev lühisekaitse ning laadimise osa polaarsuse kaitse
- laadimise efektiivsus – madal energiakadu ning soojenemine laadimisel
- automaatne võimsuse jagur adapteri ja aku vahel

Tulenevalt lõppskeemi kompaktsuse nõudest otsustati valida spetsiaalse mikroskeem, mis võrreldes programmeeritavast mikrokontrollerist on tunduvalt töökindlam. Ühe keskse mikroskeemi kasutamine tagab laadija töökindluse ning piisava kontrolli kogu laadimise protseduuri üle. Kõige sobilikumat terviklahendust pakub antud ülesande lahendamiseks Texas Instruments kontrolleri bq24610 [8] näol, mis on mõeldud 1 – 6 liitium-ioon või liitium-polümeer aku laadimiseks. Mikroskeem kasutab laadimiseks lülitusmeetodit, mis on väga efektiivne ( $> 94\%$ ), tagab väga hea laadimise voolu (täpsus  $\pm 3\%$ ) ja pinget (täpsus  $\pm 0,5\%$ ) reguleerimise, võimaldab eel-laadimist ning jälgib laadimisadapteri pinget ning voolu (täpsus  $\pm 3\%$ ). Lisaks aku pingele ja tarbitavale voolule jälgib mikroskeem ka aku temperatuuri kasutades negatiivse koefitsiendiga termotakistit. [9]

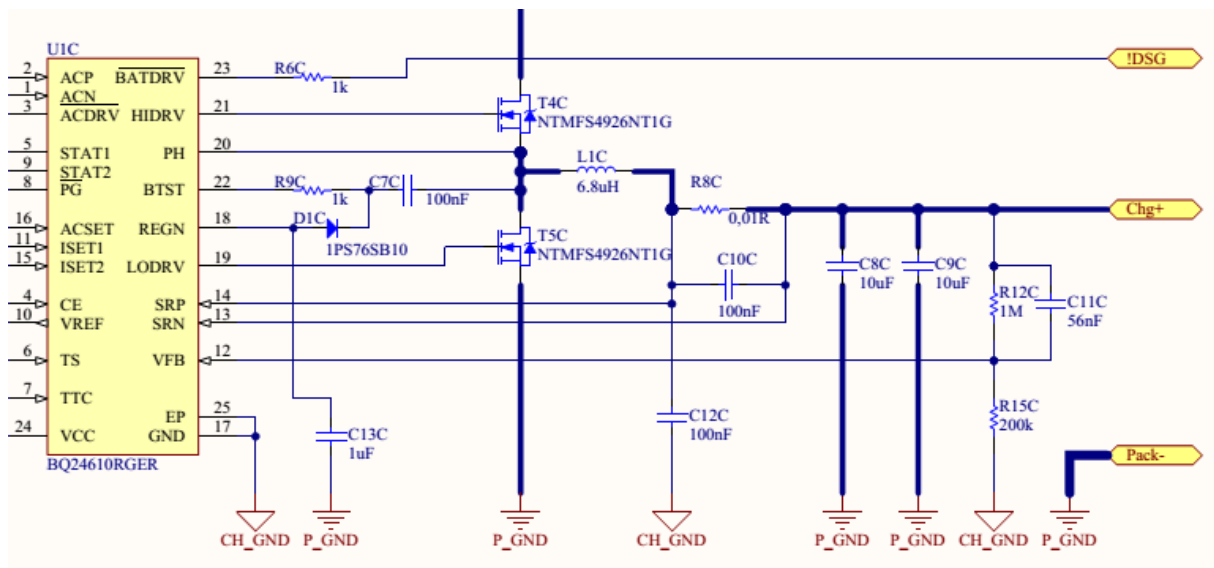
Kuna mikroskeemi kasutusvaldkond ühtib teataval määral andud ülesandega, siis saab skeemi joonestamisel lähtuda bq24610 soovituslikust skeemist [10]. Laadija skeemi saab tinglikult jagada kolme ossa: laadimisadapteri skeemiosa, aku laadija skeemiosa ning seadistuse skeemiosa.



Sele 3.2. Laadimisadapteriga tegelev skeemiosa. Väljavõte lisast 1

Sele 3.2 välja toodud adapteriga tegelev skeemiosa on lahendatud selliselt, et adapterist tulev pinget ning vool oleks isoleeritud süsteemi ning aku pingest seni, kuni bq24610 on veendunud selle sobivuses süsteemi. See tähendab, et kontrollitakse pinget polaarsust ning seda, et pinget oleks piisavalt kõrge aku laadimiseks ja tarbija toitmiseks. Kui pinget sobib lülitatakse sisse P kanaliga mosfeti (P-FET), mis juhivad voolu edasi järgmistesse skeemi osadesse. Adapteri poolne P-FET takistab välja lülitatud olekus voolu liikumist akust adapterisse. Mosfeti kasuks

võrreldes diodiga räägib madalam sisendtakistus ning seega väiksemad kaod. Süsteemi poolne P-FET eraldab aku adapterist ning P-FETi lülituse aeglustamisega piirab voolu muutumist ajas (dI/dt) adapteri ühendamisel süsteemi. Lisaks polaarsuse kaitsele töötavad ACDRV ja BATDRV signaalid üksteist välistava skeemiahelana lülitades süsteemiga korraga ainult kas aku- või adapteri toite tekitades lülituse vahele suurte voolupiikide elimineerimiseks nn surnud ala, milleks nimetatakse ajavahemikku, kus mõlemad lülitid on avatud. Mõlemat P-FETi juhitakse asümmeetriliselt lülitades mosfetid välja kiiresti kuid sisse aeglaselt aidates sellega kaasa „lahuta enne ühendamist“ loogikale. [9]



Sele 3.3. Aku laadimisega tegelev skeemiosa. Väljavõte lisast 1

Sele 3.3 on välja toodud liitumaku laadimise skeemiosa. Aku laadimiseks kasutatakse lülitusrežiimis töötavad fikseeritud sagedusega alldavat pulsilaius modulaatorit edasiseid kontrollahelaga. Kolmanda tüübi kontrollahel võimaldab väljundis kasutada keraamilisi kondensaatoreid muutes süsteemi väiksemaks ning töökindlamaks. Laadimise voolu jälgimiseks kasutatakse sarnaselt adapteri voolu jälgimisele 10 millioomist šunt takisti. Akupaki pinget jälgitakse takistusliku pingejaguriga, millega alandatakse pinget 6 korda. Takistite väärtused on arvatud valemita (3.1). [9]

$$U_{\text{väljund}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * U_{\text{sisend}} \quad (3.1)$$

kus:  $R_2$  – pingejaguri alumine takisti,

$R_1$  – pingejaguri ülemine takisti

$U_{\text{väljund}}$  – väljundpinge

$U_{\text{sisend}}$  – sisendpinge



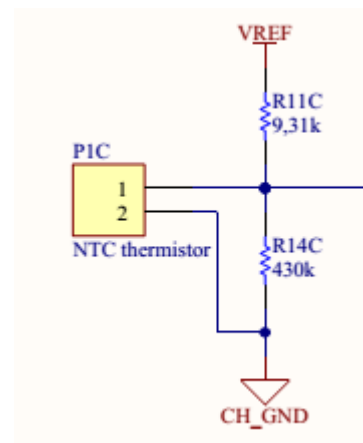
Laadimisahelasse ühendatud LC filtri resonants sagedus peab bq24610 kontrolleri kasutades jääma vahemikku 12 – 17 kHz ning selle arvutusvalemiks on (3.2). [9]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 * C_0}} \quad (3.2)$$

kus:  $f_0$  – resonants sagedus,  
 $L_0$  – väljundi induktiivsus,  
 $C_0$  – väljundi mahtuvus

Kasutades soovitud väärtusi, mis 3 A laadimisvoolu juures on 6.8  $\mu$ H ja 20  $\mu$ F saame valemiga (3.2) kasutades resonants sageduseks 13,65 kHz, mis jääb soovitud sageduse vahemikku. Induktiivpooli valides tuleb jälgida maksimaalset lubatud voolu, mis peab jääma suuremaks kui laadimisvool ning väljundkondensaatorite maksimaalset lubatud pinget, mis peab olema suurem maksimaalsest laadimispingest. [9]

Akupaki temperatuuri jälgimiseks kasutatakse negatiivse koefitsiendiga termotakistit. Temperatuuri lugemiseks kasutatakse sarnaselt aku pinge mõõtmise ahelale takistuslikku pingejagurit. Termotakisti on ühendatud pingejaguri skeemi alumise takistiga paralleelselt ning temperatuuri sisendisse, mis jälgib, et pingejagurist tulev pinge jääks piirväärtuste vahele. Pingejaguri ning termotakisti valimiseks kasutatakse valemiga (3.3) ja (3.4). [9]



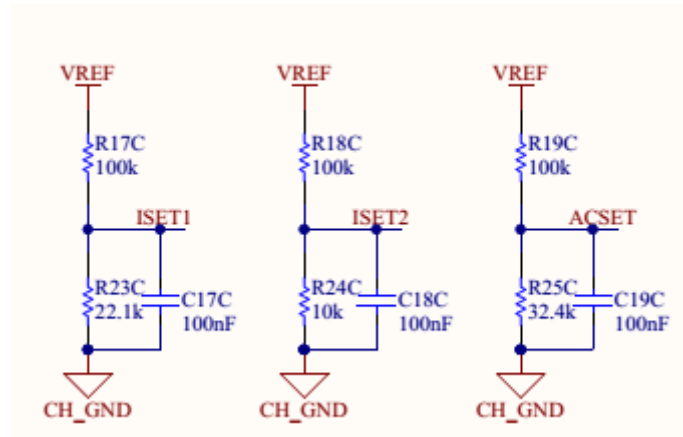
Sele 3.4. Laadimisahela temperatuurianduri ühendamine. Väljavõte lisast 1

$$RT_2 = \frac{U_{VREF} * RTH_{KÜLM} * RTH_{KUUM} * \left(\frac{1}{U_{LTF}} - \frac{1}{U_{TCO}}\right)}{RTH_{HOT} * \left(\frac{U_{VREF}}{U_{TCO}} - 1\right) - RTH_{KÜLM} * \left(\frac{U_{VREF}}{U_{LTF}} - 1\right)} \quad (3.3)$$

$$RT_1 = \frac{\frac{U_{VREF}}{U_{LTF}} - 1}{\frac{1}{RT_2} + \frac{1}{RTH_{KÜLM}}} \quad (3.4)$$

kus:  $RT_1$  – pingejaguri ülemine takisti (R11C),  
 $RT_2$  – pingejaguri alumine takisti (R14C),  
 $RTH$  – negatiivse koefitsiendiga termotakisti,  
 $U_{VREF}$  – referentspinge,

$U_{LTF}$  – sobiva pingevahemiku alumine piir,  
 $U_{TCO}$  – sobiva pingevahemiku ülemine piir,  
 $R_{THKÜLM}$  – termotakisti takistus temperatuuri alumisel piiril,  
 $R_{THKUUM}$  – termotakisti takistus temperatuuri ülemisel piiril



Sele 3.5. Seadesuuruste määramiseks kasutatavad pingejagurid. Väljavõtte lisast 1

Erinevaid voolu piiravaid seadesuurusi saab määrata kasutades pingejagureid (Sele 3.5), mis on ühendatud bq24610 viikude ISET1/2 ja ACSET külge. ACSET viiguga määratakse ära maksimaalne adapterist tulev vool, mida kasutatakse laadimisvoolu vähendamiseks juhul kui ühendatud süsteem koos laadimisega tarbib rohkem kui adapter on võimeline pakkuma. Tänu dünaamilisele laadimisvoolu piiramisele on võimalik adapter valida väiksem ja seega odavam kuna adapter ei pea suutma igal ajahetkel korruga toita nii laadimist kui tarbivat süsteemi. Pingejaguri valimiseks tuleb kasutada valemit (3.5). [9]

$$I_{DPM} = \frac{U_{ACSET}}{20 * R_{AC}} \quad (3.5)$$

kus:  $I_{DPM}$  – maksimaalne adapterist tulev vool,

$U_{ACSET}$  – pinge ACSET viigul, mis peab jääma vahemikku 0 – 2 V

$R_{AC}$  – adapteri šundi takistus

Selleks, et määrata adapteri maksimaalne vooluks 4 A, tuleb valida pingejagur selliselt, et  $U_{ACSET}$  saaks väärtuse 0,80 V kui  $R_{AC}$  on 10 millioomi.

ISET1 viiguga määratakse laadimise vool püsiva vooluga laadimise režiimis. Pingejaguri valimiseks kasutatakse valemit (3.6).

$$I_{CHG} = \frac{U_{ISET1}}{20 * R_{SR}} \quad (3.6)$$

kus:  $I_{CHG}$  – laadimise vool,

$U_{ISET1}$  – pinge ISET1 viigul, mis peab jääma vahemikku 0 – 2 V

$R_{SR}$  – laadimise šundi takistus

Laadimise vooluks on määratud pingejaguriga 3 A.

ISET2 viiguga määratakse eel-laadimise ja laadimise lõpetamise vool. Pingejaguri valimiseks kasutatakse valemit (3.7).

$$I_{TERM} = I_{PRE} = \frac{U_{ISET2}}{100 * R_{SR}} \quad (3.7)$$

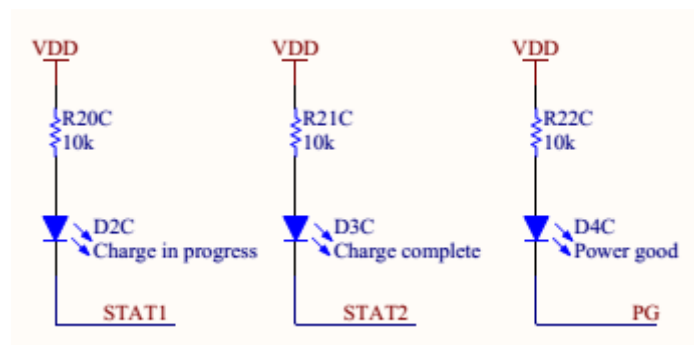
kus:  $I_{TERM}$  – laadimise lõpetamise vool,

$I_{PRE}$  – eel-laadimise vool,

$U_{ISET2}$  – pinge ISET2 viigul, mis peab jääma vahemikku 0 – 2 V

$R_{SR}$  – laadimise šundi takistus

Laadimise lõpetamise vooluks on määratud pingejaguriga 0,3 A.



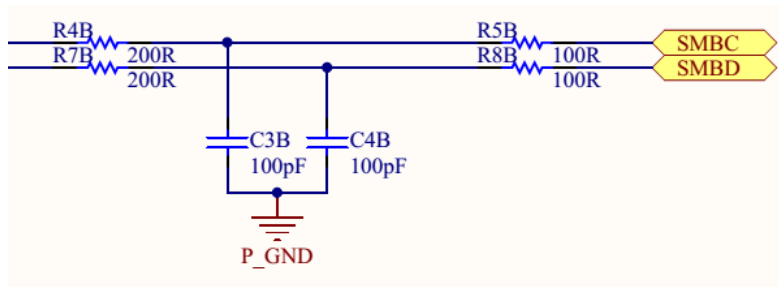
Sele 3.6. Laadija olekut illustreerivad LED indikaatorid. Väljavõte lisast 1

Erinevate laadija toimingute näitamiseks on kasutusel 3 väljundit LED indikaatorite jaoks, mis näitavad seda, kas adapter on ühendatud korrektselt, kas laadimine on pooleli ning kas laadimine on lõpetatud. LED indikaatorite skeemiosa on näidatud skeemil Sele 3.6. [9]

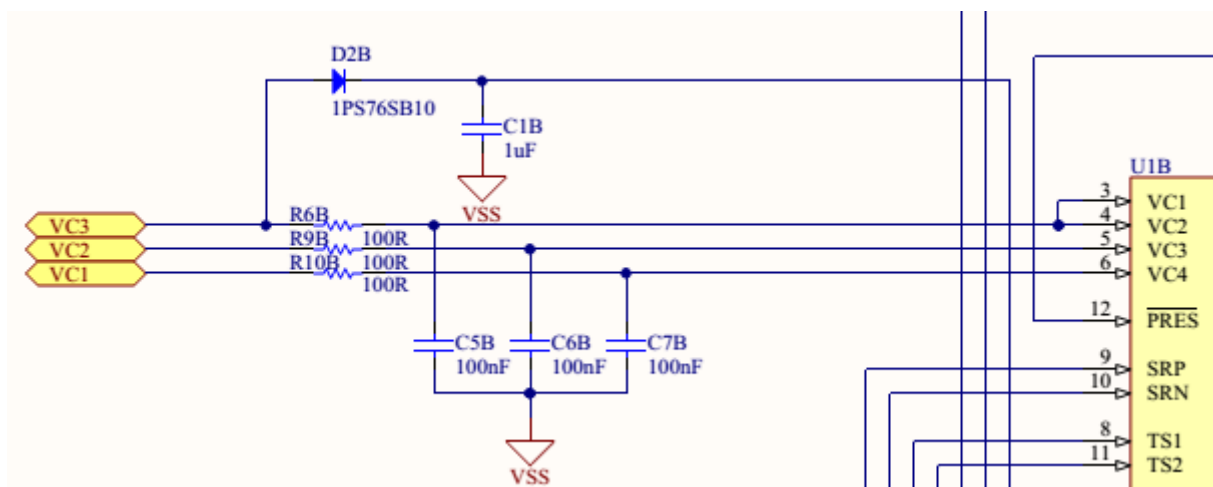
### 3.1.3 Skeemi balansseerija osa projekteerimine

Akupaki balansseerimiseks otsustati valida Texas Instrumentsi mikroskeemi bq3055 [11], mis lisaks balansseerimisele suudab mõõta ka akus oleva energia hulka ning jälgib aku olulisi

parameetreid suutes vajadusel peatada aku laadimise ning kasutamise. Aku parameetrite seadistamiseks ning lugemiseks kasutab bq3055 SMBus<sup>1</sup> andmesiini (Sele 3.7).



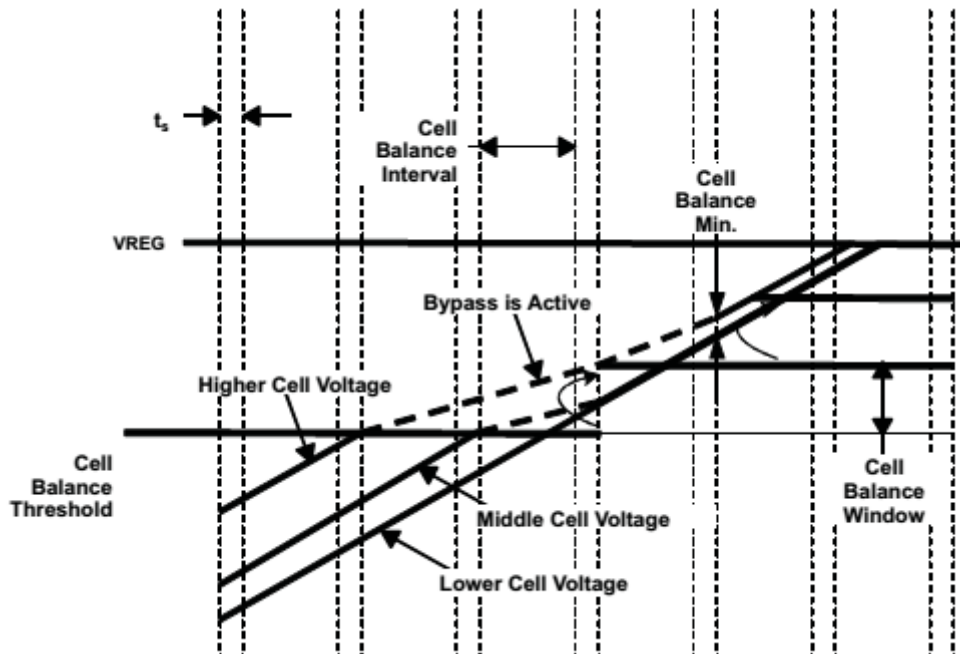
Sele 3.7. SMBus andmesiini ühendus. Väljavõte lisast 1



Sele 3.8. Akupaki balansseerimise skeemiosa. Väljavõte lisast 1

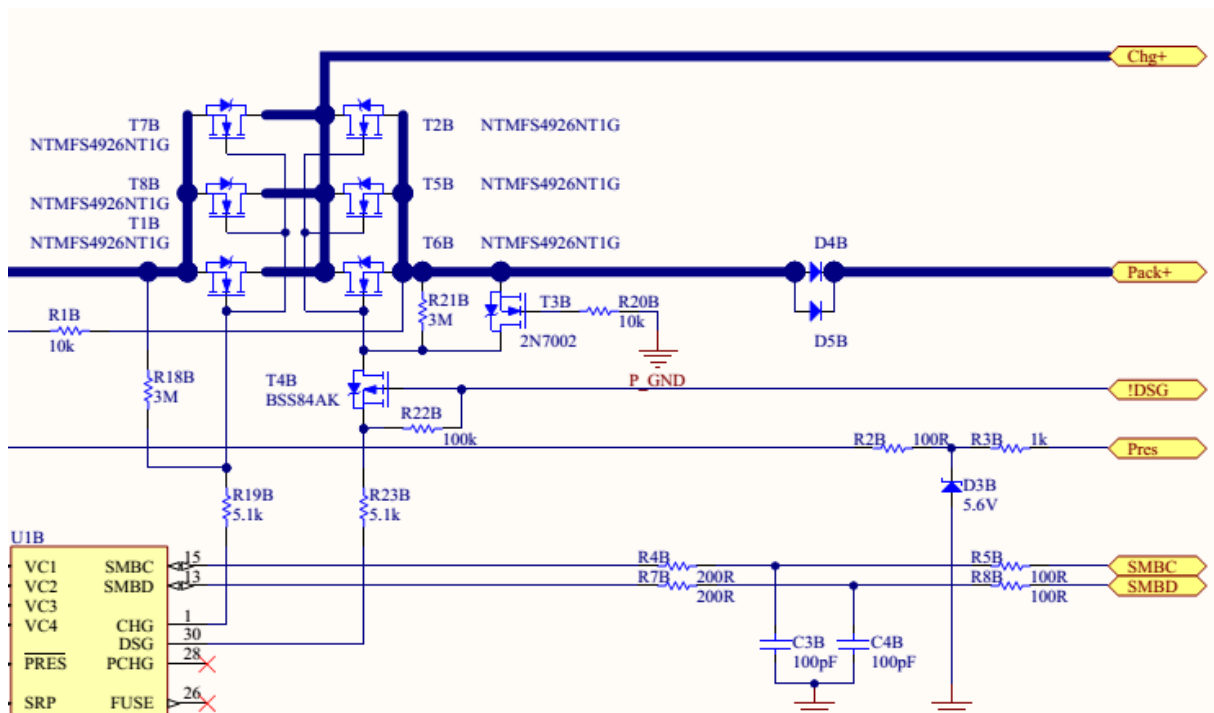
Akupaki balansseerimine saavutatakse mikroskeemis bq3055 akupaki elementide lühistamisega laadides sellega kõrgema pingega elementidest energiat madalama pingega elementidesse. Lühistamiseks kasutatakse bq3055 sisemisi P-MOSFETe ning väliseid 100 oomiseid jadatakisteid [12]. Balansseerimise skeemiosa on toodud skeemil Sele 3.8. Bq3055 mikroskeemis toimub balansseerimine seadistatava intervalli jooksul kuni kõikide elementide pinge jääb üksteise suhtes teatud seadistatavasse vahemikku. Sele 3.9 on toodud balansseerimise graafik.

<sup>1</sup> System Management Bus – süsteemi haldus siin



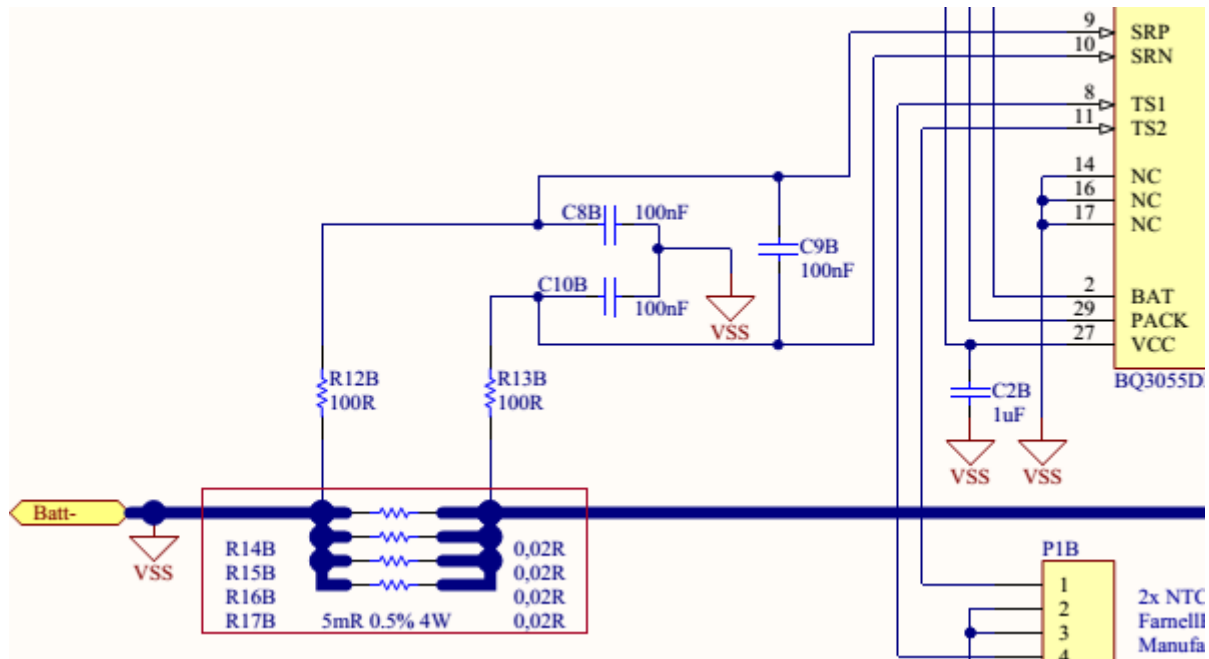
Sele 3.9. Akupaki elementide balansseerimine laadimisel [13]

Lisaks balansseerimisele tegeleb bq3055 aku elementide pingete mõõtmisega laadimisel ja tühjaks laadimisel kaitsmaks elemente ülelaadimise ja liigse tühjenemise eest. Samuti jälgitakse pidevalt akuelementide ning juhtelektroonika temperatuure kasutades negatiivse koefitsiendiga termotakisteid. [12]



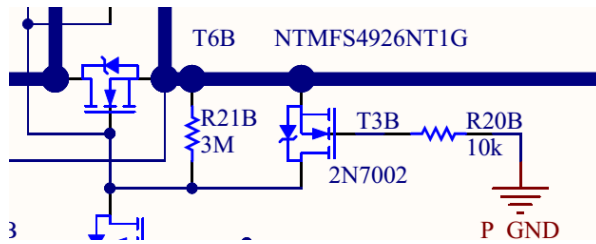
Sele 3.10. Akupaki lahti lülitamise skeemiosa. Väljavõte lisast 1

Juhul kui bq3055 mõõtmistulemusest selgub, et akupaki elementide pinge, vool või temperatuur ei jää enam lubatud piiridesse lülitatakse akupakk süsteemist välja kasutades selleks N kanaliga mosfete. Mosfete puudutav skeemi väljavõte on toodud Sele 3.10. Selleks, et oleks võimalik katkestada ja lubada ainult ühesuunaline voolu liikumine akupakist või akupakki kasutatakse kaht vastupidi ühendatud mosfeti. Kui elementide pinge on liiga madal lubatakse ainult aku laadimine, ning kui akupaki pinge on liiga kõrge lubatakse vaid aku tühjaks laadimine. [12]



Sele 3.11. Akupaki voolu mõõtmise skeemiosa. Väljavõte lisast 1

Selleks, et akupakiga ühendatud süsteemil oleks ülevaade akusse talletatud energia hulgast on bq3055 mikroskeemi sisse ehitatud aku energia mõõtmise võimekus. Akusse talletatud energia ennustamiseks võtab bq3055 arvesse kõiki laadimise ja tühjaks laadimise tsükleid, arvestab aku temperatuuri, isetühjenemist ning akuelementide vananemist korrigeerides pidevalt akus olevat energiat ning akupaki maksimaalset mahutavust [12]. Akupaki voolude mõõtmiseks kasutatakse šunt takistite maatriksit aku negatiivsel klemmil. Voolu mõõtmisega tegelev skeemiosa on toodud skeemil Sele 3.11.

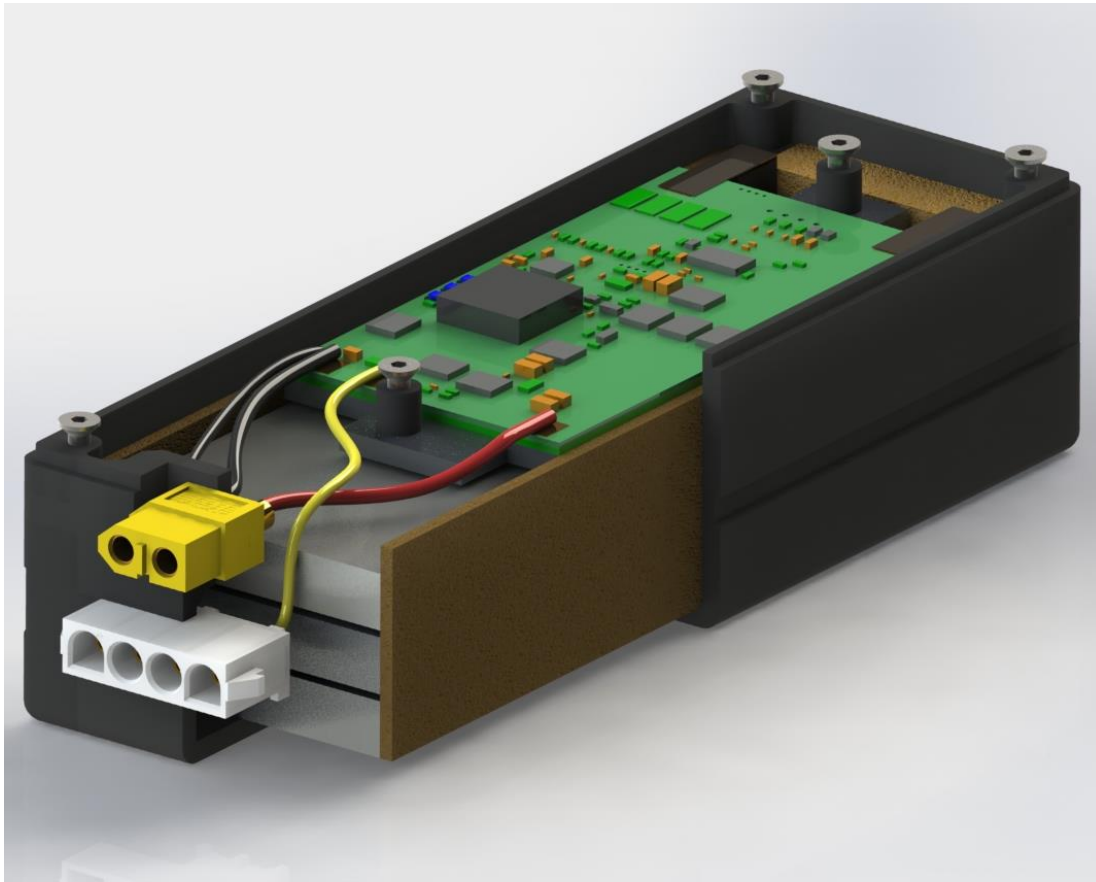


Sele 3.12. Polaarsuse kaitse. Väljavõte lisast 1

Lisaks mikroskeemis sisalduvatele kaitseahelatele on skeemi lisatud kaitselülitused kaitsmast akut valet pidi polariseeritud ühenduste eest. Polaarsuskaitse skeem on toodud skeemil Sele 3.12.

### 3.2 Akupaki korpuse mehaaniline lahendus

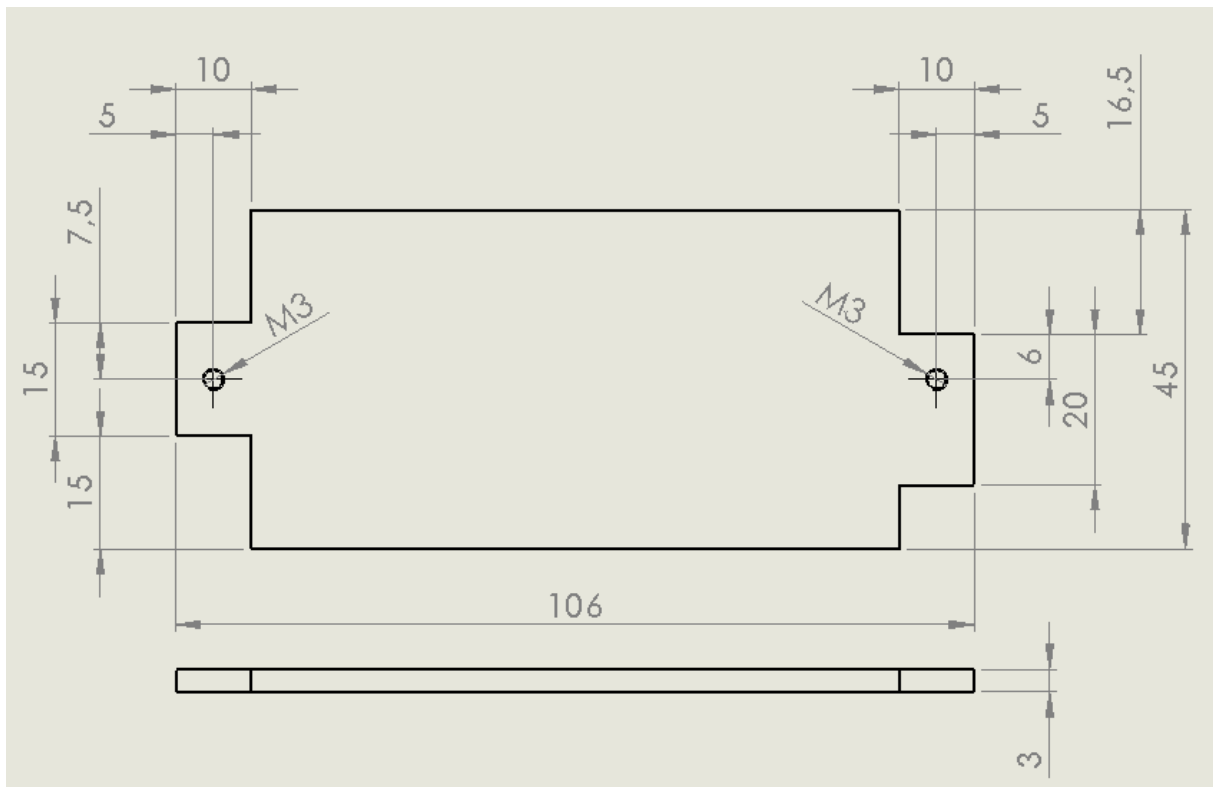
Mehaanilise korpuse ülesanne on akupaki elementide kaitsmine ning komponentide fikseerimine moodustades ühtse seadme. Liitium-polümeer akuelementidele mõeldud korpuses tuleb arvestada sellega, et akuelementidele oleks jäetud piisav paisumisruum, mis on loomulik akude eluea jooksul. Samuti tuleb arvestada akupaki kontrollskeemi soojenemisega laadimisel ja suurte voolude juures ning tuleb tagada soojuse ära juhtimine aku elementide juurest vähendamaks elementide ebaühtlast vananemist ning isetühjenemist. Kaitsmaks akuelemente vibratsiooni ja korpuses loksumise eest on korpuse seinte ning akuelementide vahele projekteeritud polüetüleen vahust plaadid [14]. Akupaki 3D mudel korpuse väljalõikega on toodud Sele 3.13.



Sele 3.13. 3D mudel akupakist

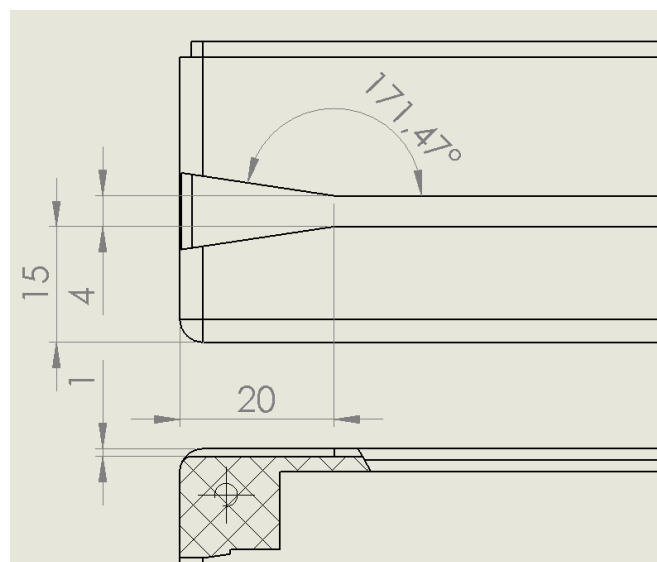
Elektroonikatrükkplaadi jahutamiseks otsustati kasutada 3 mm paksust alumiiniumlehte (joonis Sele 3.14). Alumiiniumi kasuks otsustati materjali heade soojust juhtivate omaduste poolest. Alumiiniumi soojusjuhtivus on olenevalt alumiiniumi sulamist 200 – 250 W/m\*K [15]. Trükkplaat on alumiiniumplaadiga ühendatud kasutades 3M 8940 mõlemalt poolt liimivat soojust juhtivat teipi, mis pakub head soojusjuhtivust ning mehaanilist ühendust trükkplaadi ja alumiiniumlehe vahel. Soojust juhtiva teibi soojusjuhtivus 25 °C juures on 0,4 W/m\*K [16] ning paksus koos liimi kihtidega 0,19 mm. Teibi kasutamine trükkplaadi kinnitamiseks võimaldab kinnitus avade arvelt trükkplaadi väiksema teha ning see pakub väga head temperatuuri ülekannet olles ise samal ajal väga hea elektriline isolaator (mahueritakistus  $2,5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$ ).





Sele 3.14. Akupaki elektroonikaplaadi jahutusplaat

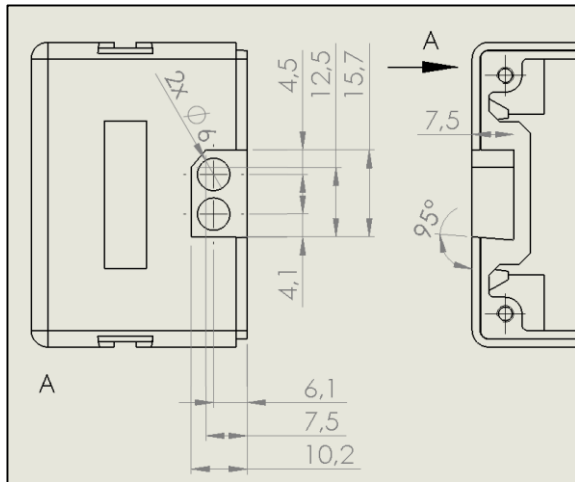
Akupaki robotisse sisestamise lihtsustamiseks ja fikseerimiseks on korpuse seintele projekteeritud sooned (joonise väljavõte Sele 3.15), mis lihtsustavad pistikute ühendamist pesadega ning hoiab akupakki seadmes paigal.



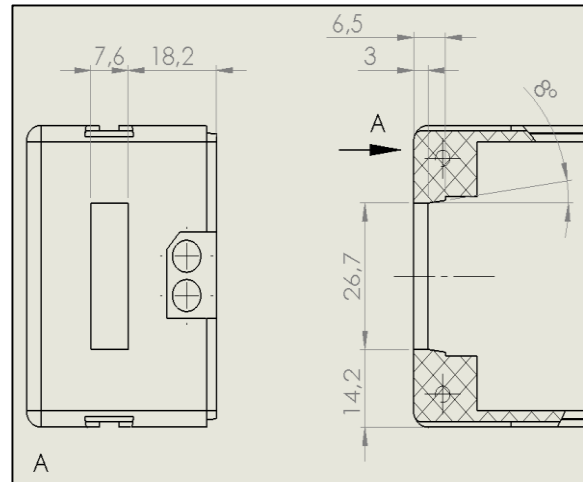
Sele 3.15. Akupaki korpuse sooned

Akupaki elementide peamiseks voolu ühenduseks kasutan mudelismis populaarset XT60 [7] pistikut ja pesa, mille maksimaalne voolu läbilaskevõime on 60 A. See on piisava varuga

sobimaks antud akupaki ühenduseks. Laadimisadapteri ühendamiseks ning SMBus ühenduseks kasutan TE connectivity 350826-4 pesa [17], mille maksimaalne voolu läbilaskevõime on 19 A, mis on laadimisvoolude üle kandmiseks jaoks piisav. Mõlemad pistikud on korpuse külge liimitud kahe komponendise epoksiid liimiga, mis tagab piisava jäikuse. Ühenduste avade mõõtmed on näidatud joonistel Sele 3.16 ja Sele 3.17.



Sele 3.16. Akupaki põhitoite ühenduse ava korpuses.



Sele 3.17. Akupaki toite ja andmesiini pistiku ava korpuses

Kuna tegemist on väga väikese tootmisega on kõige mõistlikum akupaki korpuse tootmise viis ruumprintimine (tihti kasutatakse väljendit 3D printimine). Piisavat jäikust pakub sulatatud sadestumise vormimise meetodil printitav PLA<sup>2</sup>. PLA näol on tegemist populaarse printimiseks kasutatava bioplastiga, mis on piisavalt tugev lihtsamate korpuste valmistamiseks. [18]

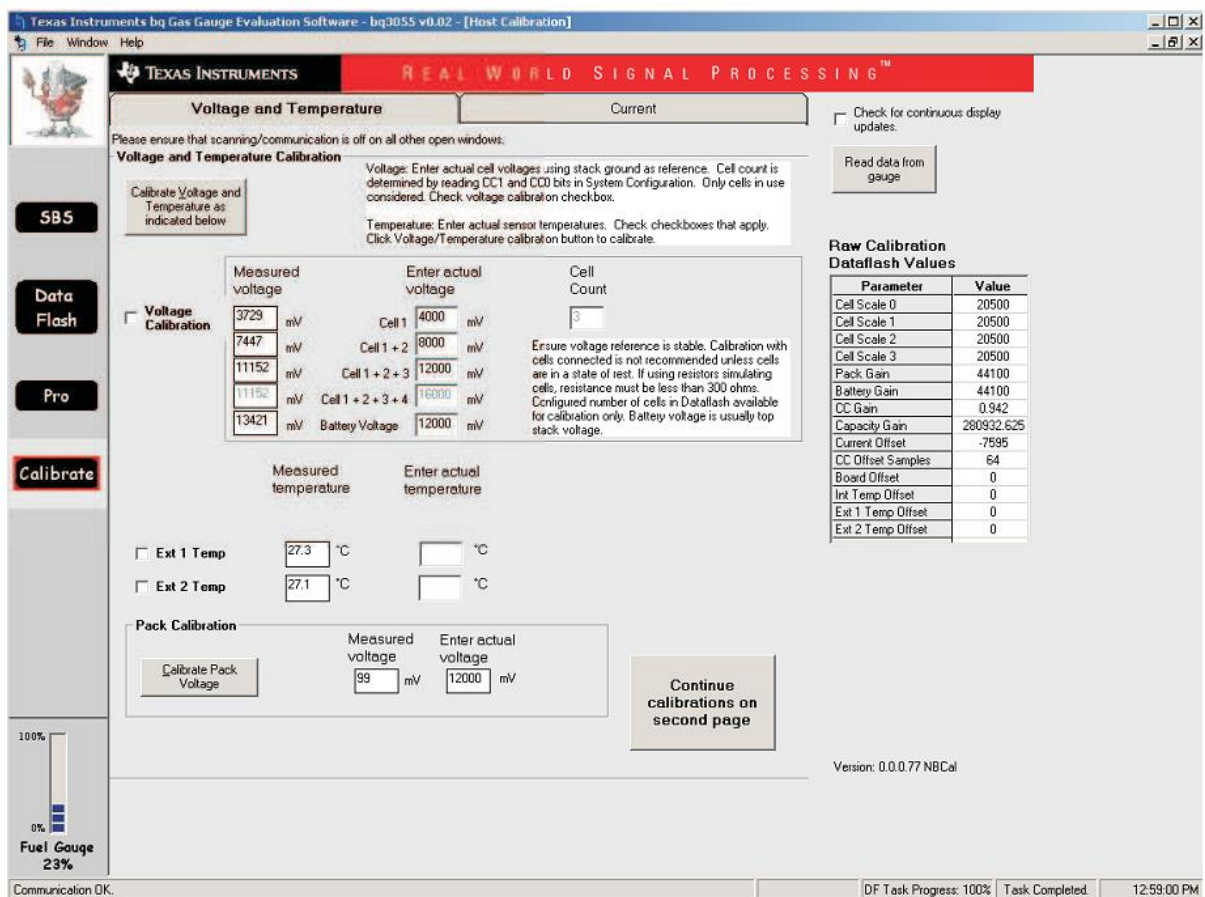
Printitud korpus võimaldab disainida korpuse täpselt roboti ja aku järgi. Kuna ei ole vaja kalleid rakiseid ega tööpinke (CNC freespink) on korpuse tootmise kulud minimaalsed ning kogu korpus on võimalik toota alla 10 € omahinnaga.

<sup>2</sup> Polylactic Acid – polüpiimhape (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub>

## 4 KALIBREERIMINE JA ANDMESIDE ÜHENDUS

### 4.1 Kalibreerimine

Tagamaks akupaki korrektset tööd on vaja elektroonikaplaadi ja kontrollkiipide kalibratsiooni. Peamise akukaitsega tegeleb mikroskeem bq3055, mis tänu oma andmesiinile on väga lihtsasti arvutiga kalibreeritav. Kalibreerimiseks on vaja elektroonikaplaadiga ühendada teada seadesuurused ning vastavalt mõõdetud tulemustele need ära märkida ka bq3055 registritesse. Kalibreerimise lihtsustamiseks pakub Texas Instruments kalibreerimistarkvara erinevatele akupaki kontrolleritele. Tarkvara kalibreerimisakna ekraanivaade on toodud Sele 4.1.



TEXAS INSTRUMENTS REAL WORLD SIGNAL PROCESSING™

**Voltage and Temperature** Current

Please ensure that scanning/communication is off on all other open windows.

**Voltage and Temperature Calibration**

Calibrate Voltage and Temperature as indicated below

Voltage: Enter actual cell voltages using stack ground as reference. Cell count is determined by reading CC1 and CC0 bits in System Configuration. Only cells in use considered. Check voltage calibration checkbox.

Temperature: Enter actual sensor temperatures. Check checkboxes that apply. Click Voltage/Temperature calibration button to calibrate.

Check for continuous display updates.

Read data from gauge

**Raw Calibration Datflash Values**

Parameter	Value
Cell Scale 0	20500
Cell Scale 1	20500
Cell Scale 2	20500
Cell Scale 3	20500
Pack Gain	44100
Battery Gain	44100
CC Gain	0.942
Capacity Gain	280932.625
Current Offset	-7595
CC Offset Samples	64
Board Offset	0
Int Temp Offset	0
Ext 1 Temp Offset	0
Ext 2 Temp Offset	0

**Voltage Calibration**

Measured voltage	Enter actual voltage	Cell Count
3729 mV	Cell 1 4000 mV	3
7447 mV	Cell 1 + 2 8000 mV	
111152 mV	Cell 1 + 2 + 3 12000 mV	
111152 mV	Cell 1 + 2 + 3 + 4 16000 mV	
13421 mV	Battery Voltage 12000 mV	

Ensure voltage reference is stable. Calibration with cells connected is not recommended unless cells are in a state of rest. If using resistors simulating cells, resistance must be less than 300 ohms. Configured number of cells in Datflash available for calibration only. Battery voltage is usually top stack voltage.

**Temperature Calibration**

Measured temperature	Enter actual temperature
Ext 1 Temp 27.3 °C	°C
Ext 2 Temp 27.1 °C	°C

**Pack Calibration**

Calibrate Pack Voltage

Measured voltage	Enter actual voltage
99 mV	12000 mV

Continue calibrations on second page

Version: 0.0.0.77 NBCal

Communication OK. DF Task Progress: 100% Task Completed. 12:59:00 PM

Sele 4.1. Kalibratsioonitarkvara ekraanivaade [19]

Esimese asjana sai kalibreeritud pinged ühendades aku sisendisse testaku. Mõõtes digitaalse voltmeetriga pingeid akuklemmidel saab tulemused millivoltides kanda bq3055 vastavatesse registritesse, millest arvutatakse välja kalibratsiooni väärtused mikroskeemi jaoks.

Järgmiseks tuleb kalibreerida voolu mõõtev ahel. Selleks on vaja ühendada kindel püsiv vool akupaki negatiivse klemmi ja voolu väljundi negatiivse klemmi vahele. Kalibreerimiseks kasutatav vool on 2,00 A, ning see väärtus tuleb kalibreerimiseks kirjutada samuti bq3055 vastavasse registrisse.

Lisaks pingete ja voolu kalibreerimisele tuleb kalibreerida ka temperatuuriandurid. Selleks tuleb mõõta ruumi temperatuur, kus andurid kalibreerimisel asuvad ning seejärel mõõdetud temperatuur bq3055 registrisse sisestada.

Selleks, et määrata mikroskeemi mahtuvusmõõturile kogu kaitse ja laadimisahela voolutarve tuleb akupakk tarbijatest lahti ühendada. Kui akupakiga ei ole ühendatud ühtegi lisatarbijat on kogu mõõdetav vool akupaki enda kaitseelektronika tarbitav vool, mis on normaalses töörežiimis konstantne. Saadud tulemuse, mille saame bq3055 voolu mõõtmise skeemiosaga saab ära märkida omavoolutarbe registrisse, mida arvestatakse aku mahutavuse arvutamisel pideva isetühjenemisena.

Lisaks mõõdetavatele suurustele tuleb ära märkida mikroskeemi bq3055 tarbeks ka aku tehaseparameetrid, milleks on aku keemia (liitium-ioon või liitium-polümeer) ja aku mahutavus kas milliamper tundides või millivatt tundides. Antud parameetreid kasutatakse aku parameetrite jälgimisel (miinimum – maksimum pinged, - temperatuurid ja muud).

## 4.2 Andmeside

Aku parameetrite muutmiseks ning hilisemaks aku oleku lugemiseks ning juhtimiseks on kasutusel SMBus andmesiin. Tegemist on kahe signaalse I<sup>2</sup>C andmesiini edasiarendus, mida kasutatakse peamiselt süsteemi ja toiteahelate vaheliseks andmevahetuseks. SMBus andmesiin võimaldab seadmetel vahetada tootjainformatsiooni, tootekoode, erinevaid olekuid, vigade sündmusi, kontrollsignaale ja muud seesugust. Kuna SMBus baseerub I<sup>2</sup>C andmesiinil, on võimalik ühele siinile ühendada mitu seadet korraga ning erinevate seadete poole pööratakse kasutades seadmete 7-bitist aadressi. [20]

SMBus on loodud parandamaks I<sup>2</sup>C andmesiini elektrilisi parameetreid. SMBus sobib paremini madalamal toitepingel töötavatesse süsteemidesse ning madala voolutarbega seadmetega suhtluseks. Peamised elektrilised erinevused SMBus ja I<sup>2</sup>C andmesiini erinevate versioonide vahel on toodud tabelis Tabel 4.1.

Tabel 4.1. SMBus ja I<sup>2</sup>C andmesiinide võrdlus [20]

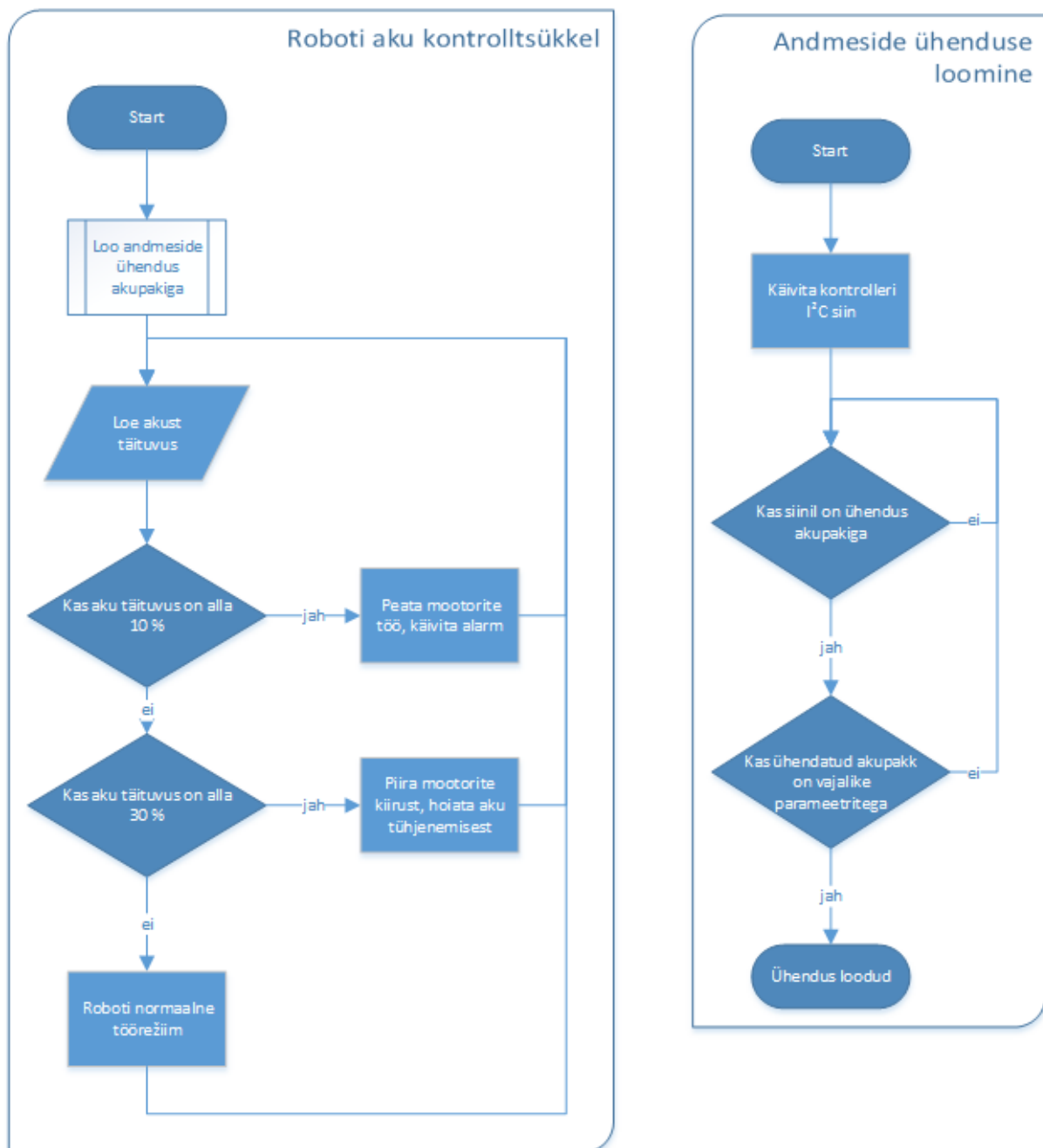
DC parameetrite võrdlus standard I <sup>2</sup> C, kiire I <sup>2</sup> C ja SMBus vahel								
Sümbol	Parameeter	Standard I <sup>2</sup> C		Kiire I <sup>2</sup> C		SMBus		Ühik
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
V <sub>IL</sub>	Fikseeritud sisendnivoo	-0,5	1,5	-0,5	1,5	-0,5	0,8	V
	V <sub>DD</sub> st sõltuv sisendnivoo	-0,5	0,3 * V <sub>DD</sub>	-0,5	0,3 * V <sub>DD</sub>	N/A	N/A	V
V <sub>IH</sub>	Fikseeritud sisendnivoo	3,0	V <sub>DD</sub> max + 0,5	3,0	V <sub>DD</sub> max + 0,5	2,1	5,5	V
	V <sub>DD</sub> st sõltuv sisendnivoo	0,7 * V <sub>DD</sub>	V <sub>DD</sub> max + 0,5	0,7 * V <sub>DD</sub>	V <sub>DD</sub> max + 0,5	N/A	N/A	V
V <sub>HYS</sub>	V <sub>IH</sub> - V <sub>IL</sub>	N/A	N/A	0,05 * V <sub>DD</sub>	-	N/A	N/A	V
V <sub>OL</sub>	V <sub>OL</sub> 3 mA juures	0	0,4	0	0,4	N/A	N/A	V
	V <sub>OL</sub> 6 mA juures	N/A	N/A	0	0,6	N/A	N/A	
	V <sub>OL</sub> 350 μA juures	N/A	N/A	N/A	N/A	-	0,4	
I <sub>PULLUP</sub>		N/A	N/A	N/A	N/A	100	350	μA
I <sub>LEAK</sub>		-10	10	-10	10	-5	5	μA

Kus:

- V<sub>IL</sub> – Sisendsignaali madala nivoo pinge
- V<sub>IH</sub> - Sisendsignaali kõrge nivoo pinge
- V<sub>HYS</sub> – Pingete vaheline hüsterees
- V<sub>OL</sub> – Väljundpinge madala nivoo pinge
- I<sub>PULLUP</sub> – *pull-up* takistit läbiv vool
- I<sub>LEAK</sub> - lekkevool
- V<sub>DD</sub> – toitepinge
- N/A – ei ole kohaldatav

### 4.3 Tarkvaralahendus akupaki ja roboti vahel

Kuna targast akupakist on võimalik välja lugeda nii akus alles olev energia hulk kui ka prognoos aku kestvuse kohta minutites on võimalik roboti tööd selle järgi muuta. Sedasi kasutatavat voolu piirates on võimalik roboti tööaega pikendada. Lisaks mõjub lõppfaasis tarbitava voolu piiramine ka aku elueale paremini kuna välditakse voolupiikide ajal hetkelist pinge langemist alla kriitilise piiri. Üks võimalikest lahendustest on toodud algoritmis Sele 4.2.



Sele 4.2. Tarkvaralahendus robotile

# KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö eesmärgiks on valmistada TTÜ Robotiklubi robotitele tark akupakk, mis oleks võimeline tegelema liitium-polümeer aku kaitsmisega ning laadimisega. Töö jaguneb nelja ossa: olemasolevate süsteemide kaardistamine, elektroonikaskeemi ja trükkplaadi projekteerimine, mehaanika projekteerimine ning seadme kalibreerimine ja tarkvara seadistamine.

Turul on olemas mitmed kaitselahendused ja akupaki laadimise lahendused, kuid ühtset süsteemi, mis suudaks akupakki süsteemis sees olles hallata ei leidu, seetõttu võeti ette täiesti uue mooduli projekteerimine.

Elektroonika projekteerimisel kasutatakse Altium Designer tarkvara, mis võimaldab kogu elektroonika disaini luua ühes tarkvaralahenduses ning soodustab hilisemat integratsiooni mehaanika joonestustarkvaraga. Elektroonika on jaotatud tinglikult kaheks koos töötavaks süsteemiks: laadimise skeemiosa ning aku kaitse, balansseerimise skeemiosa. Laadimiseks on kasutusel Texas Instrumentsi mikroskeem bq24610, mis pakub efektiivset laadimist ning dünaamilist voolujaotust aku ning adapteri vahel. Balansseerimiseks ja kaitsemõõtmisteks on kasutusel Texas Instrumentsi mikroskeem bq3055, mis jälgib pidevalt aku olulisi parameetreid nagu pinge, temperatuur ja vool ning on võimeline aku tarbijast täielikult lahti ühendama juhul kui üks parameetritest väljub normi piirest. Lisaks kaitseahelale pakub bq3055 ka aku mahtuvuse mõõtmise funktsiooni, mis annab robotile võimaluse jälgida akus olevat energia hulka ning selle järgi on roboti algoritmil võimalik tegevusi paremini planeerida.

Seadme korpus on projekteeritud kasutades SolidWorks 3D projekteerimistarkvara. Korpuse peamine ülesanne on akuelementide kaitse väliste löökide eest. Lisaks kaitsele pakub korpus ka jahutust juhtelektroonika elementidele. Korpusel asetseb 2 pistikut, millest üks on mõeldud aku peamiseks vooluühenduseks ning teine andmesideks ning laadimiseks. Korpus on valmistatud ruumprintimise meetodil kahest osast, mis on omavahel ühendatud poltliitega. Ruumprintimine võimaldab paindlikku samas soodsat lahendust

Andmesideühenduseks roboti ja akupaki vahel kasutatakse SMBus andmesiini, mis on loodud erinevate toiteahelate vaheliseks protokolliks. Tegemist on I<sup>2</sup>C edasiarendusega seega väga lihtsalt kasutusele võetav erinevate mikrokontrollerite poolt.

SMBus andmesiini kasutatakse ka akupaki esimeseks kalibreerimiseks, millega seadistatakse bq3055 mikroskeemis kõik aku algparameetrid ning kalibreeritakse pinget, voolu ja

temperatuuri jälgivad mõõteahelad. Kalibreerimiseks kasutatakse Texas Instruments kalibreerimistarkvara.

Bakalaureusetöö käigus valmis esimene prototüüp, mida hakatakse kasutama TTÜ Robotiklubi robotitel testakuna. Pärast katsetusi selguvad seadme edasiarenduse vajadused ning sobivuse korral hakatakse antud lahendust kasutama kõikide suuremate robotite peal. Esmased katsetused näitavad, et skeem on võimeline laadima akut kasutades sisendina labori toiteblokist tulevat pinget. Samuti on skeem võimeline kaitsma akut kõikide ülesandes toodud kriteeriumide eest.



## SUMMARY

The goal of this thesis was to design a smart battery module for TUT Robotics clubs robots which is capable of charging and protecting a 3 cell lithium-polymer battery. The thesis consists of four main themes: analysis of off the shelf solutions, electronic circuit and PCB design, mechanical design, and calibration and software algorithms.

There are many protection circuits and charging modules but none of them provide both features in the same package. This is the main reason why a new system was designed.

Electrical schematic and PCB design was done using Altium Designer, which also provides very good integration with mechanical CAD software. Electronic schematic is divided into 2 linked parts: charging circuit, and balancing and protection circuit. To manage the charging part of the circuit Texas Instruments bq24610 integrated circuit (IC) is used. This provides efficient charging algorithm and dynamic current management between battery and charging adapter. For battery balancing and protection Texas Instruments bq3055 IC is used. This IC constantly monitors important parameters like cell voltage, current, and temperature of the battery pack and can cut off the battery from the system in the event of an error. In addition to battery pack protection it also provides a gas gauging, which gives the robot using the battery the ability to monitor the charge left in the battery pack and change its behavior accordingly.

Battery packs enclosure is designed using SolidWorks mechanical CAD software. Enclosures main purpose is protection for battery packs cells. It also provides some heat sinking for the control circuit. There are two connectors on the enclosure. One of them is used as a main current output for the battery pack and the other is used for SMBus communication and charging connector to the adapter. Enclosure is manufactured using 3D printing, which is affordable and flexible enough for this application. Enclosure is made of two parts that are bolted together.

For data transfer between battery pack and the robot SMBus is used. As SMBus is based on I<sup>2</sup>C protocol it is easily implementable on any microcontroller. SMBus is also used for initial calibration of the battery pack and the circuit board. To set all of the battery and circuit parameters for bq3055 Texas Instruments calibration software is used.

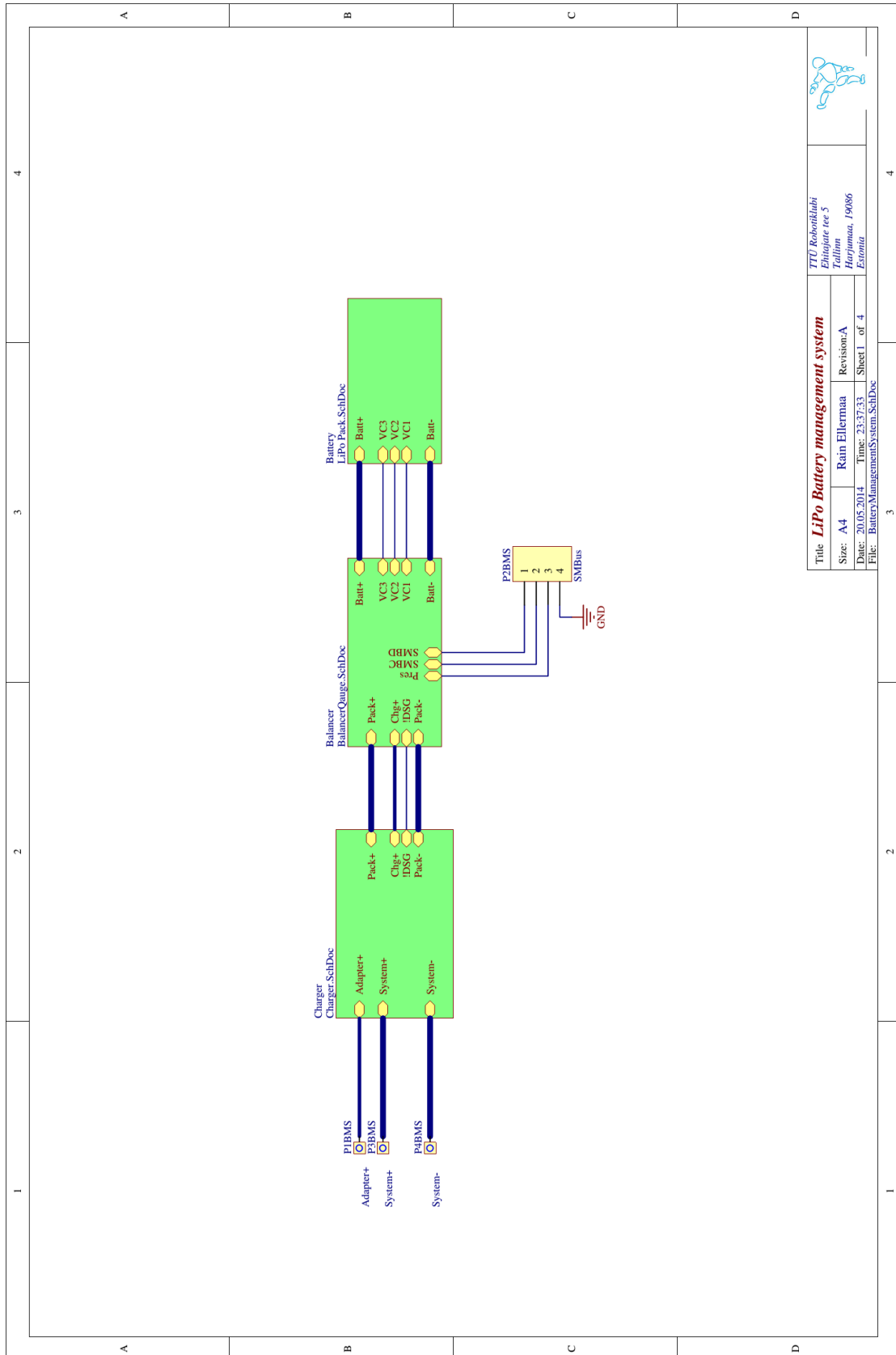
As a result of this thesis a prototype was built. After initial testing the circuit is able to charge and balance a lithium-polymer battery and is able to protect the battery from all errors defined in the thesis. After test run on the first robot the circuit will be used on all TUT Robotics clubs larger robots.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

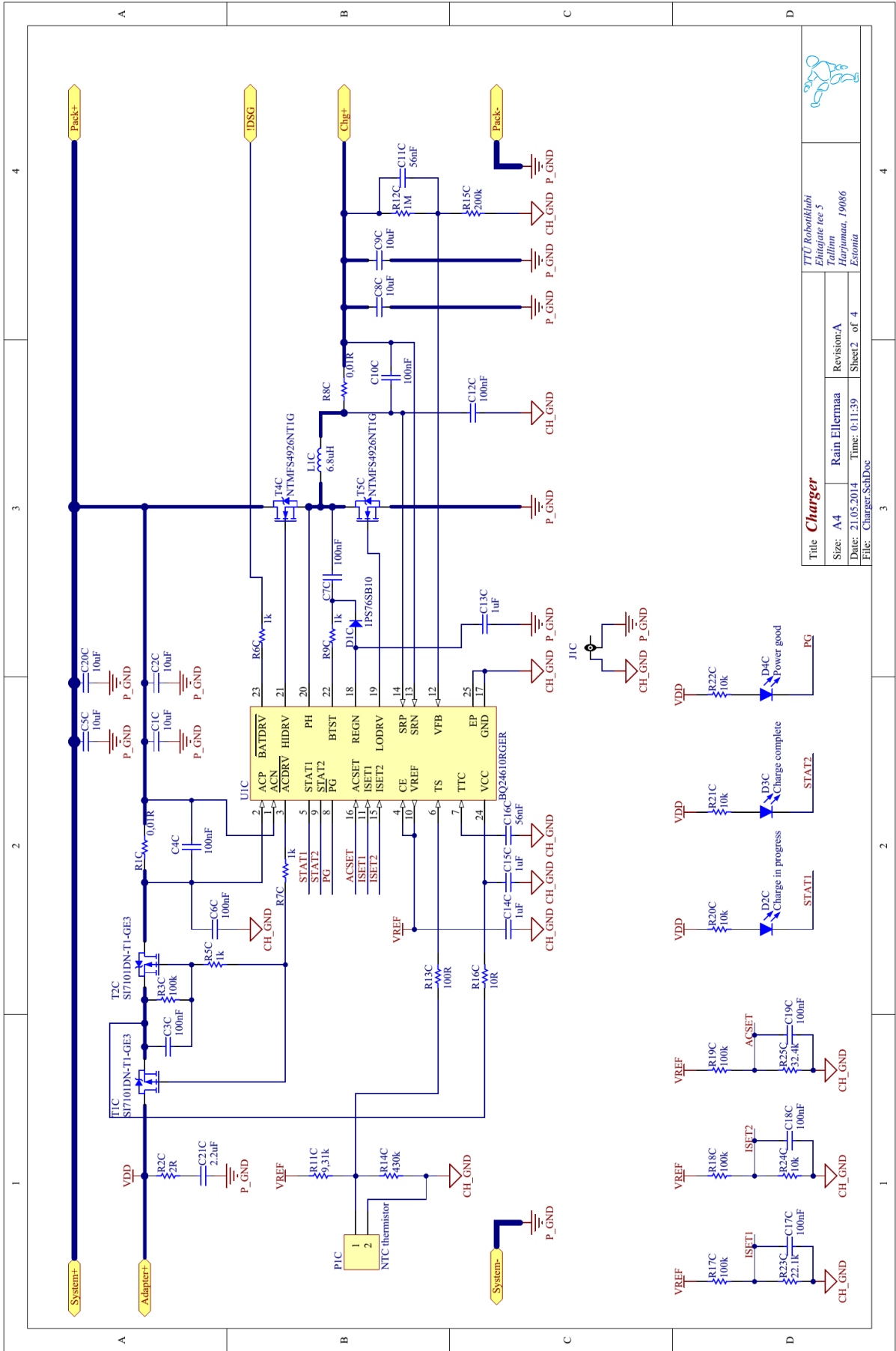
- [1] „Akude ja akukaitselahenduse müüja veebilehekülg,“ [WWW] [www.batteryspace.com](http://www.batteryspace.com) (06.05.2014).
- [2] „Akude ja akukaitselahenduse müüja veebilehekülg,“ [WWW] <http://bestechpower.com/> (06.05.2014).
- [3] „Võrgu entsüklopeedia akude kohta,“ [WWW] <http://batteryuniversity.com/> (06.05.2014).
- [4] „Akude laadimise ja testimise seadmete tootja kodulehekülg,“ [WWW] <http://www.cadex.com/en> (06.05.2014).
- [5] Y. Barsukov and J. Qian, *Battery Power Management for Portable Devices*, Norwood, Massachusetts: Artech House, 2013.
- [6] U. Sengupta, „Cell Balancing: Better Safe than Sorry,“ *Battery Power online*, nr [Online], 2014.
- [7] „Hobielektronika internetikaubamaja,“ [WWW] <http://www.hobbyking.com> (06.05.2014).
- [8] „BQ24610 tooteleht,“ [WWW] <http://www.ti.com/product/BQ24610> (06.05.2014).
- [9] „bq24610 andmeleht,“ 2013. [WWW] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24610.pdf> (06.05.2014).
- [10] „bq24610 näitelahenduse käsiraamat,“ [WWW] <http://www.ti.com/lit/ug/slue396a/slue396a.pdf> (06.05.2014).
- [11] „bq3055 tooteleht,“ [WWW] <http://www.ti.com/product/BQ3055> (06.05.2014).
- [12] „bq3055 andmeleht,“ [WWW] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq3055.pdf> (06.05.2014).
- [13] „bq3055 tehniline käsiraamat,“ [WWW] <http://www.ti.com/lit/ug/slue440/slue440.pdf> (06.05.2014).

- [14] „Pakkematerjali tootja kodulehekülg,“ [WWW]  
[http://www.nefab.ee/Vahtplastist\\_pehmenused.aspx](http://www.nefab.ee/Vahtplastist_pehmenused.aspx) (06.05.2014).
- [15] „Konstantide tabelid,“ [WWW] <http://www.engineeringtoolbox.com> (06.05.2014).
- [16] „3M tootja kodulehekülg,“ [WWW]  
[http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/et\\_EE/World/Wide/](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/et_EE/World/Wide/) (06.05.2014).
- [17] „TE connectivity tootja kodulehekülg,“ [WWW] <http://www.te.com> (06.05.2014).
- [18] „PLA omadused,“ [WWW] <http://plastics.ides.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing> (06.05.2014).
- [19] „bq3055 proovimooduli käsiraamat,“ [WWW]  
<http://www.ti.com/lit/ug/sluu824/sluu824.pdf> (06.05.2014).
- [20] „SMBus andmesiini kirjeldav kodulehekülg,“ [WWW] <http://smbus.org/> (06.05.2014).

**LISAD**



Title: <b>LiPo Battery management system</b>		TU/e Robotikaalabi	
Size: A4		Eelkõne: 1000	
Date: 20.05.2014		Tehnikum: 19086	
Time: 23:37:33		Eestis: 19086	
Revision: A		Sheet 1 of 4	
File: BatteryManagementSystem.SchDoc			



TTU Robotika Ehitajate tee 5 Tallinn Harjumaa, 19086 Eesti	
Title	Charger
Size	A4
Date	21.05.2014
Revision	A
Time	0:11:39
File	Charger.SchDoc
Sheet	of 4

3

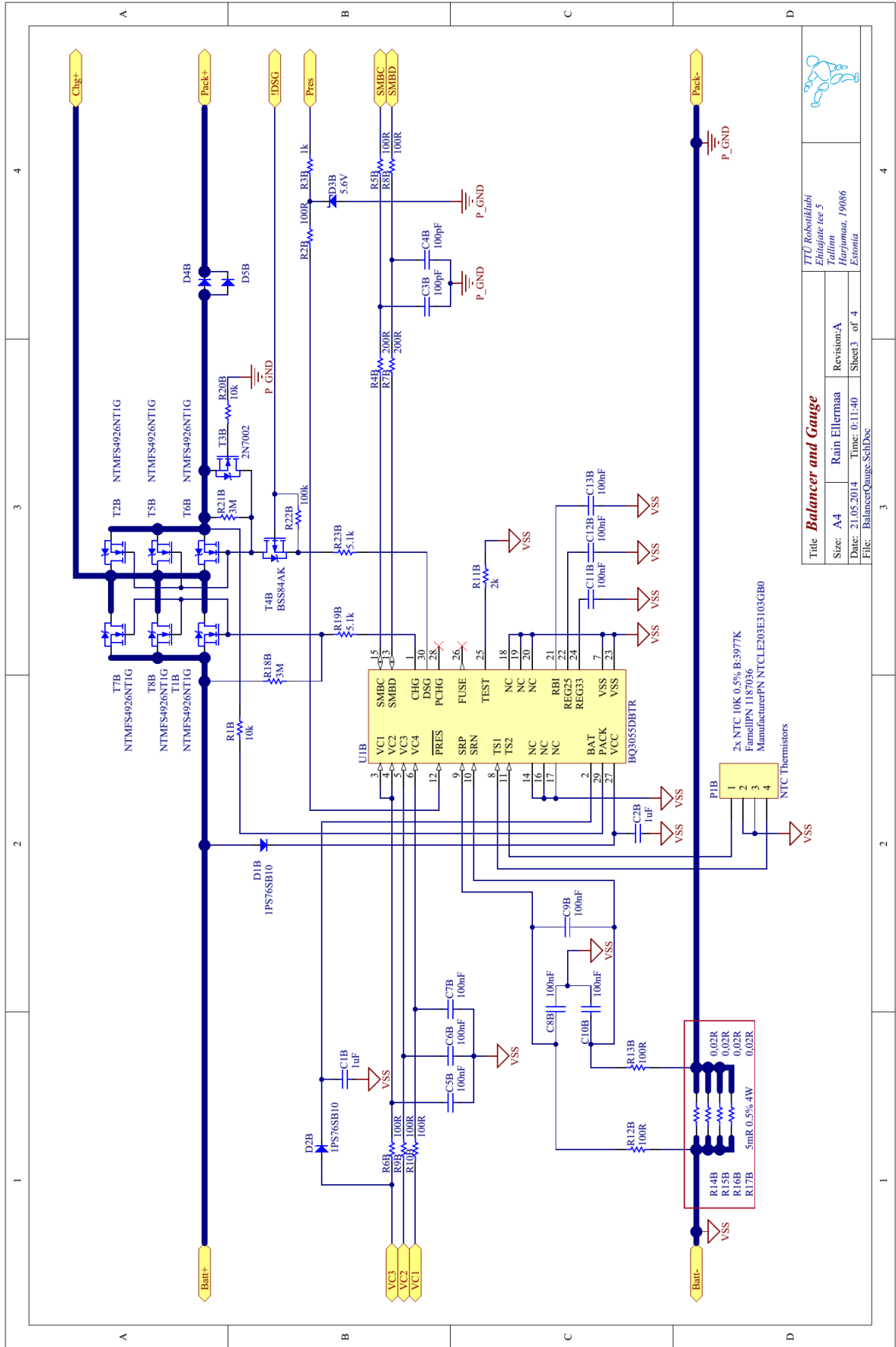
4


2

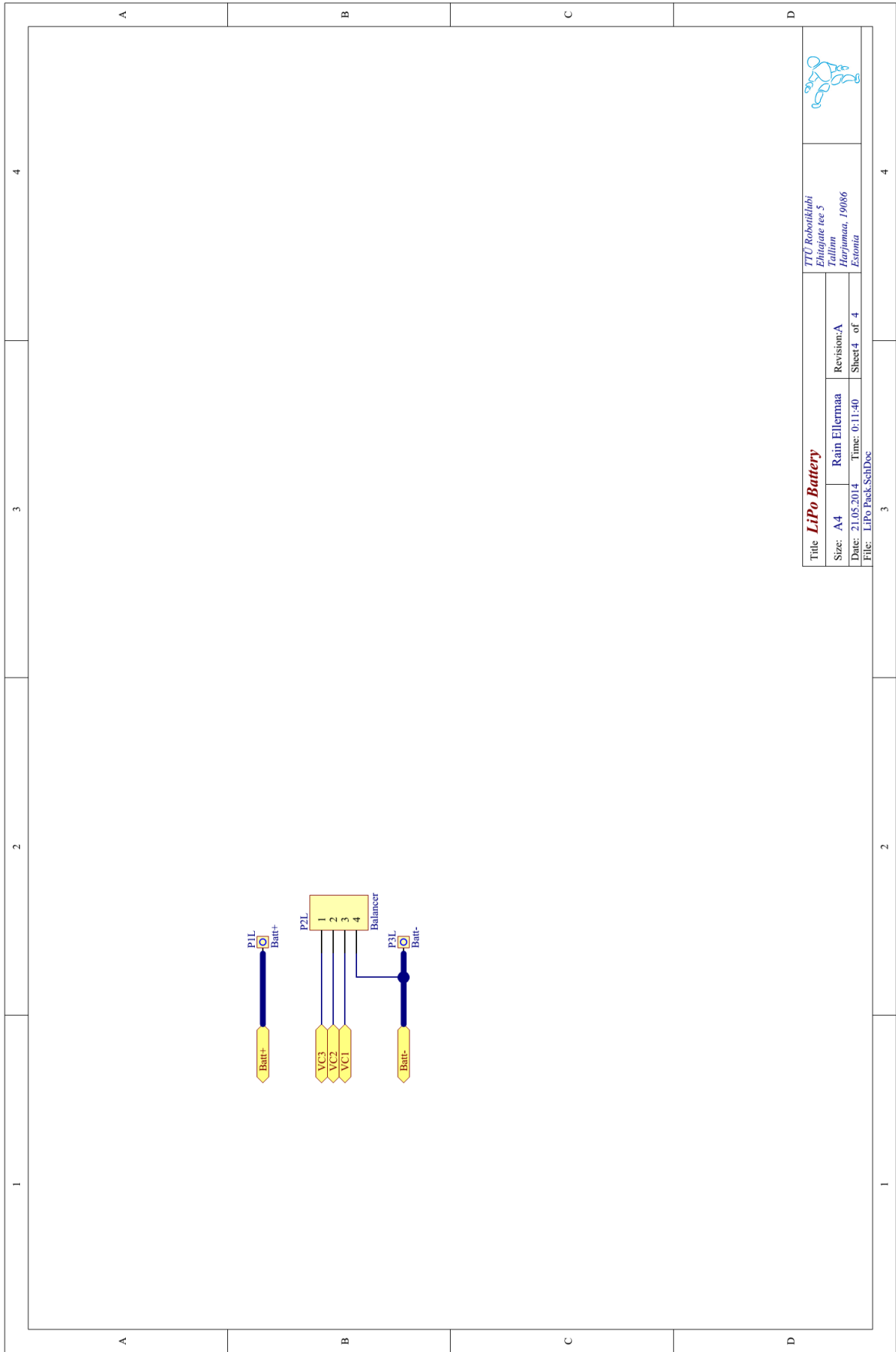
1

1

1



	
TTU Robotikklubi Ehitaigiate tee 5 Tallinn Harjamaa, 19086 Estonia	
Title <b>Balancer and Gauge</b>	Revision: A
Size: A4 Rain Ellermaa	Sheet 3 of 4
Date: 21.05.2014 Time: 0:11:40 File: BalancerGauge.SchDoc	



TTU Robotikklubi  
Ehitajate tee 5  
Tallinn  
Harjumaa, 19086  
Estonia

Title <b>LiPo Battery</b>	
Size: A4	Rain Ellermaa
Date: 21.05.2014	Revision: A
Time: 0:11:40	Sheet 4 of 4
File: LiPo Pack.SchDoc	



# LiPo Battery management system

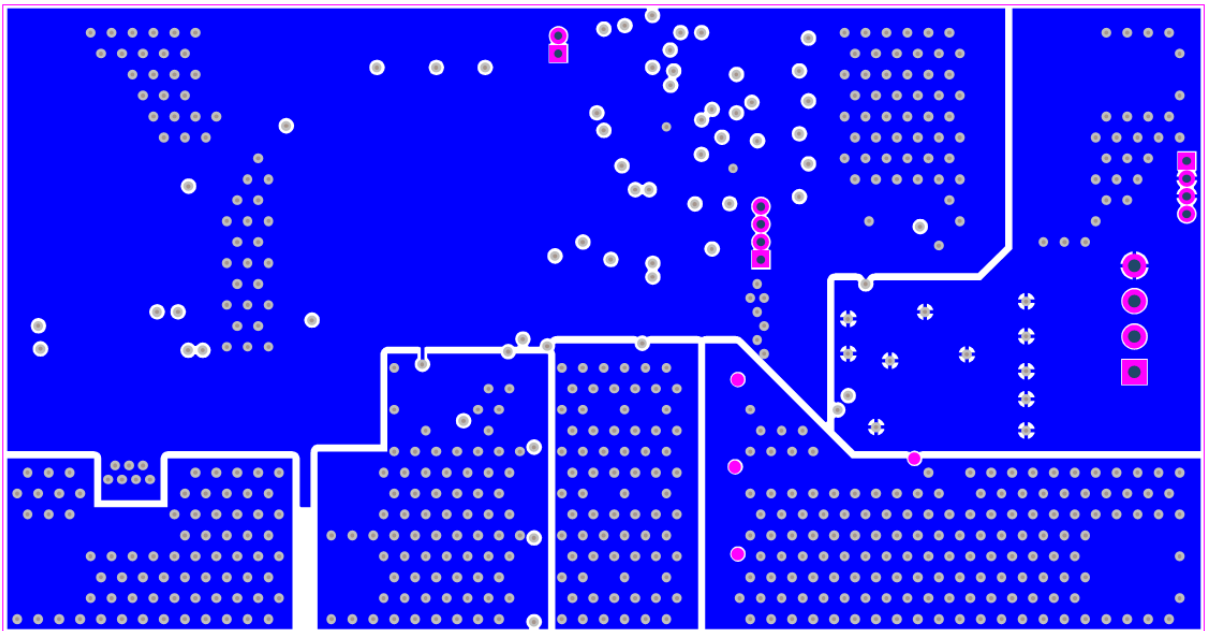
Rain Ellermaa  
 BatteryManagementSystem.PrjPCB  
 None

18.05.2014 22:54:18  
 18-May-14 10:57:52 PM

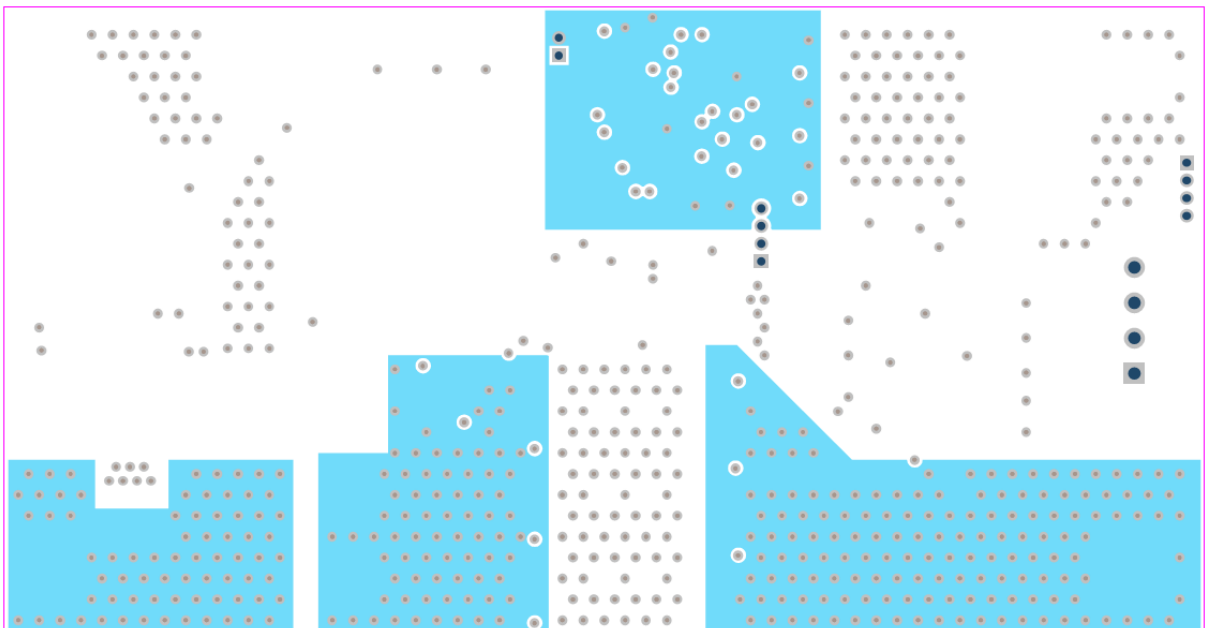
Nr	Kirjeldus	Kommentaar	Sheemilshis	Tritikplaanil piltend	Teejla	Teejla mudelinumber	Famelli tootekood	Kogus
1	Capacitor Ceramic	1uF	C1B, C2B, C13C, C14C, C15C	C 0603		MC0603X105K250CT	1759409	5
2	Capacitor Ceramic	10uF	C1C, C2C, C5C, C8C, C9C, C20C	C 1206		MC1206X106K250CT	2320887	6
3	Capacitor Ceramic	100pF	C3B, C4B	C 0603		MC0603N101J500CT	1759066	2
4	Capacitor Ceramic	100nF	C3C, C4C, C5B, C6B, C6C, C7B, C7C, C8B, C9B, C10B, C10C, C11B, C12B, C12C, C13B, C17C, C18C, C19C	C 0402				18
5	Capacitor Ceramic	56nF	C21C	C 0603		CO603C563K5RACTU	1865538	2
6	Capacitor Ceramic	2.2uF	D1B, D1C, D2B	C 0805		GRM218F51E225ZA01L	9527702	1
7	Diode	1P576S810		SOD323		1P576S810	1081179	3
8	LED	Charge in progress	D2C	LED 3.2x1.6		KPT-2012SURCK	2099241	1
9	Diode Zener	5.6V	D3B	SOD323		BZT52C5V6S-7-F	2077936	1
10	LED	Charge complete	D3C	LED 3.2x1.6		KPT-2012SGC	2099239	1
11	Diode		D4B, D5B	SMC				2
12	LED	Power good	D4C	LED 3.2x1.6		KP-2012QBC-D	2217974	1
13	Inductor	6.8uH	L1C	COIL5		SRP1235-6R8M	1828109	1
14	Header, 4-Pin	NTC Thermistors	P1B	MHDXL4		NTCLE203E3103G80	1187036	1
15	Header, 2-Pin	NTC thermistor	P1C	MHDXL2		NTCLE203E3103G80	1187036	1
16	Header, 4-Pin	SMBus	P2BMS	MHDXL4				1
17	Header, 4-Pin, Right Angle	Balancer	P2L	HDR1X4H				1
18	Resistor	10k	R1B, R20B, R20C, R21C, R22C, R24C	R 0603				6
19	Resistor	0,01R	R1C, R8C	R 1206		LRMAM1206-R01FT5	2079442	2
20	Resistor	100R	R2B, R5B, R6B, R8B, R9B, R10B, R12B, R13B, R13C	R 0603		CRGH0603F100R	2331989	9
21	Resistor	2R	R2C	R 1206		MC0125W120612R0	2142034	1
22	Resistor	1k	R3B, R5C, R6C, R7C, R9C	R 0603				5
23	Resistor	100k	R3C, R17C, R18C, R19C, R22B	R 0603				5
24	Resistor	200R	R4B, R7B	R 0603				2
25	Resistor	2k	R11B	R 0603		CR0603-JW-201GLF	2333571	2
26	Resistor	9.31k	R11C	R 0603		CPF0603F9K31C1	1527506	1
27	Resistor	1M	R12C	R 0603		CRGH0603F1M0	2332042	1
28	Resistor	0,02R	R14B, R15B, R16B, R17B	R 2512		LVK24R020DER	1462319	4
29	Resistor	430k	R14C	R 0603		CR0603-FX-2003ELF	2138561	1
30	Resistor	200k	R15C	R 0603		CR0603-FX-2003ELF	2333532	1
31	Resistor	10R	R16C	R 0603		CRGH0603J10R	2331699	1
32	Resistor	3M	R18B, R21B	R 0603		MC0063W060313M00	2141599	2
33	Resistor	5.1k	R19B, R23B	R 0603		CR0603-FX-5101ELF	2333596	2
34	Resistor	22.1k	R23C	R 0603		CPF0603F22K1C1	1527620	1
35	Resistor	32.4k	R25C	R 0603		ERJ3EKF324ZV	2059455	1
36	Mosfet N-Ch	NTMFS4926NT1G	T1B, T2B, T4C, T5B, T5C, T6B, T7B, T8B	DFNS		NTMFS4926NT1G	2317608	8
37	Mosfet P-Ch	SI7101DN-TI-GE3	T1C, T2C	DFNS		SI7101DN-TI-GE3	2364059	2
38	Mosfet N-Ch	2N7002	T3B	SOT-23		2N7002	1510761	1
39	Mosfet P-Ch	BSS84AK	T4B	SOT-23		BSS84AK	1972673	1
40	Li-Ion Battery Pack Manager	BQ30550BTR	U1B	Texas Instruments		BQ30550BTR		1
41	Li-Polymer Battery Charger	BQ24610RGER	U1C	Texas Instruments		BQ24610RGER		1



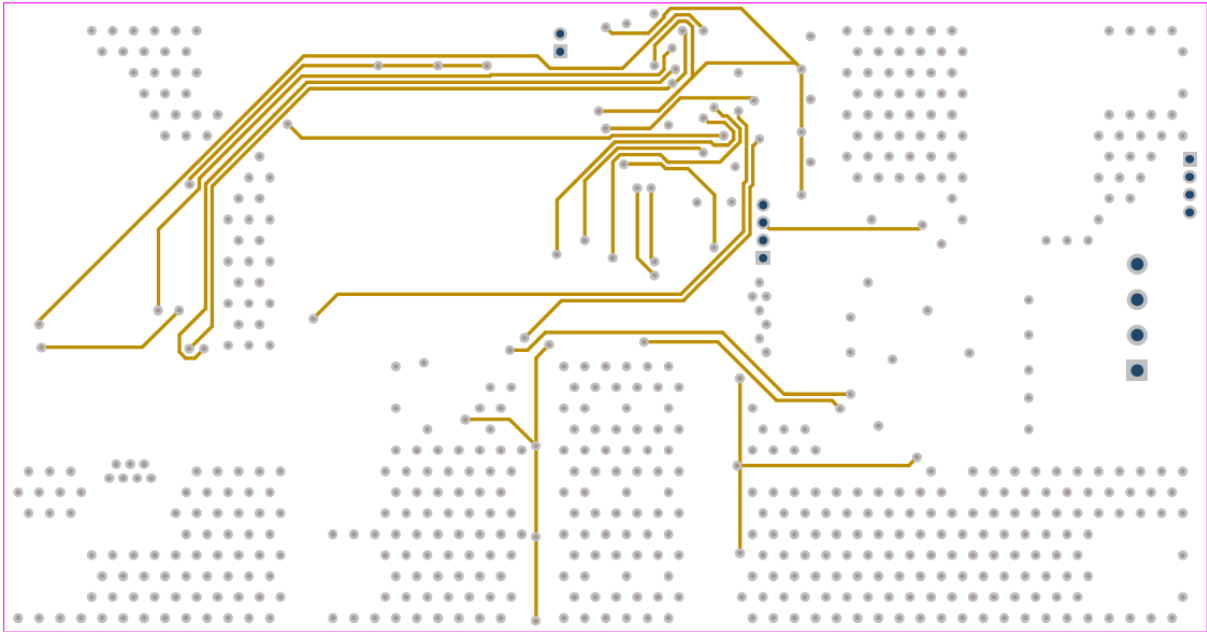
Trükkplaadi kihtide joonised



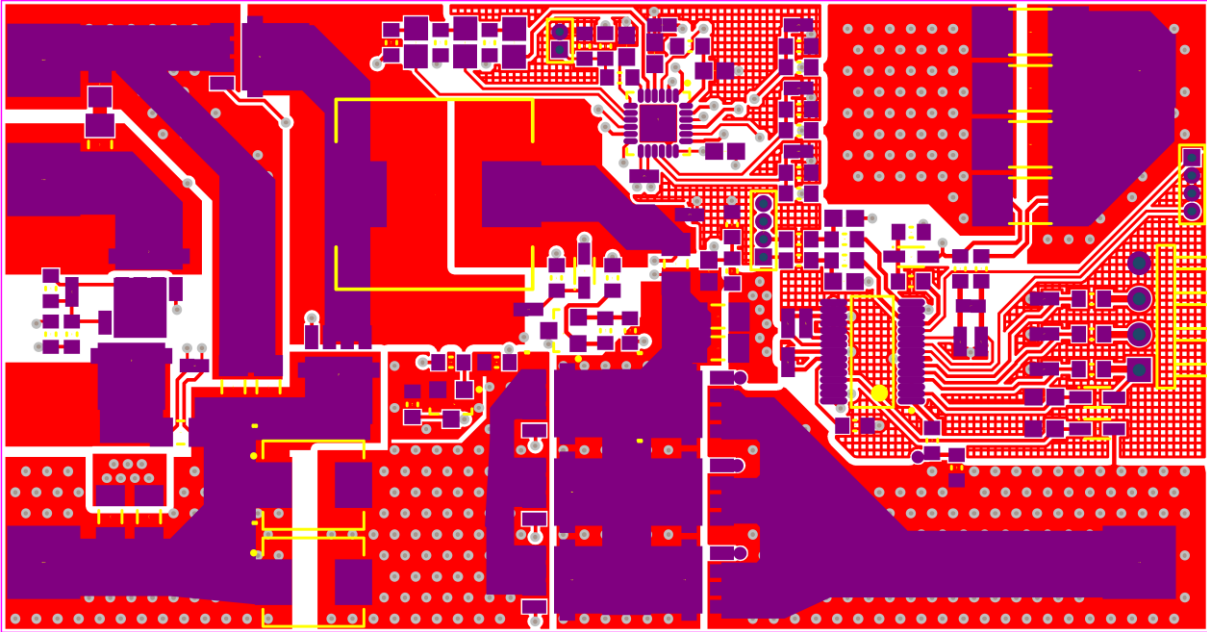
Alumine kiht



Sisemine alade kiht

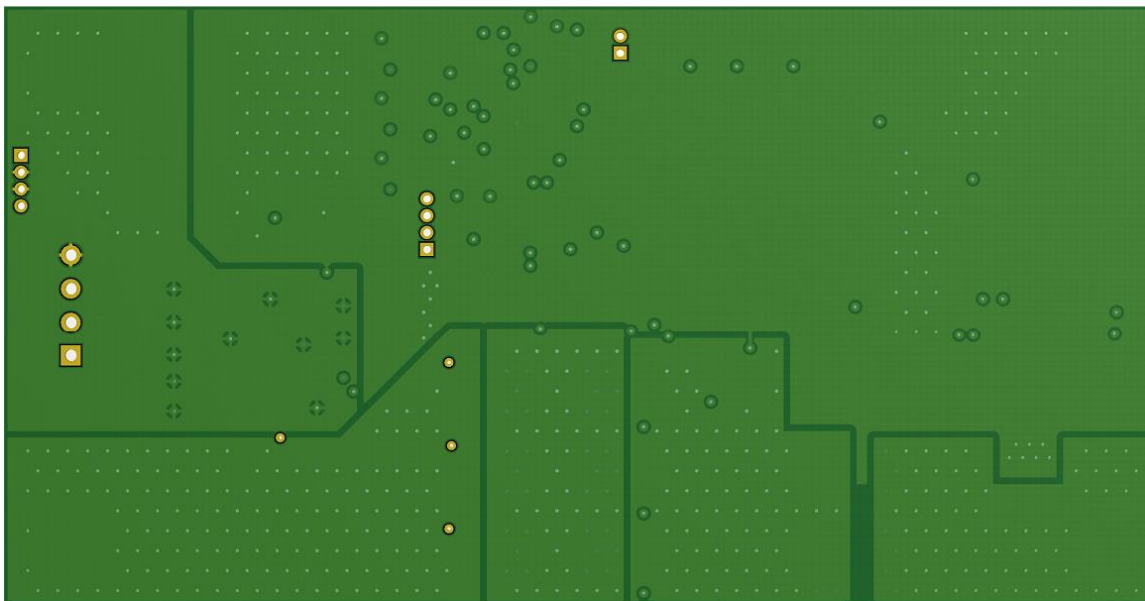
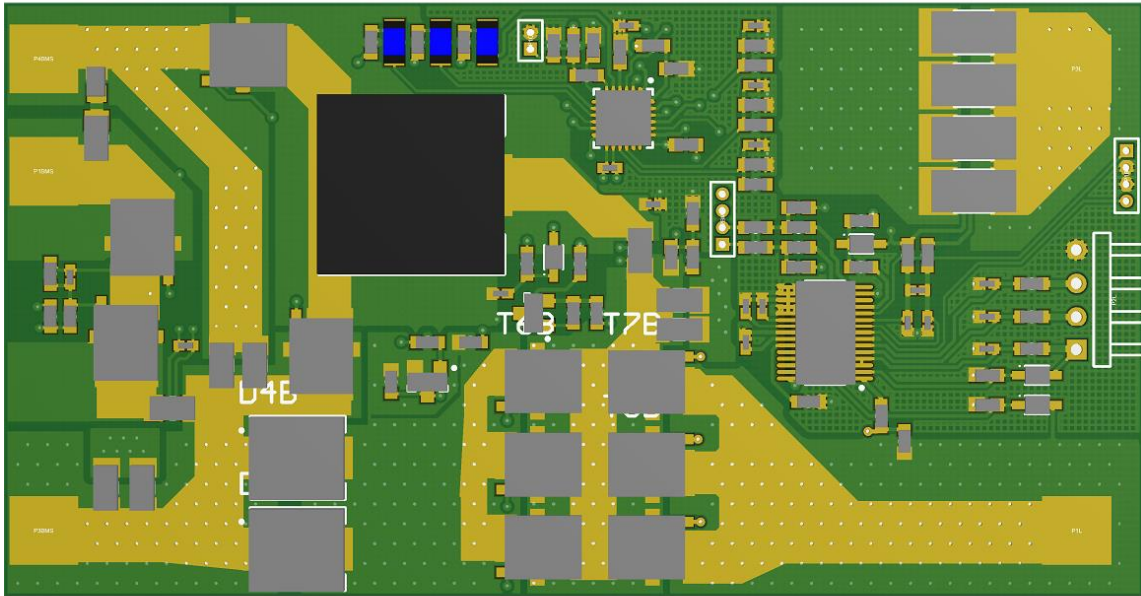


Sisemine signaalide kiht



Pealmine kiht

Trükkplaadi 3D visualisatsioon pealt ja altvaates



LISA 5

Akupaki gabariitmõõdmed

