



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut

Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHK40LT

Kristjan Jansons

Akuhaldussüsteem elektriautole FEST15

Bakalaureusetöö

Autor taotleb tehnikateaduste
bakalaureuse akadeemilist kraadi

Tallinn

2015

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 Maido Hiimaa juhendamisel.

„.....“201....a

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitavatele nõuetele.

„.....“201....a

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

„.....“201....a

..... allkiri

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2015. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Kristjan Jansons, 123652

Õppekava: MAHB02/09

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: Maido Hiimaa, teadur

Konsultandid:

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

EST: Akuhaldussüsteem elektriautole FEST15

ENG: Battery Management System for the Electric Car FEST15

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Olemasoleva akuhaldussüsteemi analüüs ja vajalike edasiarenduste kaardistamine uue akuhaldussüsteemi loomiseks	27.03.2015
2.	Akuhaldussüsteemi ülema (<i>master</i>) ja alama (<i>slave</i>) elektroonikaploki disain, komponentide valiku põhjendused	10.04.2015
3.	Andmevahetuse loomine ülema ja alama elektroonikaploki vahel	17.04.2015
4.	Andmevahetuse loomine ülema elektroonikaploki ning vormeli juhtseadme vahel	24.04.2015
5.	Akuhaldussüsteemi balansseerimise ja akude laetuse arvestuse algoritmid	1.05.2015
6.	Akuhaldussüsteemi elektroonika paigutus ja konstruktsioonilahendused	8.05.2015

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: akude aktiivbalansseerimise realiseerimine, erinevatel pingepotentsiaalidel asuvate kiipide vahelise andmevahetuse realiseerimine, akude laetuse väljaarvutamine, akuhaldussüsteemi integreerimine ülejäänud süsteemiga

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistootlus esitada hiljemalt 18.05.2015

Töö esitamise tähtaeg 22.05.2015

Üliõpilane Kristjan Jansons

/allkiri/ 26.03.2015

Juhendaja Maido Hiimaa

/allkiri/ 26.03.2015

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

SISUKORD	4
EESSÕNA	7
LÜHENDID	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. AKUHALDUSSÜSTEEMI OLULISUS	10
2. VÕIMALIKUD LAHENDUSED	12
2.1 Akuhaldussüsteemi topoloogiad	12
2.2 Balansseerimistopoloogiad.....	14
3. EELDUSED	16
3.1 Töötingimused.....	16
3.2 Mõõtmiste määramatus ja sagedus.....	17
4. MEHAANIKA	19
4.1 Materjali ja tootmistehnoloogia valik	19
4.2 Akuelementide ühendusplaatide toetusplaat.....	20
4.2.1 Disain	20
4.3 Akuhaldussüsteemi ülema kinnitus	22
4.3.1 Disain	22
5. ELEKTROONIKA	25
5.1 Akuhaldussüsteemi ülem.....	25
5.1.1 Komponentide valik	25
5.1.2 Skeem	27

5.1.3 Trükkplaadi disain.....	33
5.2 Akuhaldussüsteemi alam.....	33
5.2.1 Komponentide valik	34
5.2.2 Skeem.....	35
5.2.3 Trükkplaadi disain.....	43
6. TARKVARA.....	44
6.1 CAN-suhtlus akuhaldussüsteemi ülema ning elektroonika juhtploki vahel.....	44
6.2 Isoleeritud SPI-suhtlus akuhaldussüsteemi ülema ja alama vahel	45
6.3 Akude laetuse algoritmid	46
6.4 Akude balansseerimise algoritmid	49
6.5 Akude info logimine.....	51
KOKKUVÕTE.....	52
SUMMARY	54
KASUTATUD KIRJANDUS	56
LISAD	59
Lisa 1: Akukasti paiknemine vormelautos	59
Lisa 2: Ülevaade akukastist.....	59
Lisa 3: Akuhaldussüsteemi ülema paiknemine akukasti elektroonikasektsioonis.....	60
Lisa 4: Tappliitega toetusplaadi mõlemad pooled	60
Lisa 5: Ühendusplaatide toetusplaadi paiknemine akumoodulis.....	61
Lisa 6: Akuhaldussüsteemi alama paiknemine akumoodulis.....	62
Lisa 7: Akuhaldussüsteem ülema kinnituse analüüsi ekraanitõmmis - pinged.....	63

Lisa 8: Ühendusplaatide toetusplaadi analüüsi ekraanitõmmis - pinged	64
Lisa 9: Mikrokontrolleri ploki skeem.....	65
Lisa 10 Akuhaldussüsteemi ülema mikrokontrolleri poolt lülitatavad LEDid	66
Lisa 11: Akuhaldussüsteemi ülema 3D-vaade	67
Lisa 12: Akuhaldussüsteemi alama 3D-vaade.....	67
Lisa 13: Akuhaldussüsteemi ülema pealne kiht	68
Lisa 14: Akuhaldussüsteemi ülema teine kiht.....	69
Lisa 15: Akuhaldussüsteemi ülema kolmas kiht	70
Lisa 16: Akuhaldussüsteemi ülema alumine kiht.....	71
Lisa 17: Akuhaldussüsteem alama pealne kiht	72
Lisa 18: Akuhaldussüsteem alama teine kiht	73
Lisa 19: Akuhaldussüsteem alama kolmas kiht	74
Lisa 20: Akuhaldussüsteem alama alumine kiht	75
Lisa 21: Akuhaldussüsteemi ülema elektroonikakomponentide nimekiri	76
Lisa 22: Akuhaldussüsteemi alama elektroonikakomponentide nimekiri.....	77
Lisa 23: Väljavõtte kasutatavate akuelementide andmelehest	80

EESSÕNA

Bakalaureusetöö on valminud koostöös Formula Student Team Tallinnaga. Töös esitatud lahendus on mõeldud 2015. aastal valmivale vormelautole FEST15. Olen tänulik meeskonnale, kes on olnud abiks mitmete projekteerimise käigus esilekerkinud probleemide lahendamisel.

Autor avaldab eraldi tänu meeskonnaliikmetele Ardo Kõivule ja Aleksandr Stennikovile.

LÜHENDID

BMS - akuhaldussüsteem, i.k. *Battery Management System*

ECU - elektroonika juhtplokk, i.k. *Electronics Control Unit*

FSTT - *Formula Student Team Tallinn*

FEST15 - vormelauto, mis ehitatakse 2015. aasta hooaja tarbeks, i.k. *Formula Estonia 15*

ASIC - rakendus-spetsiifiline mikroskeem, i.k. *Application-Specific Integrated Circuit*

ADC - analoog-digitaalmuundur, i.k. *Analog-to-Digital Converter*

SOC - akude laetuse näitaja, i.k. *State Of Charge*

AIR - aku isolatsiooni relee, i.k. *Accumulator Insulation Relay*

CAN - i.k. *Controller Area Network*

LQFP - i.k. *Low profile Quad Flat Package*

UFBGA - i.k. *Ultra Fine Ball Grid Array*

SPI - i.k. *Serial Peripheral Interface*

SOIC - i.k. *Small Outline Integrated Circuit*

SWD - i.k. *Serial Wire Debug*

UART - i.k. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

TVS - supressordiod, i.k. *Transient Voltage Supression*

MOSFET - isoleeritud paisuga väljatransistor, i.k. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor*

LED - valgusdiod, i.k. *Light-Emitting Diode*

CRC - i.k. *Cyclic Redundancy Check*

CTR - i.k. *Current Transfer Ratio*

GPIO - i.k. *General-Purpose Input/Output*

OCV - i.k. *Open-Circuit Voltage*

SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö eesmärk on projekteerida vormelautole FEST15 mitmete uuendustega akuhaldussüsteem, mille ülesandeks on tagada akusüsteemi ohutu töövahemik. Varasemate hooegade akuhaldussüsteemides on ilmnunud hulk probleeme, mille lahendamine on selle hooaja üks prioriteetsemaid ülesandeid.

FEST15 on elektriajamiga sõiduk, mille käitamiseks tuleb elektrienergia talletada akupakis, mille paiknemist autos on näha lisas 1. Akupaki projekteerimine on mahukas töö, mis hõlmab paljusid probleeme ning seega on selle projekteerimine mõistlik jaotada väiksemateks alamülesanneteks. See bakalaureusetöö sisaldab akuhaldussüsteemi elektroonikaplaatide ja nende kinnituste projekteerimist ning akuhaldussüsteemis kasutatavate algoritmide analüüsi.

Seni kasutusel olnud akuhaldussüsteemil ilmnas palju probleeme: akuelementide balansseerimine raiskas liigselt energiat, programmeerimine ning sisse- ja väljalülitamine oli liiga ajakulukas, akuhaldussüsteemi alama trükkplaadi deformatsioonid olid liiga suured, kommunikatsioonisüsteem oli liiga keeruline, akuelementide laetust oli raske õigesti hinnata ning akuelementide seisundi analüüsimiseks ei talletatud piisavalt infot.

Turul pakutavaid BMS-id ei lahenda kõiki eelmainitud probleeme või kasutavad ruumi ebaefektiivselt ning neid on keeruline FEST15 akusüsteemi integreerida. Seega võttis meeskond vastu otsuse, et tuleb ise projekteerida akuhaldussüsteem, mis kõrvaldab nimetatud probleemid.

Mehaanilises osas oli vaja projekteerida lahendus, mis hoiaks akuelementide ühendusplaadid ühtlasemas tasapinnas. Samuti oli tarvis projekteerida uus kinnitus akuhaldussüsteemi ülemale. Elektroonika peamised probleemid olid seotud aktiivbalansseerimisahelate ning kommunikatsioonisüsteemi disainimisega. Tarkvaraliselt tuli lahendada suhtlus mitme suhtlusprotokolli abil ning leida sobivad algoritmid, mis lahendaksid akuelementide balansseerimise ning laetuse probleemid.

1. AKUHALDUSSÜSTEEMI OLULISUS

Tänapäeval turul pakutavatest akutehnoloogiatest on parima erivõimsusega (Wh/kg) ning erienergiaga (W/kg) liitiumioonakud [1]. Neid kasutatakse enim ka elektriajamiga võidusõiduautode puhul, sest kaalusääst on võidusõidumasinate disainimisel üks olulisemaid kriteeriume. Liitiumioonakud on kasutusel ka FEST15 puhul, täpsemini on tegu liitiumpolümeerakudega, mis kasutavad katoodi materjalina LiFePO_4 . Nende ühenduskonfiguratsioon FEST15 akupakis on 140S3P ehk 140 rööpahelat on ühendatud jadamsi ning igas rööpahelas on 3 akuelementi. Akupakis on 7 akumoodulit, mille akuelementide konfiguratsioon on 20S3P. Akupaki ülesehitus on näha lisas 2. Liitiumioonakude puhul tuleb jälgida nende klemmipinget ja temperatuuri ning neid läbivat voolu, et need ei väljuks lubatud vahemikust. Alljärgnevalt on ära toodud võimalikud ohtlikud olukorrad [2]:

- liiga madala klemmipingega korral kahjustub akukeemia, akuelemendid riknevad ning neid ei õnnestu enam laadida
- liiga kõrge klemmipingega korral võib tekkida *thermal runaway*, mille tõttu võivad elemendid süttida
- liiga kõrge ja madala temperatuuri korral kiireneb akuelementide vananemine, kusjuures laadimise ajal on lubatav vahemik palju väiksem, kui tühjakslaadimise ajal
- liiga kõrge vool läbi akuelementide nii laadimise kui ka tühjakslaadimise ajal lühendab elementide eluiga ning võib põhjustada ülekuumenemist, kusjuures lubatud laadimisvool on enamasti mitu korda väiksem kui lubatud tühjakslaadimisvool

Akuhaldussüsteem peab ka jälgima, et elemendid oleksid ühtlaselt laetud, sest vastasel korral võib väga palju energiat kasutamata jääda. Probleem tuleneb sellest, et laadimine tuleb lõpetada siis, kui kõige rohkem täis laetud elemendid on jõudnud maksimaalse lubatud väärtuseni. Seetõttu ei saa täis laadida neid elemente, mis ei ole maksimaalse väärtuseni jõudnud. Tühjakslaadimine tuleb lõpetada siis, kui kõige vähem täis laetud elemendid on jõudnud minimaalse lubatud väärtuseni, mille tõttu ei saa ära kasutada nendes elementides olevat energiat, mille pinge ei ole veel langenud minimaalse lubatud väärtuseni. Akuelementide kvaliteet ei ole kahjuks nii ühtlane, et elemendid tühjeneksid ja laaduksid

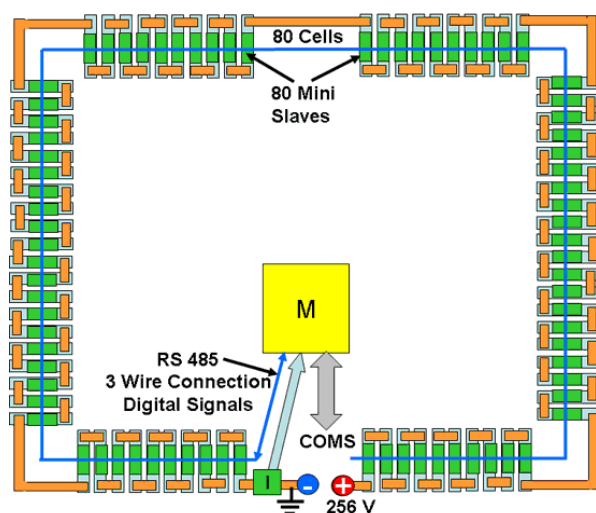
samas tempos, mille tõttu nende laetuse erinevus aja jooksul ainult suureneb, kui neid ei balansseerita. [2]

2. VÕIMALIKUD LAHENDUSED

2.1 Akuhaldussüsteemi topoloogiad

Akuhaldussüsteemide topoloogiad jaotatakse üldiselt kolmeks: jaotatud, tsentraliseeritud ning modulaarne topoloogia, lähtuvalt sellest, kui palju on vaja teha ühendusi trükkplaatide ning akuelementide vahel ning kui palju on süsteemis elektroonikaplaate [3].

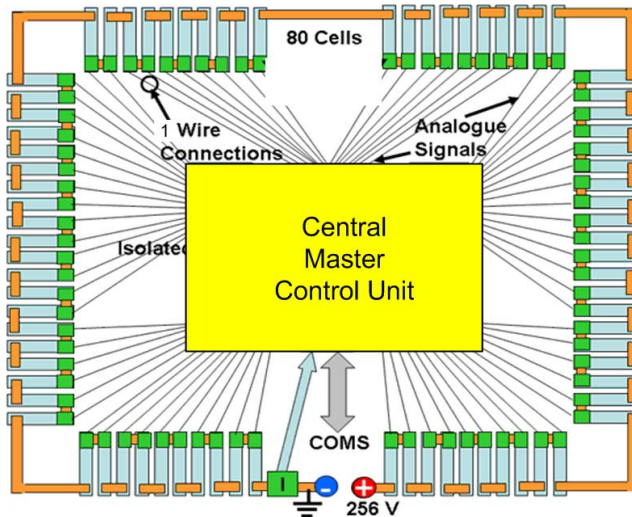
Jaotatud topoloogia on ülema-alama topoloogia. Selle puhul on igal rööpahelal, mis on jadamisi ühendatud, oma alam. Kõik alamad on ühendatud ülemaga, et ülem saaks vastu võtta otsuseid süsteemi olukorra kohta. Et topoloogia disain on lihtne, võib selline süsteem olla korrekse implementatsiooni korral äärmiselt töökindel. Puuduseks on see, et suure hulga trükkplaatide paigaldamine akuelementidele võib olla problemaatiline, olenevalt akuelementide ümbrise ehitusest. FEST15 akuelementide konstruktsioon on *pouch*-tüüpi, sest sellise pakendi puhul kulub ümbrisele kõige vähem ruumi ning sama mahtuvuse korral on nende kaal väikseim[4]. Kui *pouch*-tüüpi akuelementidele ühendada iga rööpahela kohta üks trükkplaat, siis oleks keeruline tagada head koostekvaliteeti. Samuti oleks aktiivbalansseerimisahelaid keeruline realiseerida, sest see nõuaks äärmiselt palju juhtmeühendusi ning tõenäoliselt lisatrükkplaatide.



Sele 2.1. Jaotatud topoloogia [3]

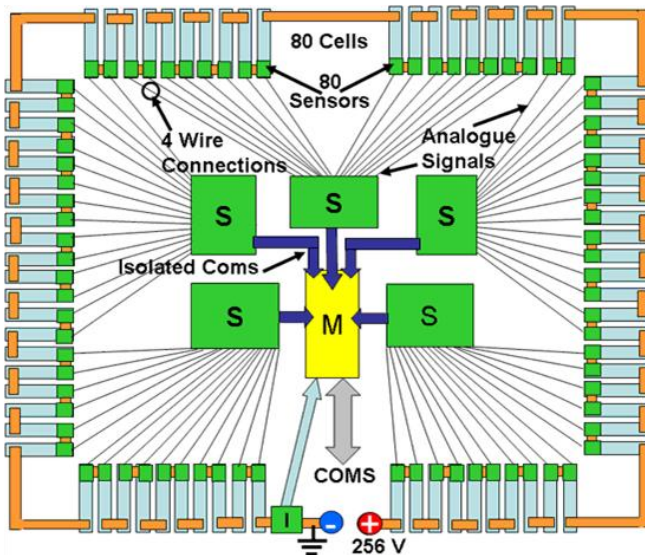
Tsentraliseeritud topoloogia puhul on üks keskne juhtseade, mille külge ühenduvad kõik rööpahelad. Süsteemi kasuks räägib kindlasti see, et alamate puudumise tõttu ei ole

probleeme kommunikatsiooni tagamisega ülema ja alama vahel. Suurim puudus on ühenduse tagamine iga jadamisi ühendatud rööpahelaga, mis eeldaks suurel hulgal juhtmeühendusi, mis ei ole efektiivne ega töökindel lahendus.



Sele 2.2. Tsentraalne topoloogia [3]

Modulaarne disain on samuti ülema-alama topoloogia, kuid selle puhul on iga alamaga ühendatud mitu jadamisi ühendatud rööpahelat. Probleemiks on isoleeritud kommunikatsiooni tagamine ülema ning alamate vahel.



Sele 2.3. Modulaarne topoloogia [3]

FEST15 puhul sai valitud modulaarne disain nagu ka kahel eelneval hooajal, sest see ühildub ülejäänud akusüsteemiga kõige paremini. Reeglid nõuavad, et akupakis paiknevad

akuelemendid oleksid jaotatud identseteks mooduliteks. Ühe mooduli maksimaalne pinge võib olla 120 VDC ning energiat tohib ühes moodulis olla maksimaalselt 6 MJ [5]. FEST15 akupakk on jaotatud seitsmeks akumooduliks, sest vähesemate akumoodulite korral oleks ühes moodulis lubatust rohkem energiat. Mõistlik on disainida igale akumoodulile alam, mis suhtleb ülemaga, mis võtab vastu otsuseid süsteemi efektiivse ja ohutu toimimise tagamiseks. Lisaks on sellise disaini puhul võimalik vähendada ühendusjuhtmete arvu, sest pingete mõõtmiseks on kasutusel poltühendus, mis on tõestanud end töökindlama ühendusviisina kui ühendusjuhtmed.

2.2 Balansseerimistopoloogiad

Balansseerimistopoloogiad jaotuvad passiiv- ja aktiivbalansseerimiseks. Passiivbalansseerimise meetod põhineb üleliigse energia kõrvaldamises rohkem laetud akuelementidest. Rohkem täis laetud akuelementidest juhitakse vool läbi takisti, mille tulemusena akuelemendis olnud energia muundub soojuseks, mis eraldub takisti kaudu. Aktiivbalansseerimise puhul juhitakse energia nendest akuelementidest, kus on rohkem energiat, nendes akuelementidesse, kus on vähem energiat.[6]

Passiivbalansseerimise peamine miinus on asjaolu, et üleliigne energia muundub lihtsalt soojuseks. Samuti ei ole seda meetodit mõistlik rakendada tühjakslaadimise ajal, sest see ei pikenda kogu akupaki kasutusaega. Lisaks tuleb üleliigsest soojusest jahutuse teel vabaneda, mis raiskab omakorda energiat, sest on vaja projekteerida võimsam jahutussüsteem.[2]

Aktiivbalansseerimise topoloogiad saab omakorda jagada kolmeks alamkategoriaaks: kondensaatoreid, induktoreid või transformatoreid energiavahendajana kasutavad topoloogiad. Kõigi kolme puhul on võimalik realiseerida mitmeid alamtopoloogiaid. Induktoreid või transformatoreid kasutavad balansseerimistopoloogiad võimaldavad lühemat balansseerimisaega.[6]

Kuna kõikide aktiivbalansseerimisahelate juhtimine on kõvasti keerulisem kui varem kasutusel olnud passiivbalansseerimisahelate juhtimine, siis sai otsustatud, et on mõistlik kasutada ASIC-ut, mis vastutaks balansseerimisahelate juhtimise eest. Turul pakutavatest

valikutest osutus kõige sobivamaks ASIC LTC3300-1, mis kasutab *flyback*-konverteril põhinevat aktiivbalansseerimisskeemi[7].

3. EELDUSED

3.1 Töötingimused

Akuhaldussüsteem paikneb nii akumoodulis kui ka akukasti elektroonikasektsioonis, mille tõttu pidi analüüsima mõlemat töökeskkonda. Peamised tegurid, mida tuleb arvesse võtta on järgmised:

- temperatuur - akumoodulis võib temperatuur tõusta liiga kõrgeks nii akude laadimise, tühjakslaadimise kui ka balansseerimise mõjul ning see võib kahjustada nii akuelemente kui ka elektroonikat
- vibratsioon - akukast paikneb auto tagaosas, kus vibratsioon võib ulatuda 10m/s^2 ning see võib tekitada probleeme nii mehaanikale kui ka trükkplaadile
- niiskus - selles töös ei ole see tõsine probleem, ent mõjutab elektroonika töökindlust

Kaitseks liiga kõrge temperatuuri eest on akukastile projekteeritud jahutussüsteem, mis tekitab õhuringluse ega lase akumoodulite temperatuuril liiga kõrgele tõusta. Jahutussüsteem võtab õhku süsinikmonokoksi sees asuvast ruumist, kuhu ei tohiks sattuda liigselt tolmu ja mustust. Kui võistlus leiab aset palaval päeval, siis on võimalik süsinikmonokoksi sees olevat õhku jahutada kuiva jääga. Akuelementide lubatud temperatuur on $60\text{ }^\circ\text{C}$, mis on sätestatud võistlusreeglitega [5] ning mida lubab ka akuelementide andmeleht, mille väljavõte on esitatud lisas 23. Jahutussüsteem jahutab ka akuhaldussüsteem alamal, mille temperatuur võib tõusta veidi kõrgemale kui $60\text{ }^\circ\text{C}$ balansseerimisprotsessi ajal. Trükkplaadi töökindlus tagamiseks on valitud komponendid, mis taluvad temperatuuri üle $80\text{ }^\circ\text{C}$.

Vibratsioon on üks peamisi elektroonika veatekke põhjuseid autodel. Vibratsioon tekitab pingeid nii joodises kui ka komponentides, mille tõttu need võivad trükkplaadilt eemalduda. Samuti võib vibratsioon lõhkuda trükkplaadis olevaid radu, kui need on liiga peenikesed. Selleks, et tagada töökindlus on kasutatud autotööstuse jaoks mõeldud jootematerjali ning lakke, mis parandavad mehaanilist vastupidavust vibratsioonile. Lisaks on kasutatud autotööstuse jaoks mõeldud komponente, mille elektrilised ühendused on tavakomponentide ühendustest elastsemad. Samuti on projekteerimisel arvestatud mehaanikakomponentide

vastupidavusega, sest võistlussarja reeglite järgi peavad detailid vastu pidama auto püsttelgsuunalisele kiirendusele 100 m/s^2 [5].

Niiskuse eest kaitsmine ei ole esmatähtis, sest monokoki ja akukasti sisemus peaks olema üleliigse niiskuse eest kaitstud. Teatud määral kaitseb elektroonikaplaate niiskuse eest lakk, millega need kaetakse [8].

3.2 Mõõtmiste määramatus ja sagedus

Akuhaldussüsteem peab mõõtma kolme parameetrit: akuelementide pinget ja temperatuuri ning akuelemente läbivat voolu [2].

Selleks, et akuhaldussüsteemi kasutatavad algoritmid saaksid toimida efektiivselt, peavad pingenäidud ja voolunäit olema piisavalt täpsed. Piisavat täpsust on eelkõige vaja SOC arvutamisel, kuid see on oluline ka balansseerimisalgoritmide efektiivsemaks implementeerimiseks. Mõõtemääramatus peab olema 1% piires, et tagada algoritmide efektiivne toimimine. ADC-de täpsuse määrab eelkõige referentspinge täpsus, mida mõjutab temperatuur, niiskus, vibratsioon ning montaažil tekkivad pinged.

Pingete mõõtmise sageduse määrab andmevahetuskiiirus ülema ja alama vahel ning ADC-l pingete mõõtmiseks kuluv aeg. Mida suurema sagedusega õnnestub pinget mõõta, seda täpsemini on võimalik akuelementide käitumist analüüsida. Eesmärk oli leida ASIC, mille pingete mõõtmisele kuluv aeg oleks alla 1 ms ning millega saaks otse suhelda andmeedastusprotokolliga, mis võimaldaks kiirust 1Mb/s. Varasemalt käis suhtlus läbi alamal asuva mikrokontrolleri.

Voolu võendussagedus määrab selle, kui täpselt on võimalik arvutada SOC-d. Kuna vool sõltub eelkõige mootorite tarbimisest, siis on eesmärk mõõta sama suure sagedusega, kui antakse mootoritele uusi käsklusi, see on 100 Hz sagedusega.

Akuelementide temperatuuride mõõtetäpsus ei pea olema eriti suur, piisab mõnekraadisest täpsusest, mida tasuks mõõta kord sekundis. Temperatuurinäite on vaja indikatsiooniks selle kohta, kas temperatuur tõuseb, langeb või püsib stabiilsena, et vajaduse korral korrigeerida

auto kasutatavat võimsust. Temperatuuri mõõtetäpsuse määrab eelkõige kasutatavate termistoride täpsusklass.

4. MEHAANIKA

Mehaanika hõlmab kinnituse tegemist akuhaldussüsteemi ülemale ning toetusplaadi tegemist akuelementide ühendusplaatidele. Mõlema detaili puhul tuleb arvesse võtta järgmist:

- ei tohi elektrit juhtida
- peab olema võimalikult kerge
- maksumus ei tohi olla liiga suur

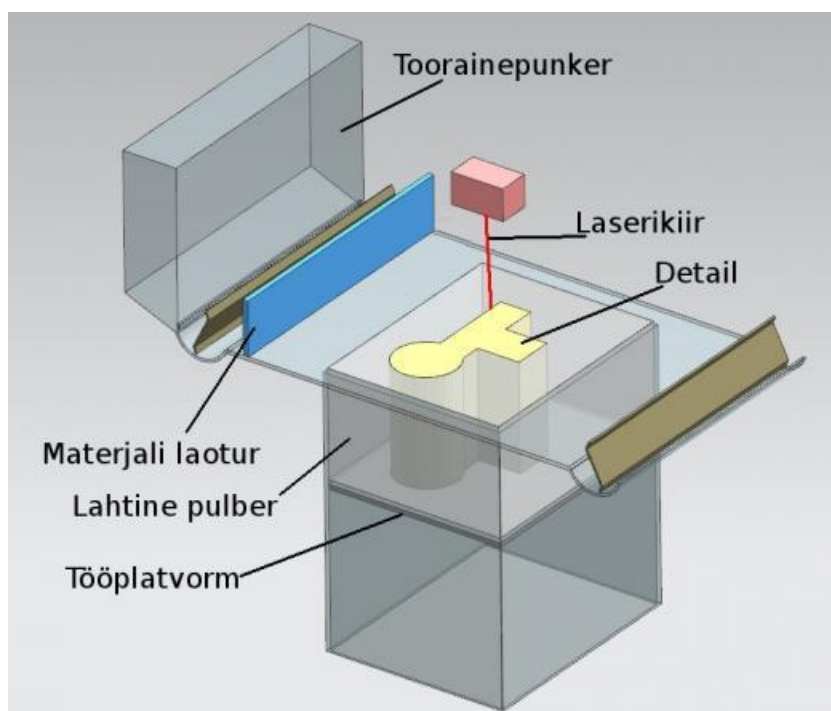
4.1 Materjali ja tootmistehnoloogia valik

Enne disaini alustamist oli teada, et materjal ei tohi olla elektrit juhtiv, sest vastasel juhul tekiks akumoodulis või trükkplaatidel lühis. See asjaolu välistas metallid ja süsinikkomposiitmaterjalid ning odavate valikuna tulid kõne alla plastpolümeerid.

Projekteerimise käigus oli näha, et detailide geomeetria on piisavalt keeruline, et väikeseeriatootmise puhul on mõistlik lahendus ekstruuderpeaga 3D-printimine või laserpaagutamine. Eesmärk saada võimalikult tugev konstruktsioon, välistas ekstruuderpeaga printimise, sest kiudude orientatsiooni tõttu ei talu detail mõlemas suunas sama palju jõudusid. Valitud meetodiks jäi laserpaagutus, mis annab head tugevusomadused ning võimaldab printida geomeetriselt väga keerukaid detaile [9]. Lisaks on meeskond varasematel hooaegadel kasutanud hulgaliselt laserpaagutatud detaile ning tehnoloogia võimalustega ollakse tuttavad.

Tabel 4.1. Laserpaagutatava materjali omadused (Nylon12) [10]

Omadus	Väärtus
Tõmbetugevus	46 MPa
Katkevenivus	15%
Temperatuuritaluvus	177 °C
Tihedus	0,95 g/cm ³



Sele 4.1. Laserpaagutuse (i.k. *Selective Laser Sintering*) tööpõhimõtte skeem [11]

4.2 Akuelementide ühendusplaatide toetusplaat

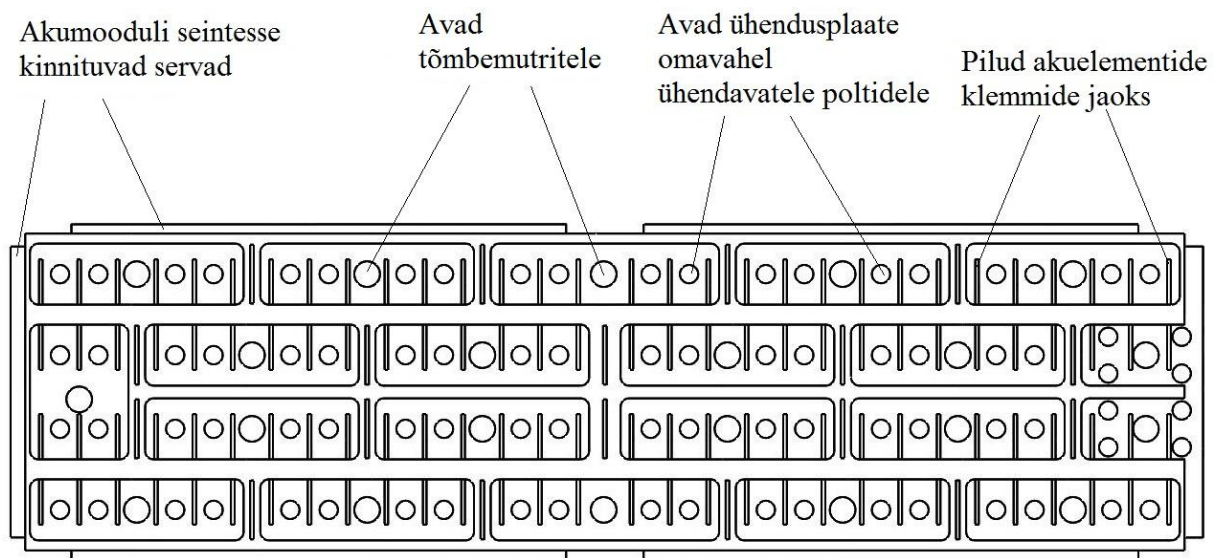
Akuelementide ühendusplaatide toetusplaadi ülesanne on toestada ühendusplaatide, mille abil ühendatakse akuelementide klemme. Toestamise vajadus tuleneb sellest, et on vaja tagada võimalikult ühtlane tasapind, sest ühendusplaatidele on distantspunkside abil kinnitatud trükkplaadid. Kõrguse ebaühtlust oleks lihtne korrigeerida seibide abil, kuid hea elektrilise kontakti saamiseks keeratakse need kõvasti kinni ning kui ühendusplaadid ei ole horisontaalsihis samas tasapinnas, siis see tekitab ühendamisel trükkplaadis pingeid, mis võivad lõhkuda trükkplaati ennast või põhjustada komponentide trükkplaadilt lahtimurdumise. Lisaks toestamisele on vaja tagada elektriline isolatsioon ühendusplaatide vahel, mille tagab nii toetusplaadi materjal, piisav distant ühendusplaatide vahel kui ka korrektne montaaž. Toetusplaadi paiknemine akumoodulis on näha lisas 5.

4.2.1 Disain

Disaini alustades tuli koostööd teha ülejäänud akumooduli projekteerijaga, sest toetusplaadi disain sõltus akuelementide ühendusplaatidest. Kui ühendusplaatide suurused ja asukohad olid kindlaks tehtud, siis oli näha, et vahe on väiksem kui eelmisel hooajal, kuid siiski piisav. Ühendusplaatide minimaalne kaugus teineteisest on 4 mm. Toetusplaadile tuli teha pilud,

kust akuelementide klemmid läbi mahuksid ning avad, kust mahuksid läbi ühendusplaate omavahel ühendavad poldid ja tõmbemutrid.

Elektrilise isolatsiooni tagamiseks on ühendusplaadid paigutatud süvenditesse. Suurim oht elektrilöögi tekkimiseks on akumoodulite monteerimise ajal, mil tuleb hoolikalt järgida töö- ja ohutusnõudeid.



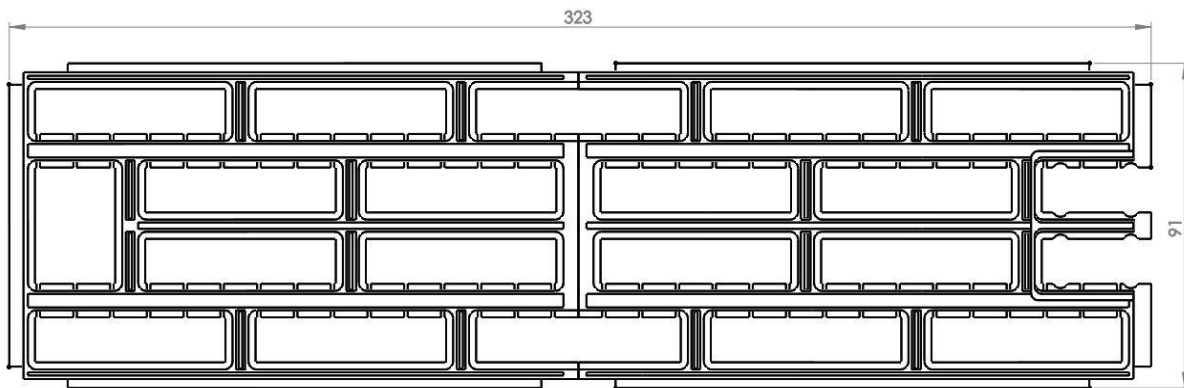
Sele 4.2. Esialgne toetusplaadi disain

Kui esialgne toetusplaadi disain oli valminud, siis tuli optimeerida selle kaalu. Selleks on vähendatud põhja paksust, pandud ühendusplaadid toetuma ainult servadele ning tehtud süvendeid sinna, kus seinapaksus seda võimaldas. Minimaalseks seinapaksuseks jäi 0,8 mm. Tootmiseseadmega on edukalt võimalik toota ka 0,5 mm paksust seina [9]. Lisas 8 on näha toetusplaadis tekkivaid pingeid, kui ühendusplaatide tasapinnas mõjub jõud 40 N.

Selgus, et detail on laserpaagutusseadme jaoks liiga suur, mistõttu tuli detail teha kaheks osaks, mida saab hiljem tappliite abil kinnitada. Tappliitega toetusplaadi kahte poolt on näha lisas 4.

Toetusplaadi projekteerimisel tuli jälgida, et konstruktsiooni ei optimeeritaks nii palju, et see ei peaks vibratsioonile enam vastu. Liikumise minimeerimiseks kinnitub konstruktsioon igal küljel paiknevate ribadega tappliitena akumooduli seintes olevatesse piludesse. Samuti on toetusplaadi kahe poole vaheline tappliite liikumise minimeerimiseks väikese lõtkuga.

Detaili maksimaalne temperatuur jääb samasse vahemikku akuelementide maksimaalse lubatud temperatuuriga, milleks on 60 °C. Probleemid võivad tekkida, kui ühendusplaatide abil ei õnnestu tagada piisavalt kontakti ning hakkab eralduma soojust, mis võib tõsta temperatuuri normaalist kõrgemale. Ebapiisava kontakti mõju on näha akuhaldussüsteemile, mis suudab ebanormaalse käitumise avastada ning elektrivormeli turvaahelate abil välja lülitada. Selle lühikese aja jooksul ei tõuse temperatuur kõrgemale, kui materjal on suuteline taluma.



Sele 4.3. Lõpliku toetusplaadi koost

4.3 Akuhaldussüsteemi ülema kinnitus

Akuhaldussüsteemi ülema asukoha määras elektrivormelis kõrgepingejuhtmete asukoht, sest ülemal asub vooluandur, millest peab kõrgepinge juhe läbi minema, et oleks võimalik Halli efekti abil voolu mõõta. Samuti peab akuhaldussüsteemi ülem asuma kindlasti akukastis. Akukasti peab saama vormelist välja võtta selliselt, et akuhaldussüsteem oleks endiselt töövõimeline, kuid see ei oleks akuhaldussüsteemi ülemata võimalik. Akukastis asub elektroonikasektsioon, kus asub peale akuhaldussüsteemi ülema veel elektroonikaplaate ning kõrgepingeahela komponendid. Selles sektsioonis oli akuhaldussüsteemi ülema jaoks kõige sobivam koht ühe AIR-i kohal ning selleks oli vaja projekteerida kinnitus, mille abil saaks akuhaldussüsteemi ülemat kinnitada akukasti seina küljes paiknevate poltide külge. Akuhaldussüsteemi ülema paiknemine akukasti elektroonikasektsioonis on näha lisis 3.

4.3.1 Disain

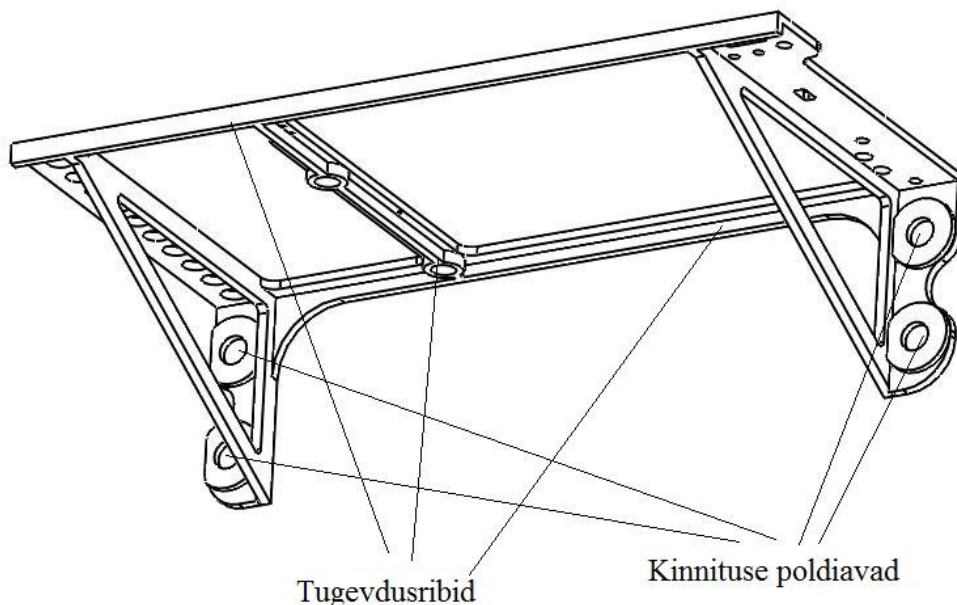
Akusüsteemi ülema kinnituse disainimisel tuli jälgida trükkplaadi disaini, sest oluline oli veenduda selles, et trükkplaadi alumisel poolel paiknevate komponentide jaoks oleks ruumi.

Trükkplaadile ei olnud vaja projekteerida eraldi kinnitusavasid, sest oli võimalik ära kasutada vooluanduri ja pistikute kinnitusavasid, mis võimaldas omakorda vähendada trükkplaadi mõõtmeid.

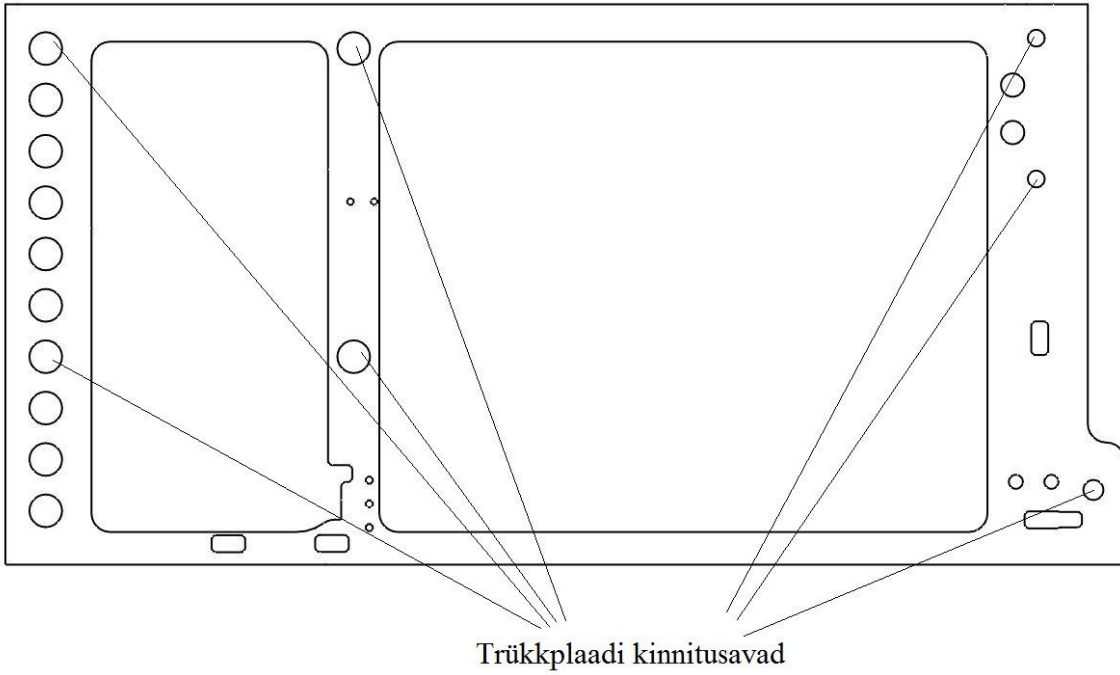
Selleks, et tagada detaili piisav jäikus, sai detail fikseeritud neljast punktist. Kui detail peaks liigselt läbi painduma, siis see võib kahjustada trükkplaati või trükkplaadil paiknevaid komponente. Seetõttu on jäikuse tagamiseks alumisele küljele lisatud tugevdusribid. Lisas 7 on näha kinnituses tekkivaid pingeid, kui pealmiselt poolt mõjub jõud 15 N.

Kuigi ülema kinnitus on väike detail ning kaalub võrdlemisi vähe, on selle kaal optimeeritud, sest üleliigse materjali eemaldamisega väheneb kogu vormeli kaal, mis on kriitilise tähtsusega. Tootmistehnoloogia võimaldab detaili valmistada küllaltki keeruka kujuga, ilma et see avaldaks toote hinnale liigset mõju.

Temperatuuri või niiskuse osas ei pidanud eritingimustega arvestama, sest kinnitus asub akukasti elektroonikasektsioonis, kuhu liigne niiskus ei pääse ning mille temperatuur on samal tasemel väliskeskkonna temperatuuriga.



Sele 4.4. Akuhaldussüsteemi ülema kinnituse poldiavad ning tugevdusribid



Sele 4.5. Akuhaldussüsteemi ülema kinnituse pealtvaade

5. ELEKTROONIKA

Elektroonikas oli ülesandeks välja arendada uus ülema-alama topoloogial põhinev akuhaldussüsteem. Alamatel asub jälgimis- ja balansseerimissüsteem, mis suhtleb ülemaga. Ülemal asub süsteem, mis võtab vastu otsuseid selle kohta, mida alamad peavad täitma ning olema infovahetuses ülejäänud masinaga.

5.1 Akuhaldussüsteemi ülem

Akuhaldussüsteemi keskne komponent on mikrokontroller, mis on ühenduses järgnevate komponentidega:

- isoleeritud SPI kommunikatsiooniliidesega
- välmälukiibiga (*flash memory chip*)
- CAN-transiiveriga

Lisaks paikneb trükkplaadil akuelementidest võetava voolu mõõtmiseks vooluandur koos mõõteahelaga ja pingeregulaatorid. Akuhaldussüsteemi ülema elektroonikakomponentide loetelu on esitatud lisan 21.

5.1.1 Komponentide valik

Mikrokontrolleri valikul on arvestatud varasemat meeskonna kogemust. Eelmisel aastal kasutasime mikrokontrollerite seeriat STM32 F3, kuid see aasta otsustasime kasutusele võtta STM32 F4-seeria, sest sellel on olemas välmälu kontroller, mis on oluline logimisvõimekuse suurendamiseks. Nende kahe seeria erinevus ei ole aga eriti suur ning väikeste modifikatsioonidega saame STM32 F4 peal kasutada eelmisel aastal välja arendatud teek. Kõigil vormeli isearendatud trükkplaatidel olevad mikrokontrollerid on STM32 F4-seeriast, sest see võimaldab teekide jagamist, mis vähendab märkimisväärselt arenduseks kuluvat aega. Valitud 100 väljaviiguga STM32 F427VIT6 oli üks odavamaid ja kättesaadavamaid mudeleid, millel olid vajaminevad liidesed. Vähemate väljaviikude arvuga STM32 F4-seeria mudelitel puudub välmälu kontroller, mis oli peamine otsustav tegur, sest ülejäänud liidesed eksisteerivad peaaegu kõigil STM32 F4-seeria mudelitel. Korpus valiti LQFP-tüüpi, mida on käsitsi lihtsam joota kui teisena valikus olnud UFBGAd.

STM32 F427VIT6 peamised karakteristikud [12]

- Arhitektuur ARM Cortex-M4

- Maksimaalne taktsagedus 180 MHz
- Liidesed CAN, I2C, SPI, UART, USART, USB
- Korpuse tüüp LQFP
- Maksimaalne I/O viikude arv 82
- Viikude arv 100
- Välmälu 2 MB
- RAM mälu 256 kB
- Toitepinge 1,8 V - 3,6 V

CAN-transiiveriks on valitud MCP2551, mille kasuks rääkisid selle populaarsus ja odavus. Sama transiiverit on vormelautodel ka varem kasutatud ning selle töökindluses on veendunud. MCP2551 on 5 V toite pealt töötav CAN-transiiver, ka vormeli ülejäänud seadmed kasutavad 5 V peal töötavaid CAN-transiivereid. Ühesuguste potentsiaalidega transiiverite kasutamine aitab vältida potentsiaalide erinevusest tingitud müra. Samas on 5 V CAN-transiiverite kasutamine suuresti pärand ning tulevikus võiks kasutada rohkem 3,3 V peal töötavaid transiivereid, mille puhul on potentsiaalide erinevusest tekkivad probleemid minimiseeritud. Lisaks tarbivad 3,3 V peal töötavad transiiverid vähem energiat ning tihtipeale on vaja 5 V peal töötavate transiiverite jaoks teha eraldi 5 V toide, mis tõstab toote hinda ja keerukust.

MCP2551 peamised karakteristikud [13]

- Võimaldatav andmevahetuskiirus 1 Mb/s
- Toitepinge 5 V
- Korpuse tüüp SOIC

Vooluanduri valikul pidi kõigepealt arvutama välja maksimaalse voolu, mida on vaja mõõta. Selleks tuli arvutada minimaalne akupinge. Akupakis on 140 rööpahelat jadamisi ning iga rööpahela minimaalne pinge on 3 V, mis teeb akupaki teoreetiliseks lubatavaks miinimumpingeks 420 V. Vormeli energiatarbest moodustab enamiku neljale elektrimootorile kuluv energiahulk, mootoritest on igaüks võimeline arendama 35 kW, kuid reeglitega on vormeli tarbitav koguvõimsus piiratud 80 kW-le. Seega on maksimaalse voolu leidmine lihtne, sest $I = N/U$, mis teeb maksimaalseks vooluks ligikaudu 190,5 A. Samas tuleb arvestada seda, et tarbimises võib esineda piike ning testimisfaasis võib olla probleeme auto

võimsuse piiramisega 80 kW-le. Vooluanduri tüübiks on valitud Halli efektil põhinev vooluandur, mida on saadaval ka valmiskujul, mistõttu on seda süsteemi integreerida palju lihtsam kui šunti[20]. Vooluandurite valikut uurides olid lähimad sobilikud maksimaalsed mõõtepiirkonnad -200...200 A ning -300...300 A. Arvestades tekkida võivaid piike, on mõõtepiirkonnaks valitud -300...300 A. Järgmiseks tuli arvestada vooluanduri disainiga, andurit peab olema võimalikult lihtne trükkplaadile kinnitada ning selle primaarne voolupiirkond peab jääma vahemikku -200...200 A. Sobivaks vooluanduriks osutus LEMi HTFS 200-P.

Vooluanduri peamised karakteristikud [14]

- Vasteaeg 7 μ s
- Mõõtevahemik -300...300 A
- Täpsus 1%
- Toitepinge 5 V

Isoleeritud SPI moodul LT6820 on valitud lähtuvalt sellest, et see oleks ühenduv alamal kasutatavate kiipidega. Isoleeritud SPI sai valitud suhtlusprotokolliks ülema ja alamate vahel, sest mõõtefunktsiooniga ASICutega toimub suhtlus kas läbi SPI või isoleeritud SPI. Mõõtefunktsiooniga ASICutest edastatakse suhtlus balansseerimisfunktsiooniga ASICutesse. Isoleeritud SPI abil on võimalik luua süsteem, kus ülemaal paiknev mikrokontroller juhib otse kõikide alamate tööd. LT6820 funktsioon on teha mikrokontrollerist tulev SPI signaal isoleeritud SPI signaaliks ning vastupidi [15].

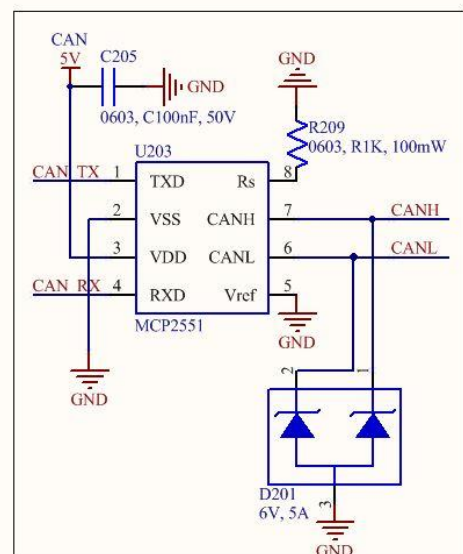
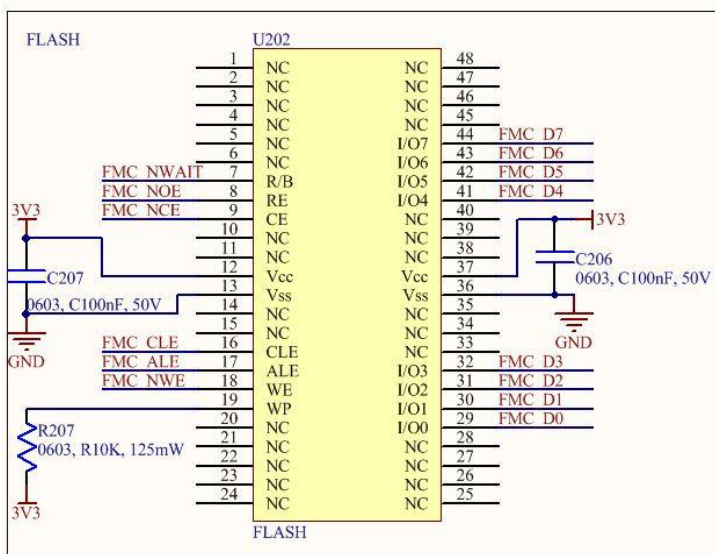
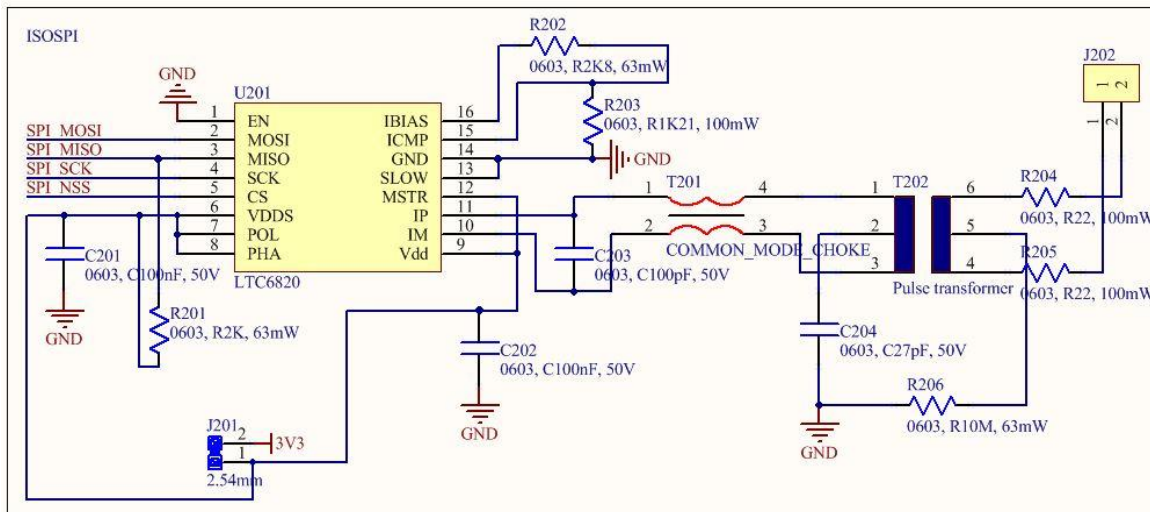
5.1.2 Skeem

Akuhaldussüsteemi skeemid on koostatud programmiga Altium Designer. Akuhaldussüsteemi ülema skeem on jaotatud neljaks: mikrokontroller ning selle juurde käivad ühendused, kommunikatsiooniskeemid ning välgmälu, toiteskeemid ning ühendused ülejäänud vormeliga, vooluandur ning mõõteahel.

Mikrokontrolleri ploki skeemil, mis on näha lisas 9, on mikrokontrolleri ümber näha toitesilumise kondensaatoreid. Alt vasakult paremale on näha SWD-ühendusi, mis on mõeldud programmeerimiseks, järgmisena tuleb ostsillaatori skeem, mis annab

mikrokontrollerile välise 8 MHz-se taktsageduse, järgmisena skeem mikrokontrolleri manuaalseks, nupuvajutusega taaskäivitamiseks ning viimasena UART-ühendused, mis on samuti mõeldud programmeerimiseks [12]. Lisas 10 on näha mikrokontrolleri poolt lülitatavaid veaolukordadest teada andvaid LEDE.

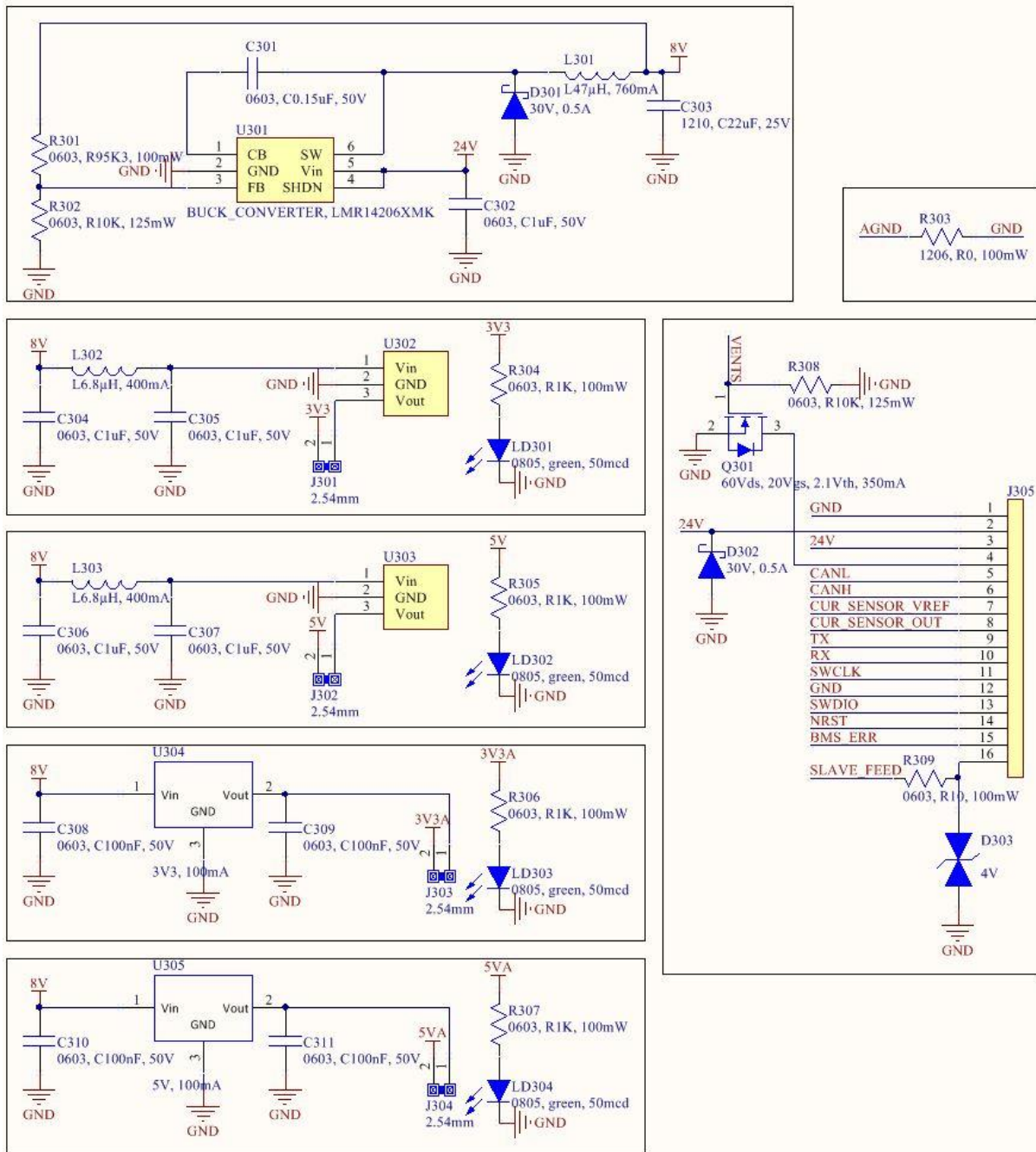
Välkmälu- ja kommunikatsiooniskeemil on all vasakul välkmälu osa, kus on näha kahte kondensaatorit, mis on mõeldud toite silumiseks, ning ühte takistit, mis on WP-pini *pullup*-takisti. See on vajalik selleks, et mälusse saaks kirjutada, kui toide on sisse lülitatud. All paremal on näha CAN-transiiveri skeem, millel on toite silumiseks üks kondensaator, Rs-pinile on lisatud takisti, mis määrab CAN-signaali tõusukiiruse. Lisaks on CANH ning CANL signaalidele lisatud TVS-diodid. See löikab ära piigid, mis võivad tekkida näiteks juhtmete ühendamisel. Skeemi ülemises osas on ühendused LT6820 kiibiga, mis teeb SPI-signaalist isoSPI-signaali ning vastupidi. Kiibi toitele on lisatud kondensaatorid C201 ning C202, mis on mõeldud toite silumiseks. Toitega on ühendatud ka POL- ja PHA-väljaviigid, et SPI oleks korrektselt seadistatud. Samuti on toitega seotud ka MSTR-viik, mis määrab selle, et tegu on siini ülemaga. MISO-viigule on pandud väline *pullup*-takisti, sest see viik on *open drain*. Takistite R202 ja R203 abil määratakse vahetegur kommunikatsiooni robustsuse ja voolutarbe vahel. Nende kahe takisti väärtuse muutmine võimaldab muuta seda, kui suurte amplituudide korral registreeritakse signaaliimpulss, kuid sellest sõltub omakorda LT6820 voolutarve. C203 on mõeldud terminaatoriks LT6820 juurde. T201 on induktiivpool, mis filtreerib välja kõrged sagedused. Kondensaator C204 summutab *common mode*-signaale. Kondensaator C204 on *biased* takistiga R206, mis aitab signaale summutada. T202 on pulsitransformaator, mis tagab dielektrilise isolatsiooni. Takistid R204 ja R205 on lisatud selleks, et lahti saada parasiitmahtuvuse mõjust isoleeritud SPI-siinil. [13], [15], [16], [17]



Sele 5.1. Väikmälu- ja kommunikatsiooniskeem

Toiteskeemid ja ühendused ülejäänud vormeliga on jagatud kaheks: vasakul asuvad toiteskeemid ning paremal ühendused. Kõrgepingest, mis on vahemikus 420...588 V, teeb vormeli toiteplokk madalpinge, mis on 24 V, mis on ka selle plaadi sisendpinge. Kuna analoogahelate jaoks on vaja võimalikult väikese müraga toidet, siis on analoogtoite jaoks valitud lineaarregulaatorid, sest nende tekitatav müra on väiksem kui lülitusregulaatoritel. Lineaarregulaatorite efektiivsus on seda suurem, mida väiksem on sisend- ja väljundpinge vahe. Kuna analoogtoidet on vaja tekitada 5 ja 3,3 V, siis oli tarvis tekitada ka madalamat pinget kui 24 V, millest teha sisendpinge lineaarregulaatoritele [18]. Selleks on valitud Buck-konverter U301, mis teeb 24 V-st 8 V. Sellist väljundpinget kasutavad ka lülitusregulaatorid, mis teevad digitaalahelatele 5 V ning 3,3 V toite. Pingeregulaatorite juurde kuuluvad

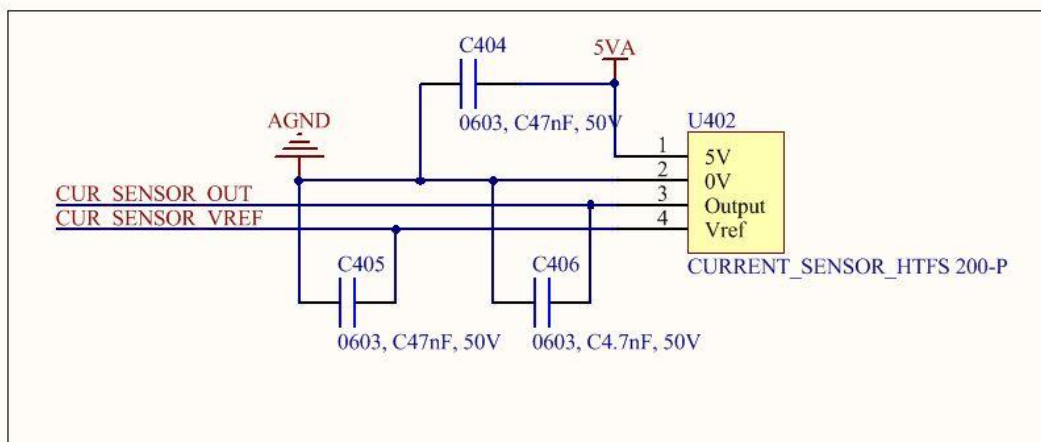
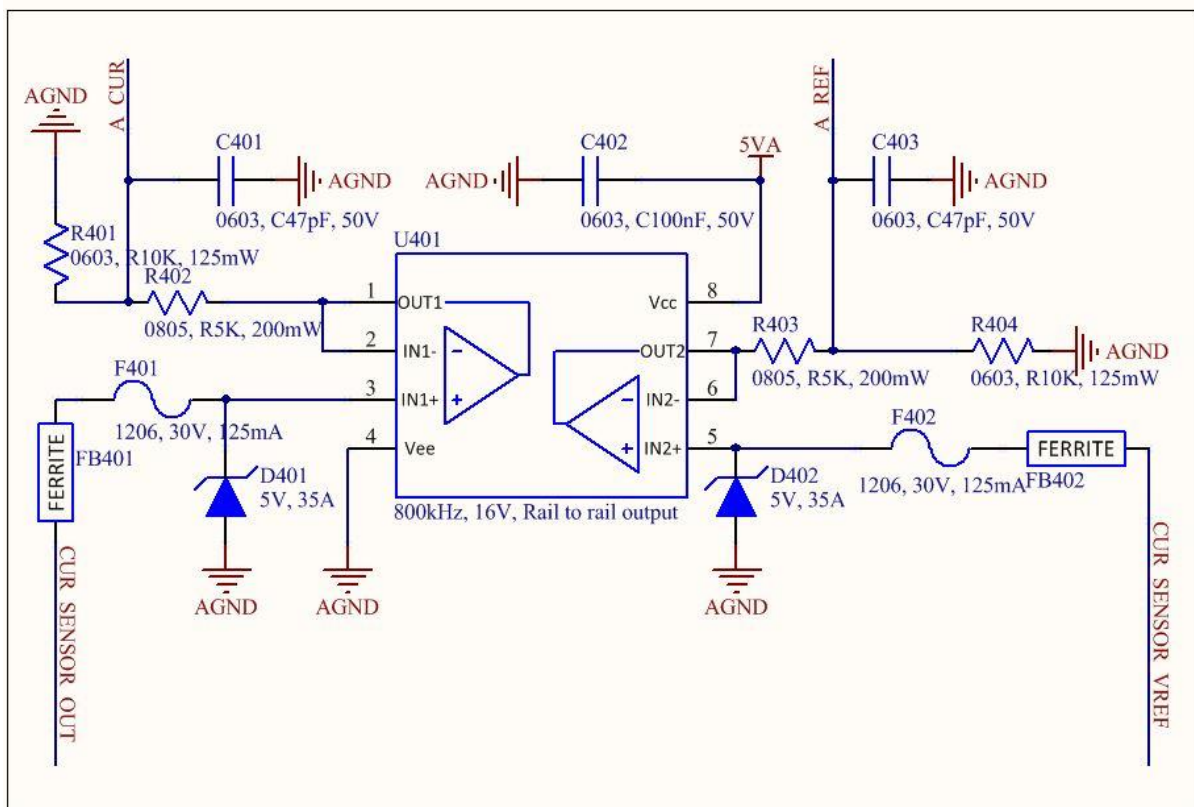
komponendid on valitud andmelehtedes soovitud põhjal. Pingeregulaatorite U302, U303, U304 ja U305 väljundpinge on fikseeritud, kuid pingeregulaatori U301 väljundpinge on reguleeritav takistite R301 ja R302 abil. Lisaks pingeregulaatorite skeemidele on paremal näha ühendusi vormeli ülejäänud süsteemidega. Signaal „VENTS” on mõeldud selleks, et MOSFETi abil sisse lülitada akude jahutamiseks mõeldud ventilaatorid. Sissetulevale 24 V toitepingele on pandud kaitsediiodiks Schottky diod D302. Lisaks on näha CANi ühendused, vooluanduri väljundid, mida mõõdab lisaks akuhaldussüsteemi ülemale ka ECU, samuti mitmed väljundid programmeerimise tarbeks. Signaal „BMS_ERR” läheb auto turvaahelatesse, mis lülitab auto välja juhul, kui detekteeritakse mõni ohtlik viga, milleks üks on akuhaldussüsteemi viga. „SLAVE_FEED” on signaal, mis akuhaldussüsteemi alamatel paiknevate optoisolaatorite abil lülitab sisse akuhaldussüsteemi alamate toite. Viimati nimetatud signaalile on lisatud kahesuunaline TVS-diod D303, et maha suruda indutseeritud pingepiigid. [19], [21], [22]



Sele 5.2. Toite-ja ühendusskeemid

Vooluanduri ja mõõteahela skeemi alumises osas on näha vooluanduri U402 ühendusskeem, kuhu on vooluanduri andmelehe soovitusi järgides ühendatud kolm kondensaatorit. Vooluanduril mõõdetakse nii väljund- kui ka referentspinget, mille abil saab arvutada välja vooluanduri ava läbiva juhtme voolu. Ülemises osas on näha operatsioonivõimendit kasutava mõõteahela skeemi. Et mõõteahel ei koorma sensoreid, on sealt saadav näit korrektne. Sellist skeemi kutsutakse *voltage follower* või *unity buffer amplifier*. Skeemis on kasutusel ferriidid

FB401 ja FB402, mis summutavad kõrgsageduslikku müra. Ohutuse tagamiseks on lisatud ka sulavkaitsmed F401 ja F402 juhuks, kui vool peaks ootamatult kasvama, ning lisatud on ka TVS-dioodid piikide äralõikamiseks. Operatsioonivõimendite toitele on lisatud toite silumiseks kondensaator C402. Takistid R401 ja R402 ning R403 ja R404 moodustavad pingejagurid, et teha 5 V pingevahemikust 3,3 V pingevahemik, mille signaal läheb mikrokontrolleri ADC sisendisse. Lisatud on ka kondensaatorid C401 ja C403 lisafiltreerimiseks. [14], [23]



Sele 5.3. Vooluanduri ja mõõteahela skeem

5.1.3 Trükkplaadi disain

Trükkplaadi disainimisel oli ülesanne teha võimalikult väike trükkplaat, kuid tuli arvestada ka muude piirangutega. Kuna vooluandurist läheb läbi kõrgepingejuhe, siis reeglite kohaselt ei tohi sellele lähemal kui 12 mm olla madalpingeahela osi [5].

Pistikud saime tasuta firmalt Phoenix Contact, mis valmistab kvaliteetseid pistikuid autotööstusele. Saadud pistikud olid vajalikust kõvasti suuremad ning see suurendas trükkplaadi mõõtmeid. Trükkplaadi ülemisele poolele oli mõistlik paigutada rasked komponendid, programmeerimispistikud, LEDid ning RESET nupp. Samuti ei andnud erilist ruumivõitu mikrokontrolleri, kommunikatsioonikomponentide ning väikmälu paigutamine alumisele poolele, mistõttu on need paigutatud pealmisele poole, et oleks lihtsam arendusfaasis *debug*'ida. Pistikute ja vooluanduri ühenduspunktid toimivad ühtlasi trükkplaadi kinnitustena, mis aitab säästa ruumi. Kuigi rajad oleks olnud võimalik vedada ka kahekihilisele plaadile, on plaat neljakihiline nagu ka kõik ülejäänud plaadid, sest oli odavam tellida kõik plaadid neljakihilisena. See tegi ka plaadi radade marsruutimise mõnevõrra lihtsamaks. Pealmisel kihil tuli samuti arvestada sellega, et pulsitransformaatori alune, selle ühendus pistikuga ning LT6820-ni minevad IP- ja IM-rajad oli soovituslik vabastada vasepolügonidest [15], [16]. Disaini puhul on veel märgata mitmeid kaheseid *pin header*'eid, millel olevate *jumper*'ite abil saab testimisjärgus vajaduse korral ahelatelt toidet ära võtta. Disaini 3D-vaadet on näha lisas 11 ning trükkplaadi kihid on esitatud lisades 13,14,15 ja 16.

5.2 Akuhaldussüsteemi alam

Kuna akuhaldussüsteemi alama trükkplaadi suurus sõltub akumooduli mõõtmetest, sest see asub mooduli akuelementide kohal, siis on aktiivbalansseerimisahelate mahutamiseks ruumi vähe. Akuhaldussüsteemi alamal on kahe funktsiooniga ASICuid, millest ühed on mõõtefunktsiooniga LTC6804-2 ning teised aktiivbalansseerimisfunktsiooniga LTC3300-1. Ruumi aitas säästa see, et vabanesime varem igal plaadil olnud mikrokontrollerist. Lisaks ruumivõidule annab mikrokontrollerist vabanemine ajavõitu ka arendusprotsessis, sest varem oli vaja programmimuutuse korral ümber programmeerida igal moodulil asuv mikrokontroller ning see oli ajakulukas protsess. Akuhaldussüsteemi alamal kasutatud elektroonikakomponentide loetelu on esitatud lisas 22.

5.2.1 Komponentide valik

Aktiivbalansseerimisfunktsiooniga ASIC LTC3300-1 osutus valituks eelkõige selle tõttu, et see oli ainus vabalt kättesaadav ASIC, mille abil oli võimalik hõlpsa vaevaga luua *stackable* arhitektuur. Samuti oli selle abil realiseeritav balansseerimisarhitektuur kahesuunaline ehk akuelemente sai nii laadida kui ka tühjaks laadida. Lisaks oli see hõlpsa vaevaga integreeritav LTC680x-seeria ASICutega, millest ühte, LTC6803-4 olime kasutanud varasemal akuhaldussüsteemi alamal. LTC3300-1 balansseerimise efektiivsus on kuni 92% ning balansseerimisvoolud on kuni 10A. Aktiivbalansseerimisarhitektuur, mida rakendab LTC3300-1, on *flyback converter*. See ei ole aktiivbalansseerimisarhitektuuridest kõige kiirem ega ka kõige efektiivsem, kuid selle kasutuselevõtt ASICu abil on suhteliselt lihtne. LTC3300-1-l on ka mehhanisme, mis käivituvad mitmesuguste vigade korral [7]:

- kui kaob ühendus mõne rööpahelaga, mille pinge on LTC3300-1 sisendiks, siis katkestatakse balansseerimine;
- kui kaob ühendus transformaatori sekundaarmähisega, siis detekteeritakse ülepinge teisel mähisel ning katkestatakse balansseerimine;
- kui voolu mõõtmise takistid lähevad lühisesse primaar- või sekundaarmähise poolel, siis lülitatakse MOSFETid välja vastavalt ajalimiidile, mis on programmeeritud vastavate takistite abil;
- kui kaob andmeside, siis lõpetavad balansseerimise kõik LTC3300-1-d, milleni andmeside ei jõua;
- kui andmeedastuses on viga ehk CRC jääk ei ole null, siis lülitatakse balansseerimisfunktsioon välja.

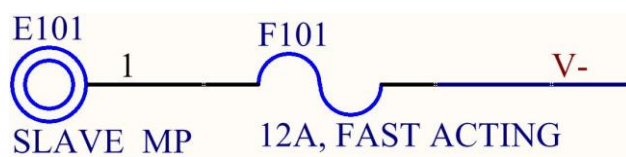
Mõõtefunktsiooniga ASIC LTC6804-2 kasuks rääkis eelkõige, et sellele mudelile oli lisatud isoleeritud SPI-liides, mis puudus vanematel mudelitel. Tänu isoleeritud SPI-le oli võimalik vabaneda mikrokontrolleritest, mis varem asusid iga alama peal. Lisaks isoleeritud SPI olemasolule on parandatud ADC pingete mõõtmise aega. Varem kasutusel olnud mudelil LTC6803-4 kulus selleks 13 ms ning uuel mudelil kõigest 290 μ s. Läbi LTC6804-2 suheldakse ka balansseerimisfunktsiooniga ASICutega. Selle tarbeks on ühel LTC6804-2-l kasutusel 3 väljaviiku, mida saaks kasutada ka sensorite pinge mõõtmiseks. Igal LTC6804-2-l on 5 väljaviiku, mille abil saab mõõta sensorite näitu. Kuna ühel moodulil on kaks LTC6804-2, siis see tähendab, et ühel moodulil jääb selle mõõtmiseks 7 väljaviiku, mis on reeglite järgi

minimaalne arv temperatuurisensoreid, mis vastava konfiguratsiooniga akumoodulil peab olema. [24]

5.2.2 Skeem

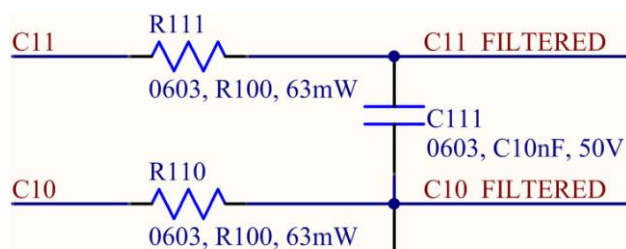
Akuhaldussüsteemi alama skeemide jaotamine alamskeemideks on keerukam kui akuhaldussüsteemi ülema puhul. Suur osa skeemidest on korduvad ning selgituseks piisab ühe osa kirjeldamisest.

Alljärgneval skeemil on näidatud E101 akuklemmide pinge mõõtepunkt, mille juurde on paigutatud sulavkaitse F101. Selliselt on üles ehitatud kõikide mõõtepunktide ühendused.



Sele 5.4. Mõõtepunkt koos sulavkaitsmega

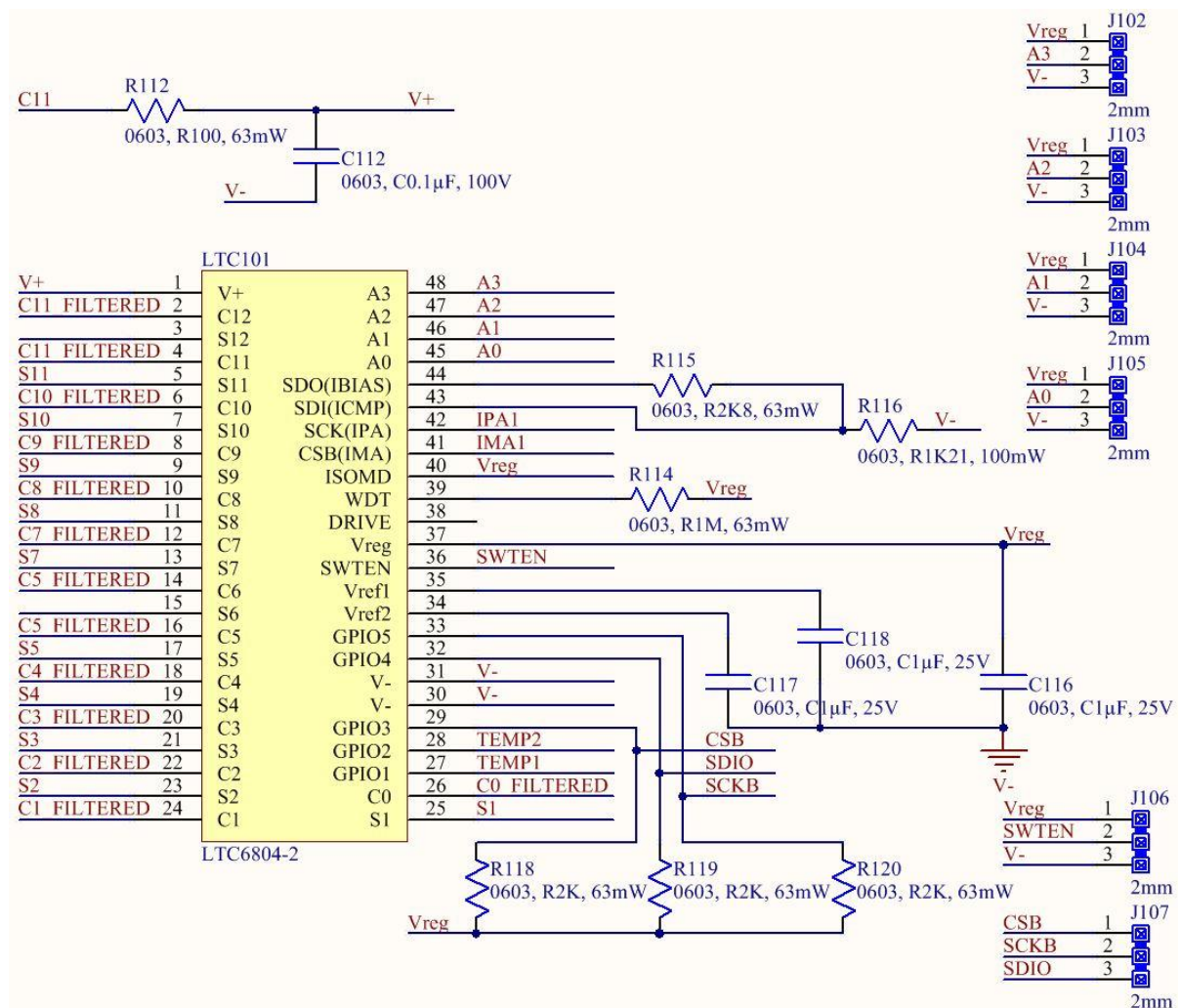
Kõikide mõõtepunktide pinged filtreeritakse läbi RC-filtri enne, kui signaal jõuab LTC6804-2-ni. Alljärgnevalt on näidatud ühe mõõtepunkti RC-filter.



Sele 5.5. Mõõtepunkti pinge filtreerimise RC-filter

Filtreeritud mõõtepunktide pinged lähevad LTC6804-2 väljaviikudesse C0-C11. Kuna LTC6804-2 on mõeldud kuni kaheteistkümne mõõtepunkti jaoks, siis osasse mõõtesisenditesse läheb sama pinge, sest selles süsteemis on kasutusel kümme mõõtesisendit. Väljaviigud S1-S12 on signaalid, mis lülitavad sisse passiivbalansseerimisahelate MOSFET-id. R112 ja C112 moodustavad RC-ahela, mille väljund läheb LTC6804-2 toitesisendisse V+. J102, J103, J104 ja J105 on mõeldud LTC6804-2 aadressi määramiseks isoleeritud SPI-siinil. Nelja biti abil on võimalik defineerida kuni 16 aadressi ning akuhaldussüsteemis on kasutusel 14 aadressi, sest mooduleid on seitse ning igal moodulil on kaks mõõtefunktsiooniga ASICut. CSB, SDIO ja SCKB on madalamal pingepotentsiaalil töötaval LTC6804-2-l olevad kommunikatsioonisignaalid, mis suunduvad kõige madalama pingepotentsiaaliga ASICusse

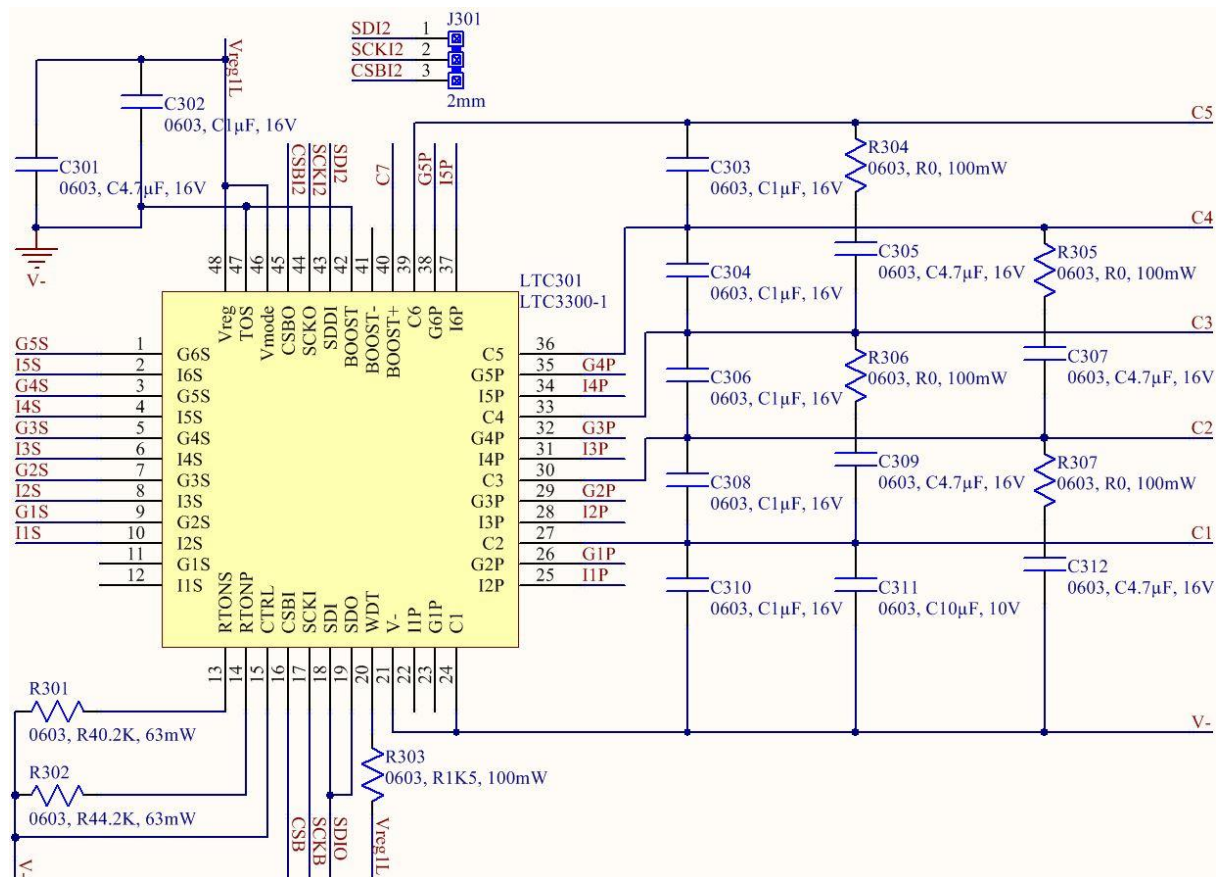
LTC3300-1 Kuna GPIOd on *open drain*-väljundid, siis on vaja neile panna ka väline *pull-up*. Teisel alamal asuval LTC6804-2-l on need GPIOd kasutusel temperatuuride mõõtmiseks. IPA1 ning IMA1 on isoleeritud SPI-sisendid. Takistite R115 ja R116 abil saab konfigurereida tasakaalu kommunikatsiooni robustsuse ja voolutarbe vahel. Signaal „Vreg” on 5 V toide, mille tekitab pingeregulaator. Ülejäänud komponendid on lisatud andmelehel soovitatul põhjal. [24]



Sele 5.6. LTC6804-2 ühenduste skeem

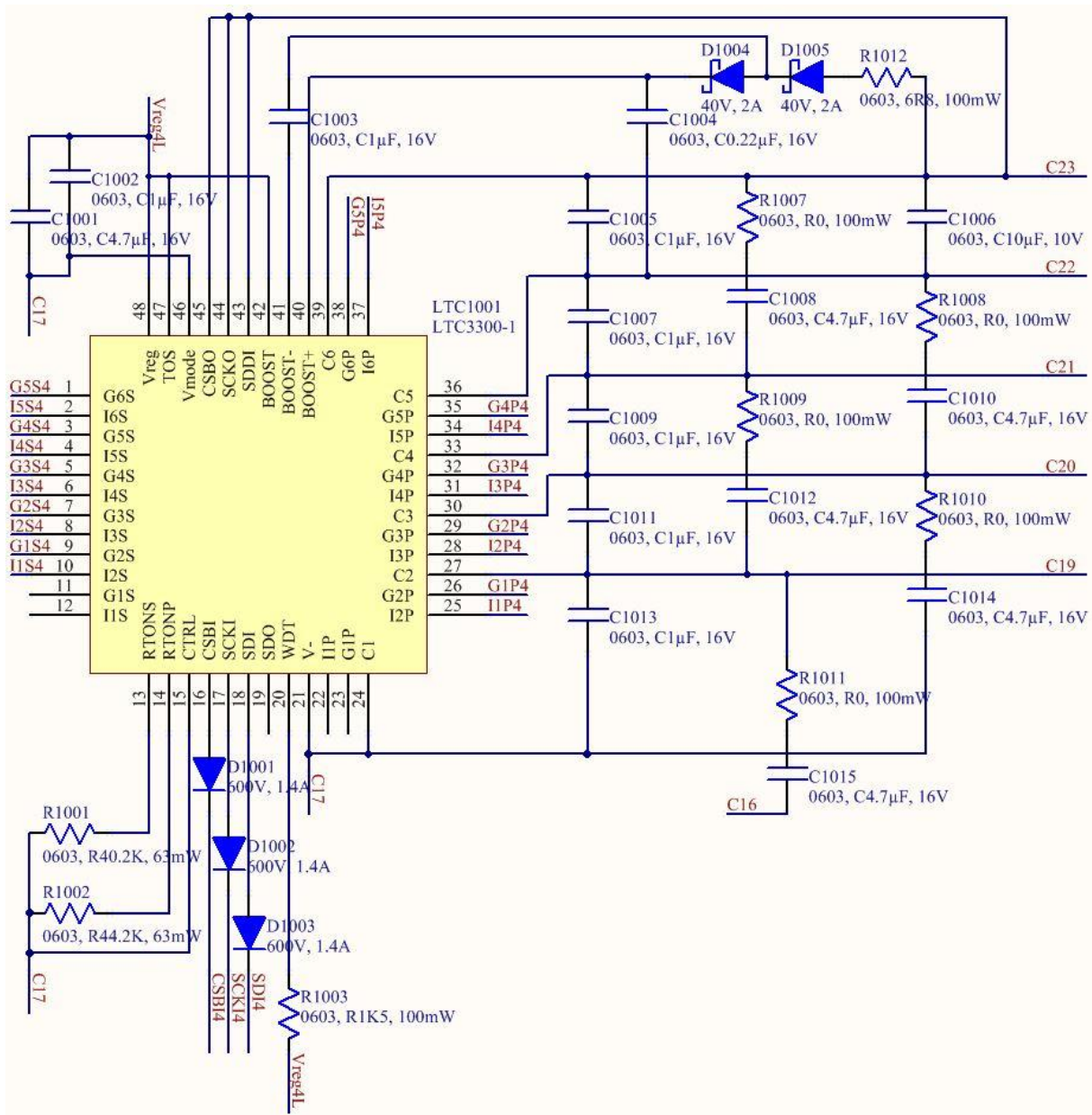
Pingeregulaatori komponendid on valitud LTC6804-2 andmelehes soovitatul põhjal. Ülesanne oli teha 5 V väljundpinge, mida LTC6804-2 kasutab isoleeritud SPI toitenä. Signaal „EN1” lülitab pingeregulaatori sisse. Kui pingeregulaator on välja lülitatud, tarbib see vaid 0,7 μA. Sisse- ja väljalülitamisvõimekus on oluline seetõttu, et kui lülitada välja pingeregulaator, lülitub välja isoleeritud SPI kommunikatsioon, mille peale lähevad mõlemat tüüpi ASICud

transformaatori sekundaarpoolel, ning takisti R302 täidab sama eesmärgi transformatori primaarpoolel. Takistite seatud ajalimiidi mõju rakendub, kui voolumõõtmise takistid lähevad lühisesse ning vajaminevat signaali ei tule. CSB, SCKB ja SDIO on signaalid, mis tulevad ühelt LTC6804-2-lt. LTC3300-1-d on suhtluse jaoks omavahel jadamisi ühendatud ning suhtlus läheb alumisel pingepotentsiaalil olevalt LTC3300-lt edasi ülemisel pingepotentsiaalil asuvale LTC3300-1-le. CSBI2, SCKI2 ja SDI2 on signaalid, mis lähevad edasi järgmisele LTC3300-1-le. Andmelehe soovitus järgi on paigaldatud kondensaatorid C301 ja C302. „Vreg”-väljaviik on 4,8 V pingeväljund, mida on vaja kasutada LTC3300-1 enda seadistamiseks. „WDT”-väljaviigule on ühendatud *pull-up*-takisti, mis tõmmatakse kõrgeks, kui suhtlust pole toimunud 1,5 sekundit ning balansseerimisfunktsioonid lülituvad välja. „TOS”-väljaviigu abil saab seadistada, kas LTC3300-1 asub suhtlusahela lõpus või mitte. LTC3300-1 ei asu skeemil suhtlusahela lõpus ning seega on see seotud sama potentsiaaliga, millega „V-”-väljaviik. Vastasel juhul oleks see seotud potentsiaaliga, mis tuleb „Vreg”-väljaviigust. „BOOST”-väljaviigu abil saab valida, kuidas avatakse kõige kõrgemal pingepotentsiaalil olevat MOSFETit. [7]



Sele 5.9. Kõige madalamal pingepotentsiaalil oleva LTC3300-1 skeem

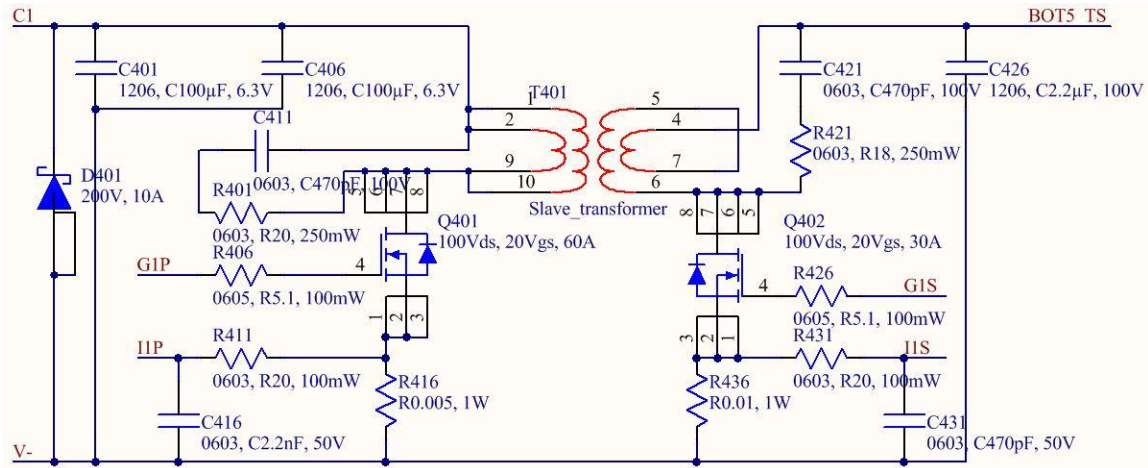
Alljärgneval skeemil on näha ühendused kõige kõrgema pingepotentsiaaliga LTC3300-1 jaoks. DiOODid D1001, D1002 ja D1003 on kommunikatsiooni jaoks alumisel pingepotentsiaalil oleva LTC3300-1-ga. Sellises konfiguratsioonis kasutatakse suhtluse jaoks pigem voolu, mitte pinget. Selleks, et edastada loogika kõrget alumisel pingepotentsiaalil olevalt seadmelt kõrgemal pingepotentsiaalil olevale seadmele, *sink*'ib alumisel pingepotentsiaalil olev seade voolu ülemisel pingepotentsiaalil oleva seadme väljaviigust, ning selleks, et edastada loogika madalat, suurendatakse *sink*'itavat voolu. Selleks, et ülemisel pingepotentsiaalil olev seade saaks edastada loogika kõrget alumisel pingepotentsiaalil olevale seadmele, *source*'ib ülemisel pingepotentsiaalil olev seade rohkem voolu alumisel pingepotentsiaalil olevale seadmele, ning selleks, et edastada loogika madalat, *source*'ib vähem voolu. Lisaks on näha seda, et kuna tegu on kõige kõrgemal pingepotentsiaalil oleva LTC3300-1-ga, siis on vaja kõige kõrgema potentsiaaliga MOSFETite avamiseks *boosted gate drive*'i, mille komponendid on C1003, D1004, D1005, C1004 ja R1012. [7]



Sele 5.10. Kõige kõrgemal pingepotentsiaalil oleva LTC3300-1 skeem

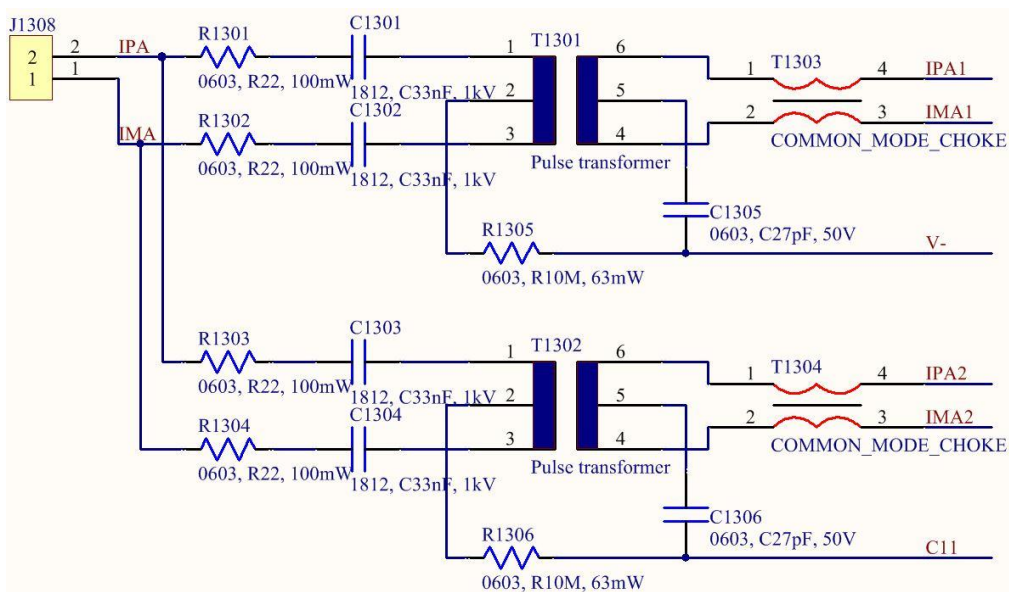
Aktiivbalansseerimisahela komponendid on valitud eelkõige LTC3300-1 andmelehe soovitude ning piirangute põhjal. MOSFETite valikul pidi arvestama nii seda, et nad kannataksid maksimaalset balansseerimisvoolu, kui ka seda, et neelu ja läte vaheline pinge ei ületaks lubatud. Transformaatorite valikuks olid antud parameetrid, mille jaoks LTC3300-1 on optimeeritud. Arvestama pidi seda, et primaar- ja sekundaarmähiste keerdude arv on optimeeritud 1 : 2-le ning samuti oli antud lubatud induktiivsuse vahemik. Tähelepanu tuli pöörata sellele, et MOSFETite *drain*'il ei ületataks pinget, mis tõuseb Faraday seaduse tõttu, kui transformaatori üht poolt läbiv vool katkestatakse MOSFETi abil. Lisaks on vaja lisada

mõlemale transformatori poolele RC *snubber*, mis surub piigid maha. Takistite R416 ja R436 pealt mõõdetakse pingelangu ning nende abil on programmeeritud balansseerimisvoolud. R411 ja C416 ning R431 ja C431 moodustavad RC-filtrid enne, kui pinge jõuab LTC3300-1 mõõtesisendisse. [7]



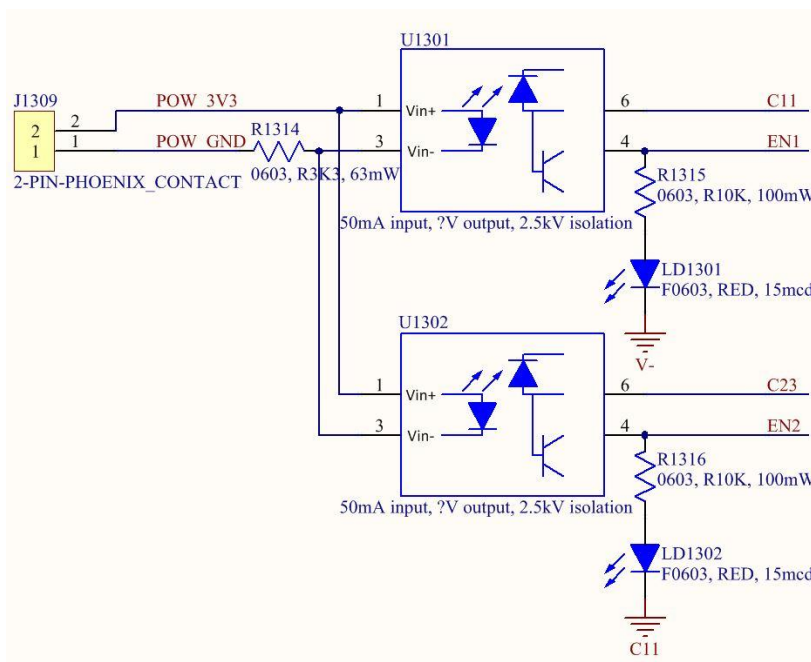
Sele 5.11. Aktiivbalansseerimisahel

Alamal olev isoleeritud SPI-skeem sarnaneb suuresti sellega, mida on näha ülema isoleeritud SPI-skeemil. Erinevus on kondensaatorites C1301, C1302, C1303 ja C1304, mille ülesanne on pakkuda isolatsiooni madal- ja kõrgepinge vahel. Isolatsiooni on võimalik pakkuda ka kõigest transformatoriga. Seda on mõistlik teha umbes 400 V-ni, kuid FEST15 kõrgepinge küündib 588 V-ni. Lahenduseks ongi see, et isolatsioon tekitatakse kondensaatorite abil ning transformatorid tegelevad pulssidega. [16]



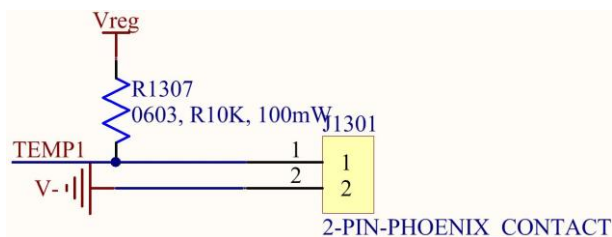
Sele 5.12. Alama isoleeritud SPI-skeem

Optoisolaatori skeemil on madalpinge osas $3,3\text{ k}\Omega$ takisti, tänu millele tekib madalpinge poolel 1 mA vool, mis lubab teisel poolel 40 mA voolu, mis on kõvasti suurem kui vaja. Selle põhjus on asjaolu, et 1 mA korral on optoisolaatori CTR 4000% [31]. Optoisolaatori funktsioon on kõrgepinge poolel signaalide „EN1” ja „EN2” abil sisse lülitada pingeregulaatorid. Varasemalt käis alam väljalülitamine *jumper*’i abil, mis oli ajakulukas protsess, sest selleks tuli akumoodulilt kaas pealt võtta. Need tekitavad toitepinge LTC6804-2-dele, mis võimaldavad isoleeritud SPI-1 töötada. Samuti on lisatud LEDid, et oleks näha, kas pingeregulaatorid on sisse lülitatud.



Sele 5.13. Optoisolaatori skeem

Selleks, et tagada akuelementide ohutus, tuleb mõõta ka nende temperatuure. Temperatuuri mõõtmiseks on kasutusel NTC-termistorid ning reeglistik näeb ette, et temperatuure mõõdetaks akuelementide klemmidelt. Koostatud on lihtne pingejaguri skeem, mille abil saab lugeda pingeväärtust ning selle abil välja arvutada temperatuuri.



Sele 5.14. Termistori skeem

5.2.3 Trükkplaadi disain

Trükkplaadi disainis tuli kõigepealt kindlaks teha trükkplaadi mõõtmed ning mõõtepunktide asukohad, mille määras akumooduli disain. Trükkplaadi paiknemine akumoodulis on näha lisas 6. Selleks, et vältida probleeme akumoodulite kokkupanekul, on igasse külge jäetud 1 mm varu, mille tulemusena on trükkplaadi mõõtmed 314×84 mm. Mõõtepunktid asuvad akuelementide ühendusplaatide keskpunktides ning läbi selle olid määratud mõõtepunktide asukohad ka trükkplaadil. Komponentide paigutusel sai lähtutud sellest, et raskemad komponendid asuksid trükkplaadi pealmisel poolel. Kuna kõige raskemad komponendid on transformaatorid, siis on kogu balansseerimisahela komponendid paigutatud trükkplaadi pealmisele poolele. Keskmistesse kihtidesse jäävad vasepolügonidest moodustatud laiad rajad, mis juhivad teatud ahelates 10 A-ni küündivat voolu. ASICud pidi paigutama trükkplaadi alumisele poolele, sest mujal ei olnud lihtsalt piisavalt ruumi, et ühendusradu vedada. Trükkplaadi alumisel poolel paiknevad ka passiivbalansseerimisahelad. Passiivbalansseerimistakistite jahutust on parandatud, tehes kontaktide ümber vasepolügonid. Samuti pidi arvestama, et madalpingekomponendid oleksid piisaval kaugusel kõrgepingekomponentidest. Kuna trükkplaadil asub sadu komponente, siis kasutatakse trükkplaadile komponentide paigutamisel ladumismasina abi, mille jaoks on vaja trükkplaadile paigaldada markerid (i.k. *fiducials*), mille abil oskab ladumismasin komponente positsioneerida. Disaini 3D-vaadet on näha lisas 12 ning trükkplaadi kihid on esitatud lisades 17,18,19 ja 20.

6. TARKVARA

Tarkvara saab ülesande alusel käesolevas töös jaotada kolme suurde ossa: suhtlusprotokollide toimimine, algoritmid akude haldamiseks ning kättesaadava info logimine hilisemaks analüüsimiseks.

Selleks, et vajalikke algoritme kasutada, on vaja koostöös meeskonnaga kirjutada järgmised teegid:

- ADCde kasutamise teek
- CAN-protokolli kasutamise teek
- *event timer*'i teek, mille abil saab koodi käitamist reguleerida
- GPIO-de kasutamise teek
- SPI-protokolli kasutamise teek
- UART-protokolli kasutamise teek
- välmälu kasutamise teek

6.1 CAN-suhtlus akuhaldussüsteemi ülema ning elektroonika juhtploki vahel

Vormelautol on peamiseks suhtlusprotokolliks CAN, sest seda on lihtne realiseerida, see on mürakindel ning piisava andmeedastuskiirusega. CAN loodigi esialgu autotööstuse tarbeks ning see on ennast selles valdkonnas tõestanud. Samuti on see suhtlusprotokoll olnud kasutusel varasematel vormelautodel. CANi siinil liigub äärmiselt suur osa vormeli andmevahetusest. ECU saadab selle kaudu käsklusi mootorikontrollerile ja stabilisaatoriregulaatori plaadile ning logimiseks vajaminevat infot Moteci andmesalvestusseadmele. Samuti saadab mootorikontroller läbi CANi ECU-le infot tagasi.

Akuhaldussüsteem saadab ECU-le ning Motecile CANi kaudu infot akude maksimaalse temperatuuri, minimaalse pinget ning SOC kohta. Motecile saadetakse info selleks, et juht saaks vastu võtta otsuseid sõitmisstiili mõju kohta akudele ning vajaduse korral teha korrektiive. Näiteks kui sõitja näeb, et sellise stiiliga sõites tühjeneb aku liiga kiiresti, siis tuleb sõidustiili muuta. Maksimaalne temperatuur ning minimaalne pinget annavad sõitjale infot selle kohta, kui kaugel ollakse potentsiaalselt ohtlikust olukorrast, mille korral

akuhoodussüsteem lülitab auto välja. Sooja ilmaga ei pruugi jahutus piisavalt efektiivselt töötada ning sõitja saab sellest suhteliselt kiirelt aru, kui näeb, et juba mõne kilomeetriga on temperatuur märgatavalt tõusnud. Sõitja võib järeldada minimaalsest pingenäidust, et mõne mõõtepunkti kontakt ei ole korralikult kinnitatud, sest kiirendamisel tekib liiga suur pingelang. Samuti on need näitajad telemeetria kaudu nähtavad boksis olevatele inimestele, kes näevad samu andmeid üle telemeetria, kuid sel moel ei saa edastada andmeid samasuguses mahus, nagu võimaldab logida auto peal olev Moteci süsteem. Lisaks hakkab ECU piirama auto võimsust, kui jõutakse akuelementide ohtlikule piirile liiga ligidale.

Akuhoodussüsteemi ülem suhtleb akuhoodussüsteemi alamatega ning teab seeläbi kõiki pingeid ja temperatuure, mida hoiustab vastavates massiivides. Pidevalt jälgitakse seda, milline temperatuur on kõige kõrgem ning milline pinge on kõige madalam. Pingenäitude jaoks on vaja kasutada filtreerimist, mille jaoks on piisavalt hea tulemuse andnud keskmistamine. Pidevalt käib ka SOC arvutus, mille tulemusi hoitakse nii muutujas kui ka salvestatakse väikmällu. Kindla intervalli tagant edastab vastavad näidud CANi siinile.

6.2 Isoleeritud SPI-suhtlus akuhoodussüsteemi ülema ja alama vahel

Isoleeritud SPI-protokoll võimaldab kahepoolset suhtlust seadmete vahel, mis on omavahel elektriliselt isoleeritud. Suhtlus käib diferentsiaalsignaali abil, mis edastatakse läbi keerdpaarjuhtme, nagu ka CANi puhul. Kasutatavad ASICud võimaldavad seadistada edastamise võimsust vastavalt juhtmepikkustele ning korrektse signaal-müra suhte saavutamiseks. Ülema poolel käib suhtlus standardse SPI-protokolli abil, mille realiseerimiseks on kirjutatud teegid. Igal alamal on kaks mõõtefunktsiooniga ASICut, millega ülem peab suhtlema. Läbi ühe LTC6804-2 suhtleb ülem ka kõigi LTC3300-1-dega.

Selleks, et suhtlus saaks alata, tuleb kõigepealt alamatel asuvad ASICud üles äratada madala volutarbe seisundist. Selleks tuleb saata *dummy byte*, pärast mida saab hakata saatma käsklusi. Seadmed lähevad madala volutarbe seisundisse, kui teatud aja jooksul ei ole siinil andmevahetust toimunud. Mõõtefunktsiooniga ASICuga on võimalik suhelda, kasutades äärmiselt spetsiifilisi käsklusi, kuid suhtlemiseks on loodud ka kasutajasõbralikumaid võimalusi. Selleks, et saada kätte kõik pingenäidud, tuleb anda lihtsalt käsklus, et soovid saada pingenäitusid, mille peale tehakse ära ADC-konversioonid ning tagastatakse

pingenäidud. Selleks, et suhelda LTC3300-1-dega, tuleb kõigepealt seadistada mõõtefunktsiooniga ASIC selliselt, et see edastab sissetuleva info edasi. Seejärel saab saata käsud, mis initsialiseerivad balansseerimise. Edastatud käsud salvestatakse registritesse, et saaks kontrollida, kas viimati edastatud käsklus sai korrektselt edastatud. Samuti salvestatakse registritesse vastused, mida saab lugeda, kui aktiivbalansseerimisfunktsiooniga ASIC-ud peaksid infot tagasi saatma. [7], [24]

6.3 Akude laetuse algoritmid

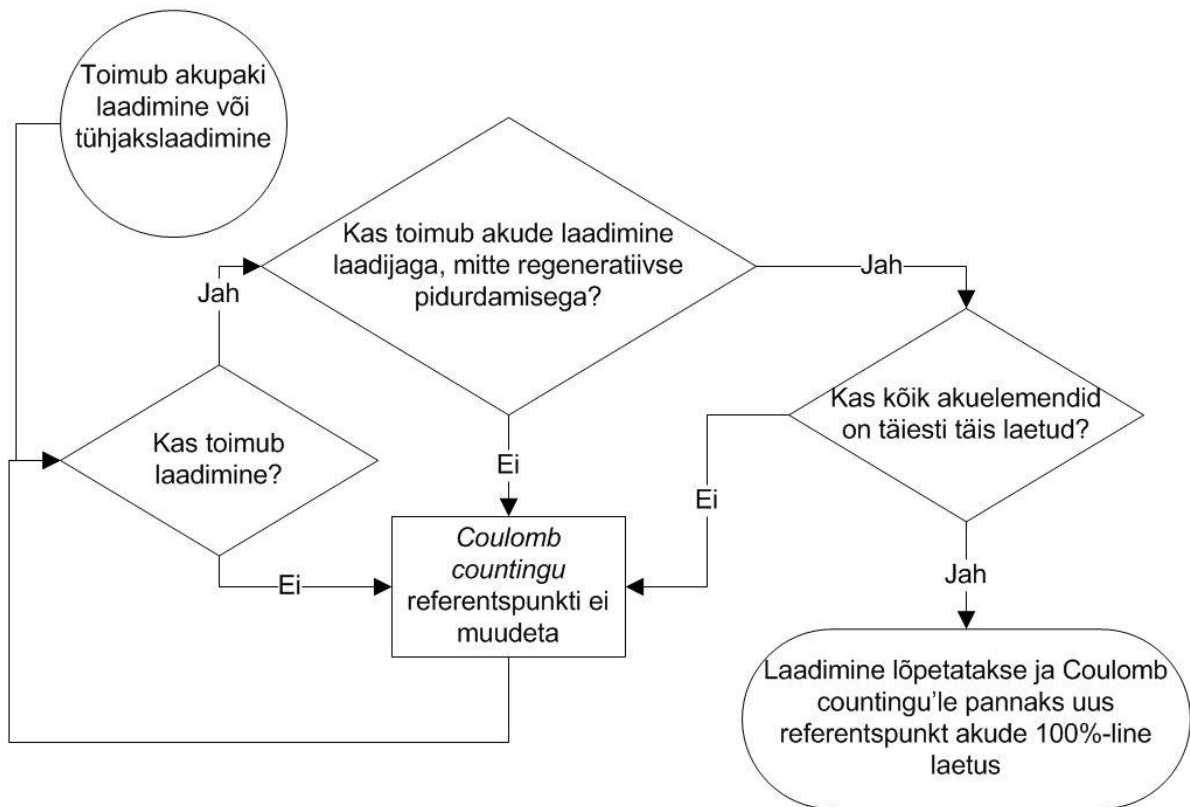
Traditsiooniliselt on akude laetuse määramiseks kasutatud pinge mõõtmisel põhinevat meetodit. Teades suhet aku pinge ning laetuse vahel, saame kindlaks määrata, kui täis aku on. Sellisel meetodil määratud aku laetuse täpsus sõltub peamiselt akukeemiast, kuid probleemid on ühised. Aku pinge sõltub temperatuurist ja akut läbivast voolust. Kui on teada, kuidas aku pinge sõltub temperatuurist ja voolust, saab paljude akukeemiate puhul pinge abil määrata, kui täis akud on. Liitiumioonakude pingekõver tõuseb märgatavalt, kui akupinge läheneb maksimumini, ning langeb märgatavalt, kui akupinge läheneb miinimumini. Vahepealses osas on pingekõver küllaltki lame ega võimalda selle akukeemia puhul aku laetust vajamineva täpsusega ainult pinge järgi määrata. [27]

Kui integreerida voolu, mis läheb akusse ja mis sealt välja, siis saab hinnata, kas akus on energiat järel rohkem või vähem. Olenevalt akukeemiast võib selline meetod anda häid tulemusi, kuid selle täpsus läheb aja jooksul paigast. Seda selle tõttu, et akudes on lekkevool, mille tõttu akud tühjenevad, ning seda voolu ei registreeri vooluandur. Samuti ei õnnestu kogu akusse pandud energiat muundada kasulikuks energiaks, vaid tekivad kaod, mida iseloomustab Peukerti eksponent. *Coulomb counting* töötab küllaltki hästi liitiumioonakude puhul, sest lekkevoolud on väikesed ning Peukert eksponent on küllaltki väike. Sellegipoolest ei ole meetod ka liitiumioonakude jaoks piisavalt hea, sest ka väike integreerimisviga tekitab aja jooksul küllaltki suure kõrvalekalde tegelikkusest. Elektrivormeli projekteerimisel püütakse kasutada võimalikult väikest akupakki, sest eesmärk on võimalikult kerge auto. Järelikult on eesmärgiks see, et kestvussõidu lõpus oleks akupakis järel võimalikult vähe energiat, ületamata kriitilist piiri, sest see on optimaalse projekteerimise tunnus. Seega tuleb tagada akude laetuse arvutuse puhul võimalikult suur täpsus, et sõitmist saaks planeerida,

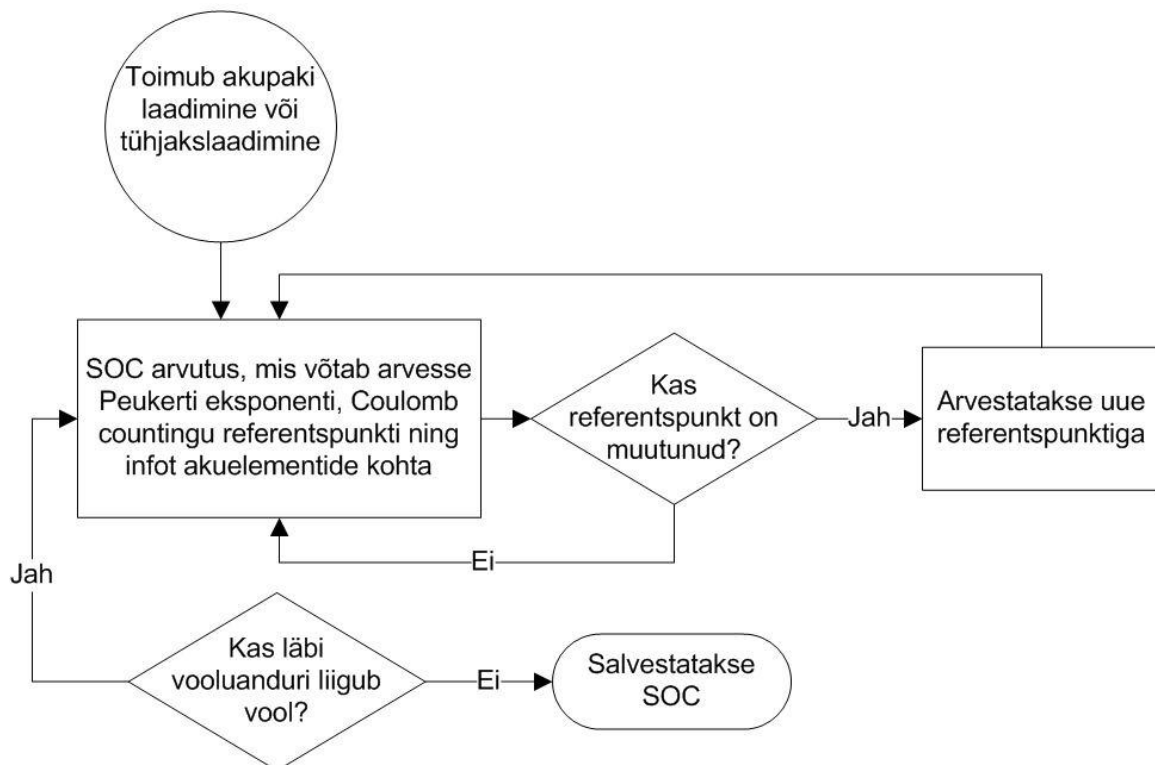
monitoorida ja analüüsida ning vajaduse korral teha korrektsioone nii auto seadistuses kui ka juhtide sõidustiilis. [28]

Selleks, et tagada vajaminev täpsus, tuli kombineerida kaks eelkirjeldatud meetodit. Selleks, et lahti saada kõrvalekaldest, mis tekib *Coulomb counting*'u meetodiga, peame referentspunkti aeg-ajalt kalibreerima. Referentspunktiks sobib akude 100% laetus 4,2 V juures. Iga kord, kui akud täis laetakse, saab uuesti paika panna referentspunkti, mille abil saab *Coulomb counting*'u meetodiga määrata, kui palju akudes veel energiat järel on. Meetod sobib vormelile väga hästi, sest pärast igat kasutust laetakse akud täis, et järgmiseks sõiduks maksimaalselt valmis olla. Selline meetod ei pruugi näiteks sobida hübriidautodele, kus akude laetust hoitakse enamasti 50% piirimail, et vajaduse korral saaks nii akust energiat võtta kui ka sinna juurde panna, mis tingib selle, et aja jooksul tekib arvestatav kõrvalekalle reaalsest olukorrast. [28], [29]

Meetodi realiseerimiseks balansseerib akuhaldussüsteem akuelementide pinged ning referentspunkt pannakse uuesti paika alles siis, kui kõikide akuelementide pinge on 4,2 V. Vooluanduri abil saame teada vooluhulga mõlemas suunas ning selle näidud integreeritakse. Selle abil saame arvutada akude laetuse, mis pidevalt salvestatakse ka püsimällu, et näit oleks teada ka pärast seda, kui toide peaks ootamatult kaduma. Varasemas süsteemis ei pandud referentspunkti korrektselt paika ning ei arvestatud Peukerti eksponendiga.



Sele 6.1. Coulomb counting'u referentspunkti määramise algoritmi skeem



Sele 6.2 SOC algoritmi skeem

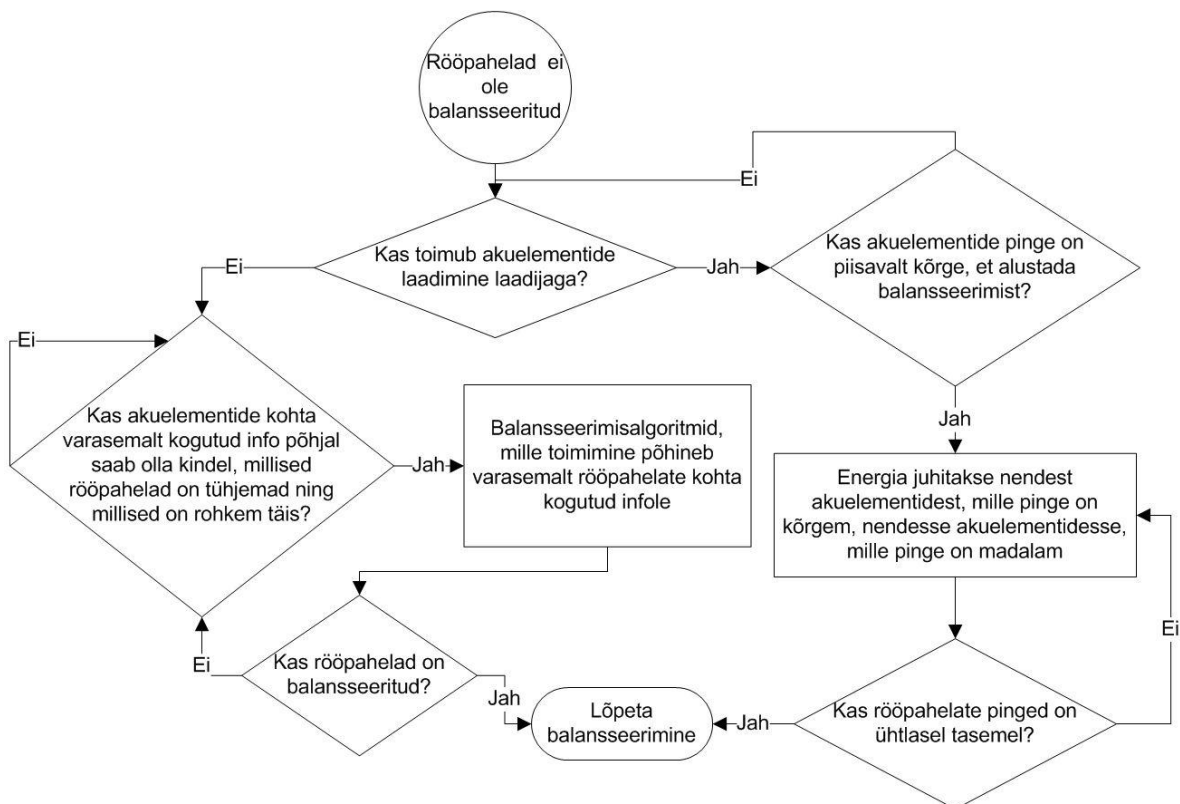
6.4 Akude balansseerimise algoritmid

Akude balansseerimise üks põhiprobleeme on see, et on keeruline välja selgitada, kui palju akude laetus erineb. Kui probleemile ei pöörata tähelepanu, siis võib tagajärjeks olla akupakk, mis on rohkem balansist väljas kui enne balansseerimisprotsessi. Jadaahelas olevate rööpahelate balansseerituse üle saab otsustada, võrreldes nende pingeid, kuid sellel meetodil on hulk probleeme. Üks probleem on see, et akude mahtuvuses on erinevused ning selle tõttu ei ole akuelementides võrdsel määral energiat, kuigi nende pinged on võrdsed. Selle probleemi vastu on keeruline võidelda ning kui detekteeritakse, et mõne rööpahela kogumahtuvus on märgatavalt väiksem kui teistel rööpahelatel, siis ainus lahendus on see rööpahel välja vahetada uute akuelementide vastu. See ei taga seda, et väljavahetatud elementide mahtuvus oleks sobiv, ning protsess võib korduda. Varasemate aastate kogemuste põhjal saab väita, et umbes 5%-l akuelementidest on mahtuvus nii palju väiksem, et need on mõistlik välja vahetada. Teine suur probleem on akuelementide endi impedants, mis võib toodangus erineda umbes 15% ulatuses. Impedantsi on võimalik kindlaks määrata ning arvesse võtta, kuid see nõuab hulgaliselt komponente, mis sellesse akuhaldussüsteemi ära ei mahuks ning selle maksumus läheks liiga kalliks. Erinevus impedantsis ei mõjuta OCVd, kuid see mõjutab elementide pinget, kui neid laetakse tühjaks või täis. Tühjaks laadimise ajal tekib takistuse tõttu lisapingelang ning laadimise ajal on pinge takistuse tõttu suurem. See tingib selle, et on küllaltki keeruline otsustada, kas rööpahelate pingeerinevus on tingitud sellest, et nende SOC on erinev, või tekitab seda impedants, kui akuelemente läbib arvestatav vool. [30]

Liitiumioonakusid on mõistlik balansseerida sellises pingevahemikus, kus väike muutus SOC-s tekitab võimalikult suure muudatuse klemmipinges. Sellisele kriteeriumile vastab see, kui akud on kas peaaegu täis või peaaegu tühjaks laetud. Kui akuelemente balansseerida siis, kui nad on peaaegu tühjaks laetud, siis võib tekkida palju probleeme. Kui akuelemente balansseerida näiteks pingekõvera alumises osas, siis see ei taga, et pinged oleksid ühtlasel tasemel, kui akusid laadida. Samuti tekib balansseerimise käigus kadusid ning võib tekkida oht, et akude pinge langeb balansseerimise käigus alla lubatu. Kui laadida akusid pingekõvera ülemises osas, siis toimub see üldjuhul sel ajal, kui akusid laetakse. See tagab selle, et akud ei saa balansseerimise käigus tühjaks saada. Kui balansseerida akuelemente maksimaalse

lubatud pinge juures, siis saab sa, ito olla kindel, et kogu akupakki sai laetud maksimaalne kogus energiat, mis küll ei taga seda, et akuelementides oleks sama palju energiat. [32]

Selleks, et ära kasutada maksimaalses koguses akupakki laetud energiat, töötavad balansseerimisahelad teatud määral ka teistes pingepiirkondades. Energiakogus on vaja maksimaalselt ära kasutada kestvussõidu ajal. Paratamatult on akupakis rööpahelaid, mille energiamahuvus on veidi väiksem. Õnneks on liitiumioonakude omadused piisavalt püsivad, et neid on võimalik analüüsida. Sisetakistus küll suureneb koos laadimistsükliite arvuga, kuid see kasv on siiski piisavalt väike, et seda on võimalik arvesse võtta. Testimisperiodi alguses toimub balansseerimine ainult laadimise ajal, mille tulemusena laetakse kõik elemendid maksimumpingeni täis. Koormamise käigus kogutakse andmeid akuelementide pingete kohta ning sel teel saab kindlaks teha, millised rööpahelad tuleb välja vahetada, milliste rööpahelate impedants on suurem kui teistel ning milliste rööpahelate mahuvus on väiksem kui teistel. Sellisel moel saab hiljem rakendada balansseerimisprotsessi teatud määral ka koormamise ajal, et juhtida energia nendest rööpahelatest, mis on rohkem täis, rööpahelatesse, mis on vähem täis. Nii saab suurendada akupakist kättesaadavat energiahulka.



Sele 6.3. Akude balansseerimise skeem

6.5 Akude info logimine

Selleks, et akuelementide kohta vajalikus koguses infot koguda, on vaja seda piisava sagedusega logida. Logimisvõimekus on olemas ka Motecil, kuid sellega tuleks suhelda üle CANi siini ning see ei võimaldaks piisavas koguses piisava sagedusega infot logida. Selle tõttu tuleb info salvestada lokaalselt. Selleks on trükkplaadile paigaldatud välmälu-kiip, millele mikrokontroller salvestab info akuelementide pingete kohta ning akupakist võetava ja sinna mineva vooluhulga kohta. Andmesalvestusmaht sõltub eelkõige sellest, millise kiirusega õnnestub isoleeritud SPI tööle saada. Teoreetiline isoleeritud SPI kiirus on 1 Mb/s. Kui andmed on salvestatud välmällu, siis saab need hiljem sealt välja lugeda, kasutades arvutit, mis suhtleb SWD või UARTi kaudu mikrokontrolleriga, mis saab andmed välmälust lugeda.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö tulemusena projekteerisin vormelautole FEST15 modulaarse ülema-alama topoloogial põhineva akuhaldussüsteemi, mis suudab tagada akusüsteemi ohutuse ning akuelementide balansseerituse. Akuhaldussüsteem võimaldab maksimeerida akupakist kättesaadavat energiahulka ning salvestatud info põhjal on võimalik akusüsteemi käitumist analüüsida.

Mehaanikas oli suurim probleem ühendusplaatide toetusplaadi ning akuhaldussüsteemi ülema kinnituse sobitumine ülejäänud süsteemiga, mis määras nende kuju. Tootmistehnoloogiks valitud laserpaagutus võimaldas projekteerida geomeetriliselt keerukaid konstruktsioone. Ülesande täitmisel on rõhku pandud kaalu optimeerimisele, säilitades konstruktsioonide piisav tugevus.

Elektroonikalahenduse väljatöötamine oli kõige töömahukam osa, sest selgeks tuli teha mitmete ahelate tööpõhimõtteid ja võimekust. Kõige keerukam oli aktiivbalansseerimisahelate ning isoleeritud SPI jaoks vajaminevate ahelate projekteerimine. Äärmiselt ajamahukas oli akusüsteemi alama ühendusradade vedamine, sest trükkplaadil on üle 600 komponendi.

Tarkvaraliselt sõltub algoritmide efektiivne toimimine korrektselt toimivatest suhtlusprotokollidest. Paljude algoritmide puhul tuleb arvestada liitumioonakude eripäraga, mis seab hulga piiranguid. Akuelementide käitumise analüüsimiseks on loodud logimisvõimekus, mis võimaldab parendada algoritmide käitumist.

Projekteeritud süsteem pakub lahendusi paljudele varasematele probleemidele: balansseerimiseks kuluv energiahulk on väiksem, sest varasema passiivbalansseerimise asemel on kasutusel aktiivbalansseerimissüsteem, akuhaldussüsteemis olevate mikrokontrollerite arvu on vähendatud varasemalt üheksalt ühele ja see vähendab omakorda programmeerimisele kuluvat aega, akuhaldussüsteemi alamaid on võimalik sisse ja välja lülitada läbi optoisolaatori, akuhaldussüsteemi alama deformatsioonid on väiksemad tänu akuelementide ühendusplaatide toetusplaadile, akuelementide laetuse hindamiseks on

kasutusele võetud täpsem algoritm ning väljatöötatud lahendus võimaldab hilisemaks analüüsimiseks salvestada jooksvalt infot akude rööpahelate pingete (140 rööpahelat), temperatuuride (49 mõõtepunkti) ja kõiki jadamisi ühendatud rööpahelaid läbiva voolu kohta.

Autori hinnangul on projekteeritud süsteem oluline edasiminekuks FEST15 jätkuvas arendustöös ning see annab olulisi eeliseid akude käitumise uurimiseks ekstreemsetes tingimustes. Isegi kui uuest akuhaldussüsteemist saadav kasu peaks olema väike, siis ülemaailmses tihedas konkurentsisis annab see märgatava eelise.

SUMMARY

This bachelor thesis resulted in designing a battery management system with modular master-slave topology for the electric car FEST15 which ensures safety and balance of the battery cells. Battery management system allows to maximize the amount of energy which can be retrieved from the battery pack and logged data can be used to analyze the behaviour of the battery system.

In case of mechanical design, the biggest problem was the integration of mechanical components with the rest of the system which determined their shape. Selective laser sintering which was chosen as the production technology enabled the author to design geometrically complex structures. Emphasis was placed on optimizing the weight while maintaining sufficient structural strength of both the supportive structure of battery cells' connection plates and the fastening of the battery management system master.

Electronics was the most labor-intensive part because the working principles and capabilities of numerous electronic circuits had to be analysed and studied. The most complex parts were the design of the active balancing and isolated SPI circuits. The routing process of the battery management system slave was extremely time consuming since there are over 600 components on the printed circuit board.

Software algorithm's effective performance depends on the correct functioning of the communication protocols. Several algorithms of the battery management system must take into account the specific nature of the lithium-ion batteries, which creates a number of limitations. The logging capabilities are used to analyze the behaviour of the battery cells, thanks to which the performance of the algorithms can be improved.

The designed system offers solutions to a number of previously existing problems: the amount of energy consumed by the balancing system has been decreased because active balancing is used instead of passive, the amount of microcontrollers in the system has been decreased from nine to one which results in decreased programming time, the switch on and off of the battery management system slaves is possible through the opto-isolator, the

deformations of the battery management system slaves have been decreased thanks to the supportive structure of battery cells' connection plates, the algorithm which calculates the state of charge of the battery pack has been improved and further analysis can be made since data about battery pack voltages (140 measurement points), temperatures (49 measurement points) and current is being logged.

The author evaluates the designed system to be a significant step forward in the ongoing development of FEST15 and it provides significant advantages to study the behaviour of batteries under extreme conditions. Even if the benefits from the new battery management system should be modest, it still provides a noteworthy advantage in the close global competition.

KASUTATUD KIRJANDUS

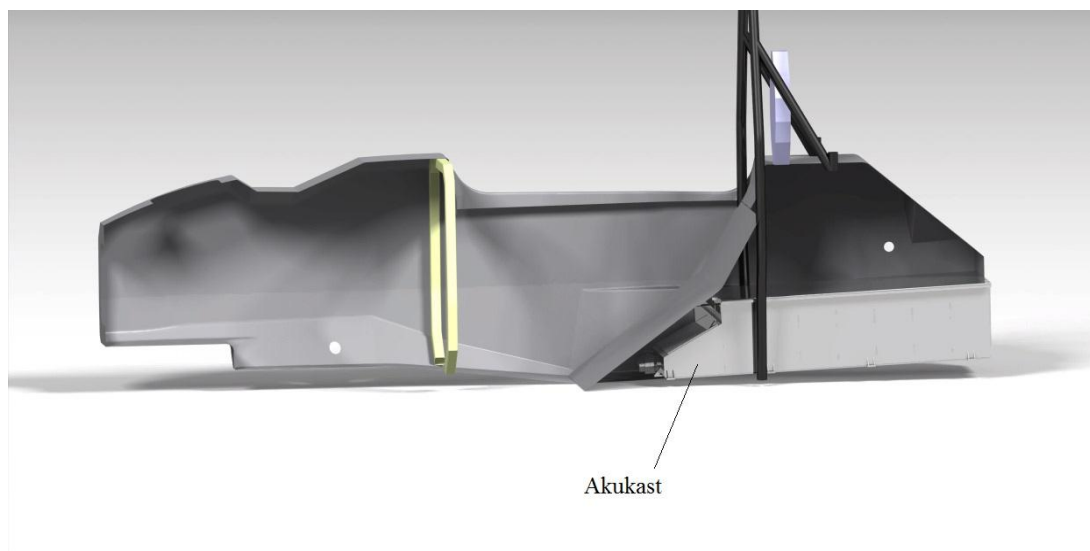
1. What's the Best Battery? [WWW]
http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery (10.05.2015)
2. Anrea, Davide. Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs 1st ed. Boston: Artech House, 2010
3. Lithium Battery Management Systems [WWW]
https://www.google.ee/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB8QFjAA&url=https%3A%2F%2Fredmine.fe.up.pt%2Fattachments%2Fdownload%2F1231%2FLithium_BMS_Tutorial.ppt&ei=ncVbVeh5i4-wAc_JgTA&usq=AFQjCNH0mU7yvZW_FgSGFFzuh3dRKcM32A&sig2=VmGD5HcTedCL6f_QxPPC6w&bvm=bv.93756505,d.bGg (10.05.2015)
4. Types of Battery Cells [WWW]
http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells (10.05.2015)
5. 2015 Formula SAE Rules [WWW] <http://www.fsaeonline.com/content/2015-16%20FSAE%20Rules%20revision%2091714%20kz.pdf> (10.05.2015)
6. Passive and Active Battery Balancing comparison based on MATLAB Simulation [WWW] <http://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/4/285224/080/deliverables/001-D21AnnexPassiveandActiveBatteryBalancingcomparisonbasedonMATLABSimulation.pdf> (10.05.2015)
7. LTC3300-1 datasheet [WWW] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/33001fb.pdf> (10.05.2015)
8. Solvent-based varnish coating for electronic components [WWW]
http://www.ppa.sk/uploaded/dcerske_spolocnosti/PPA%20TRADE/SOFRASER/aplikacie/FA_295_0_InlineControl_Coating_Varnishcoatingelectroniccomponent_customer.pdf (10.05.2015)
9. Laserpaagutus [WWW] <http://www.ttu.ee/mehaanikateaduskond/masinaehituse-instituut-2/seadmed/laserpaagutusseade-formiga-p100/> (10.05.2015)
10. SLS Prototype Materials [WWW] <https://www.solidconcepts.com/materials/sls-materials/> (10.05.2015)

11. 1_520x442.jpg [WWW]
http://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/masinaehituse-instituut/RapidLab/.thumbnails/1_520x442.jpg (10.05.2015)
12. STM32F4 datasheet [WWW]
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf> (10.05.2015)
13. MCP2551 datasheet [WWW]
<http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/MCP2551.pdf> (10.05.2015)
14. HTFS 200 datasheet [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/1524365.pdf> (10.05.2015)
15. LTC6820 datasheet [WWW] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6820fa.pdf> (10.05.2015)
16. Low Cost isoSPI Coupling Circuitry for High Voltage High Capacity Battery Systems [WWW] <http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTJournal-V24N1-06-di-isoSPICoupling-JonMunson.pdf> (10.05.2015)
17. 1 GB NAND flash datasheet [WWW] <http://www.farnell.com/datasheets/1605619.pdf> (10.05.2015)
18. Basic Concepts of Linear Regulator and Switching Mode Power Supplies [WWW]
<http://cds.linear.com/docs/en/application-note/AN140fa.pdf> (10.05.2015)
19. LMR14206XMK BUCK, 0.6A, 42VIN datasheet [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1503724.pdf> (10.05.2015)
20. Components and Methods for Current Measurement [WWW]
<http://powerelectronics.com/power-electronics-systems/components-and-methods-current-measurement> (10.05.2015)
21. DC/DC converter, 0.5A, 3.3V/5.0V, SIP datasheet [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1707818.pdf> (10.05.2015)
22. LM3480IM3-3.3/NOPB IC, V REG, LINEAR, 3.3V/5.0V, SMD [WWW]
<http://www.farnell.com/datasheets/1888854.pdf> (10.05.2015)
23. What is a Voltage Follower [WWW]
<http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Voltage-follower> (10.05.2015)
24. LTC6804-2 datasheet [WWW] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/680412fb.pdf> (10.05.2015)

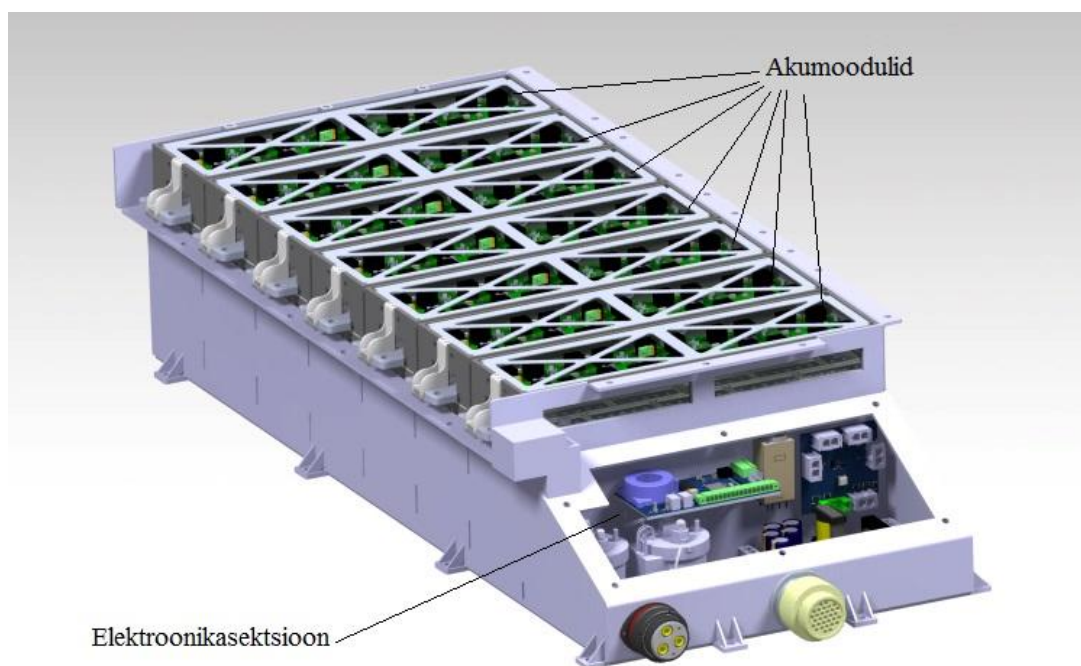
25. LT3990 datasheet [WWW] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3990fa.pdf>
(10.05.2015)
26. Mäearu, Kaarel, Formula Student elektrilise vormelauto FEST13 akuhaldussüsteemi mõõteosa elektroonika projekteerimine, TTÜ, 2013
27. Xiao, B., Shi, Y., He, L., A Universal State-of-Charge Algorithm for Batteries - *Design Automation Conference*, 2010
28. Estimating the State Of Charge of Li-Ion batteries [WWW] http://liionbms.com/php/wp_soc_estimate.php (10.05.2015)
29. How to Measure State-of-charge [WWW] http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge
(10.05.2015)
30. Battery Cell Balancing: What to Balance and How [WWW] <http://focus-webapps.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20%20-%20Battery%20Cell%20Balancing%20-%20What%20to%20Balance%20and%20How.pdf> (10.05.2015)
31. Photocoupler, 2.5 kV, Darlington O/P [WWW] <http://www.semicon.toshiba.co.jp/info/docget.jsp?type=datasheet&lang=en&pid=TLP127> (10.05.2015)
32. Cell-Balancing Techniques: Theory and Implementation [WWW] http://www.artechhouse.com/static/sample/barsukov-491_ch04.pdf (10.05.2015)

LISAD

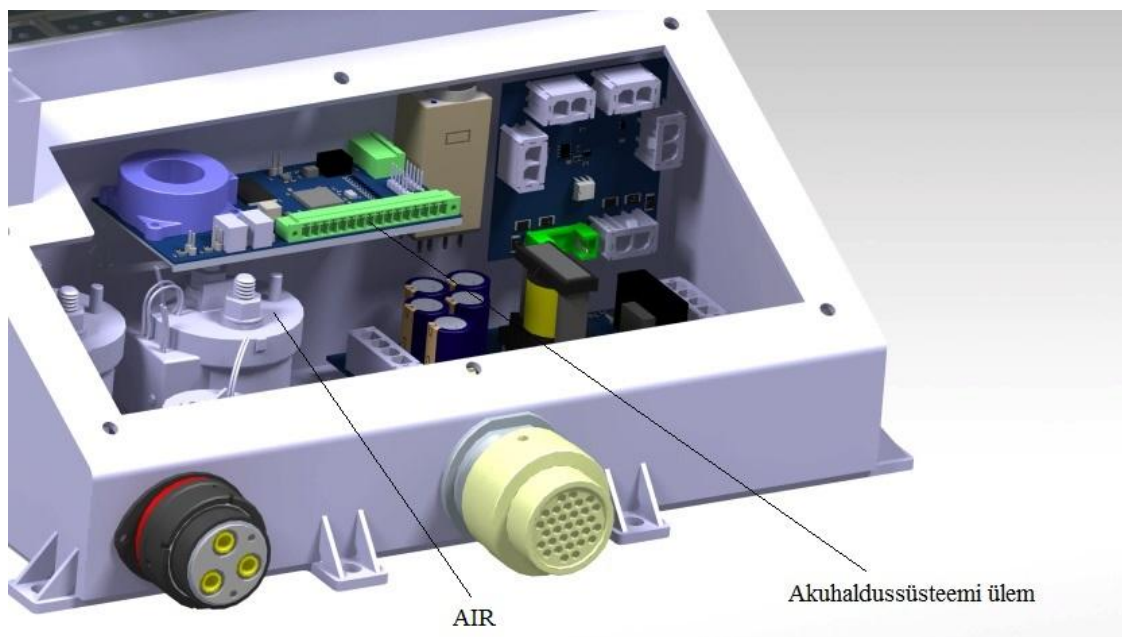
Lisa 1: Akukasti paiknemine vormelautos



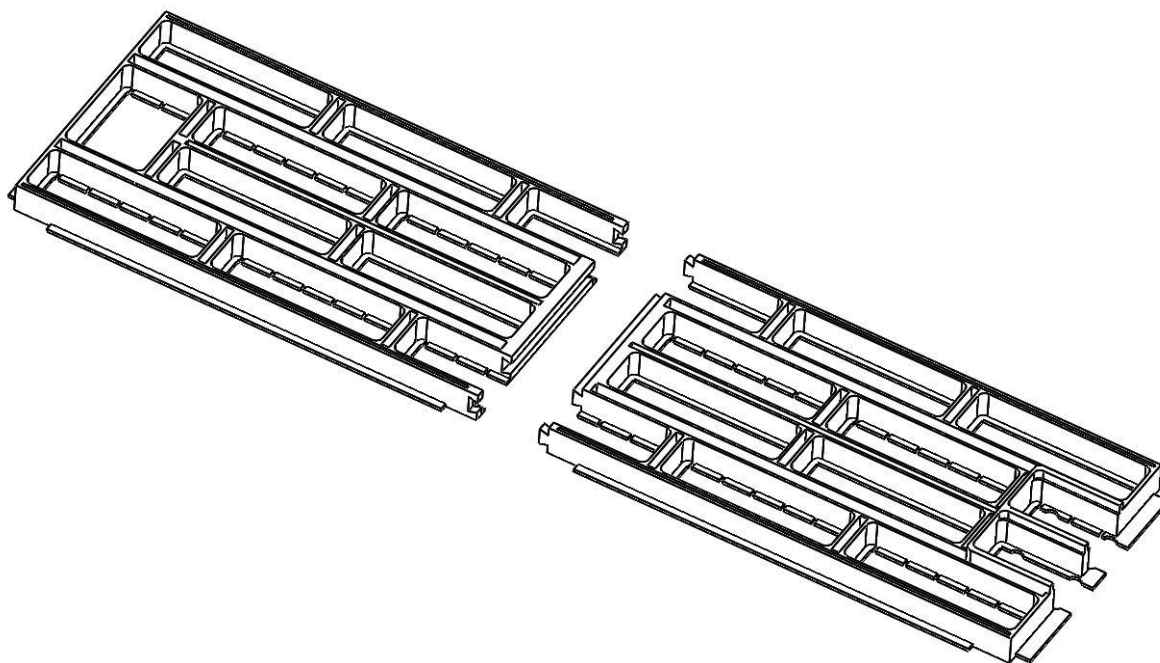
Lisa 2: Ülevaade akukastist



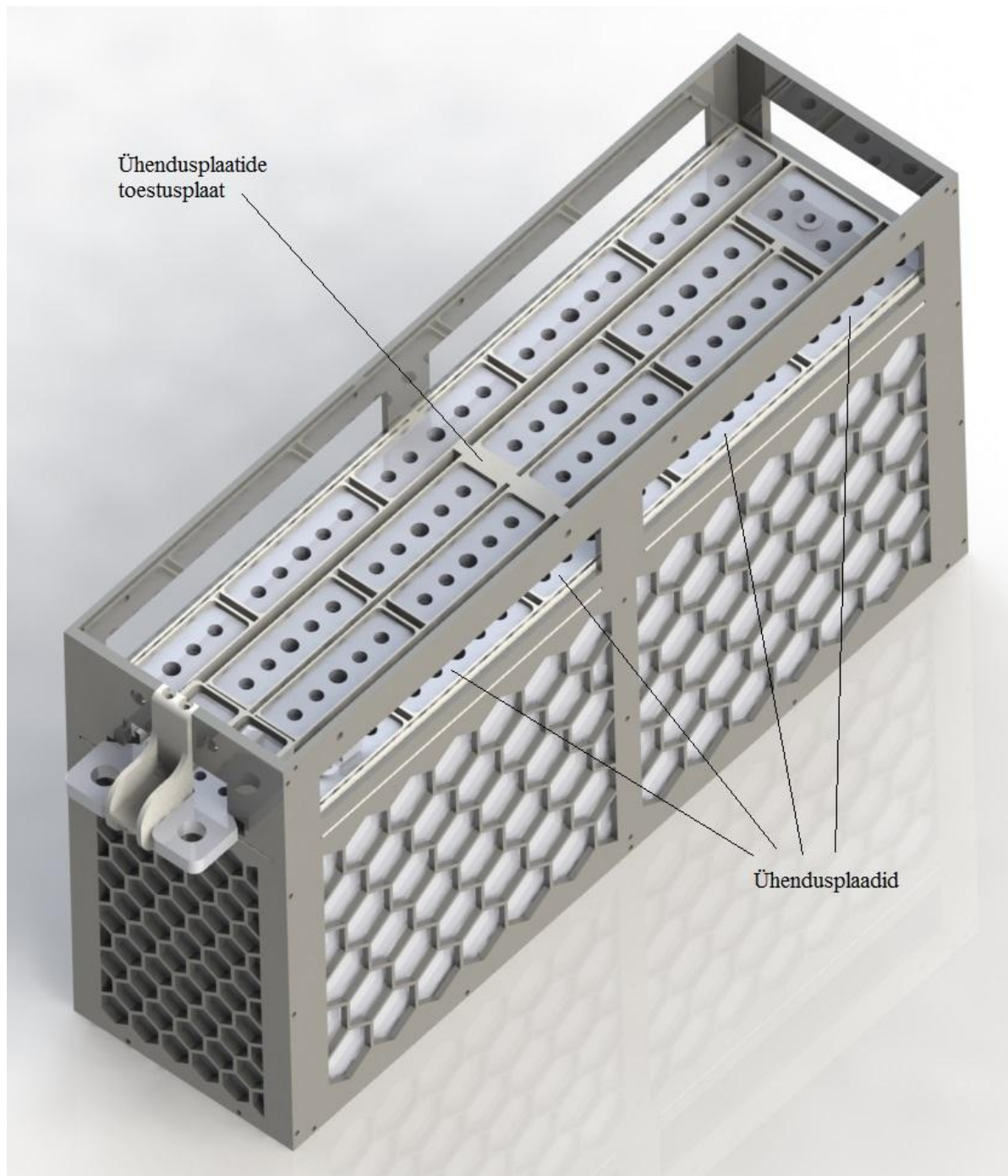
Lisa 3: Akuhaldussüsteemi ülema paiknemine akukasti elektroonikasektsioonis



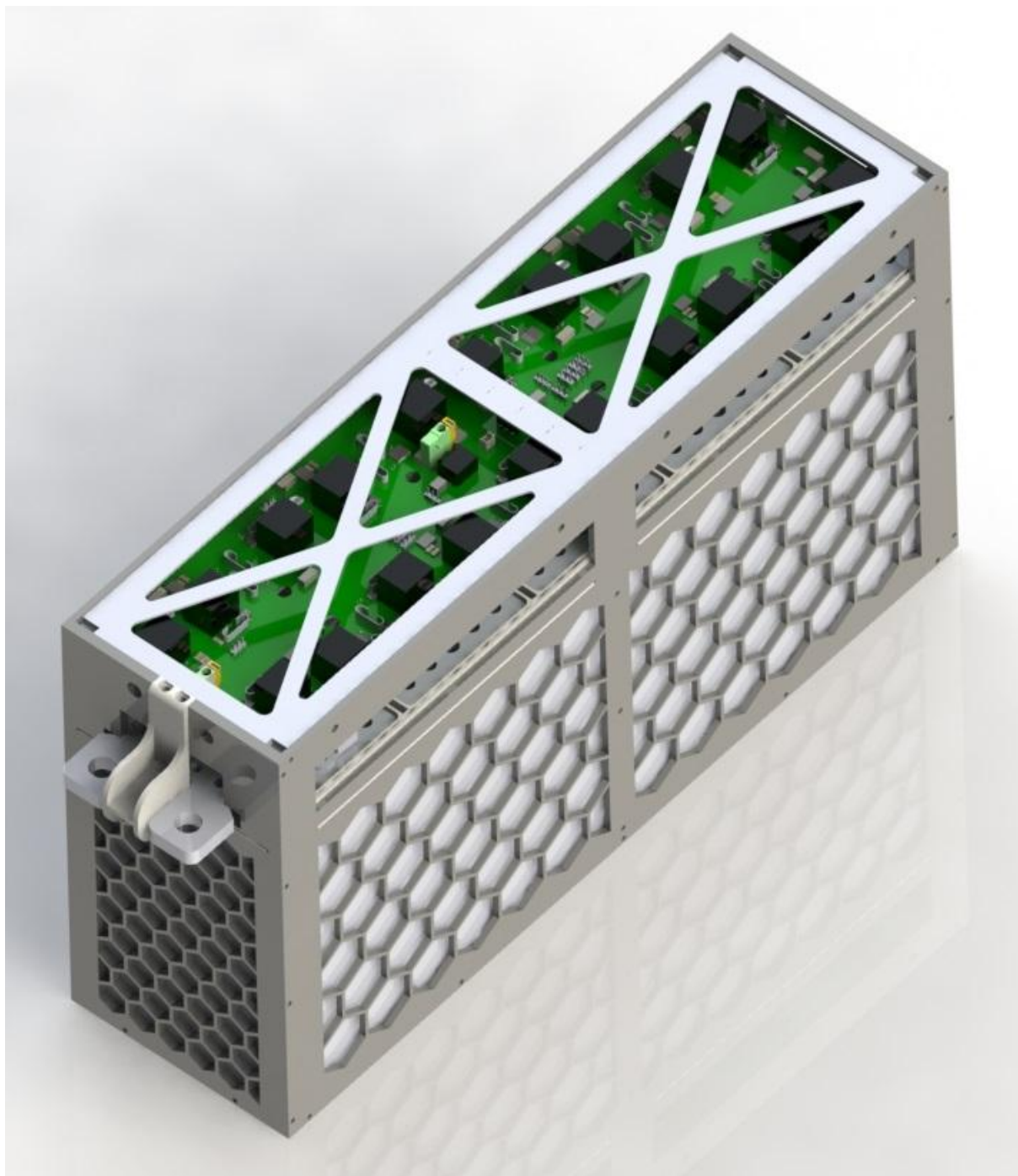
Lisa 4: Tappliitega toetusplaadi mõlemad pooled



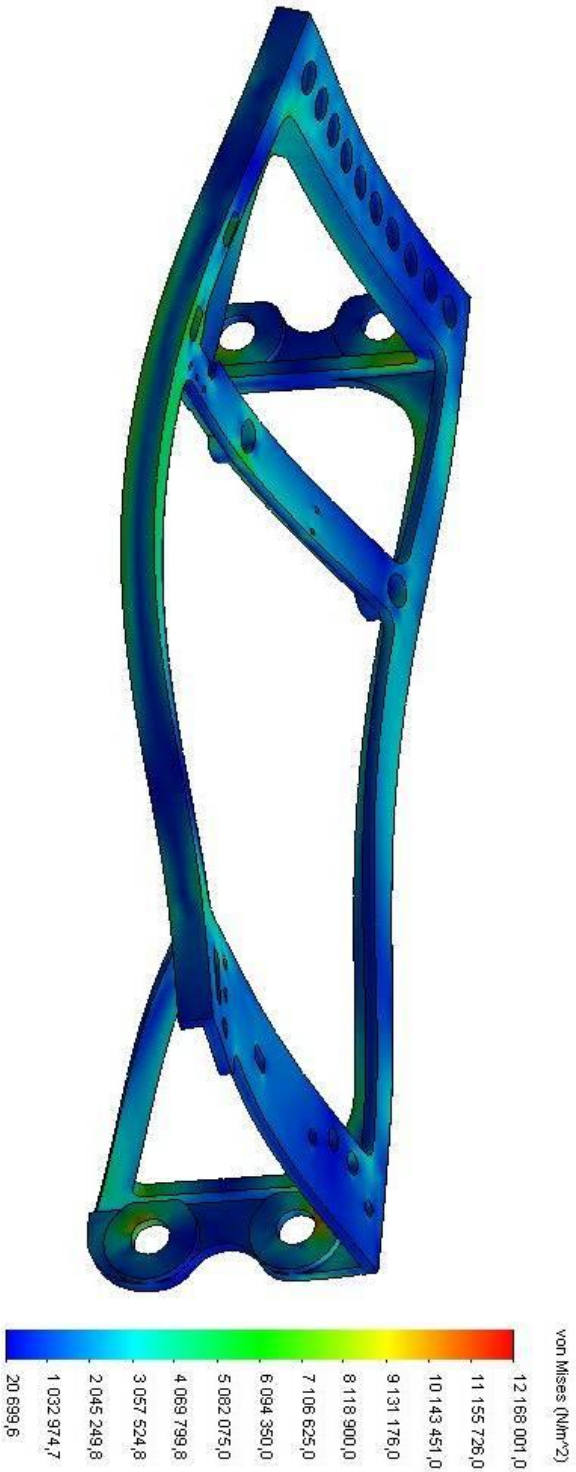
Lisa 5: Ühendusplaatide toestusplaadi paiknemine akumoodulis



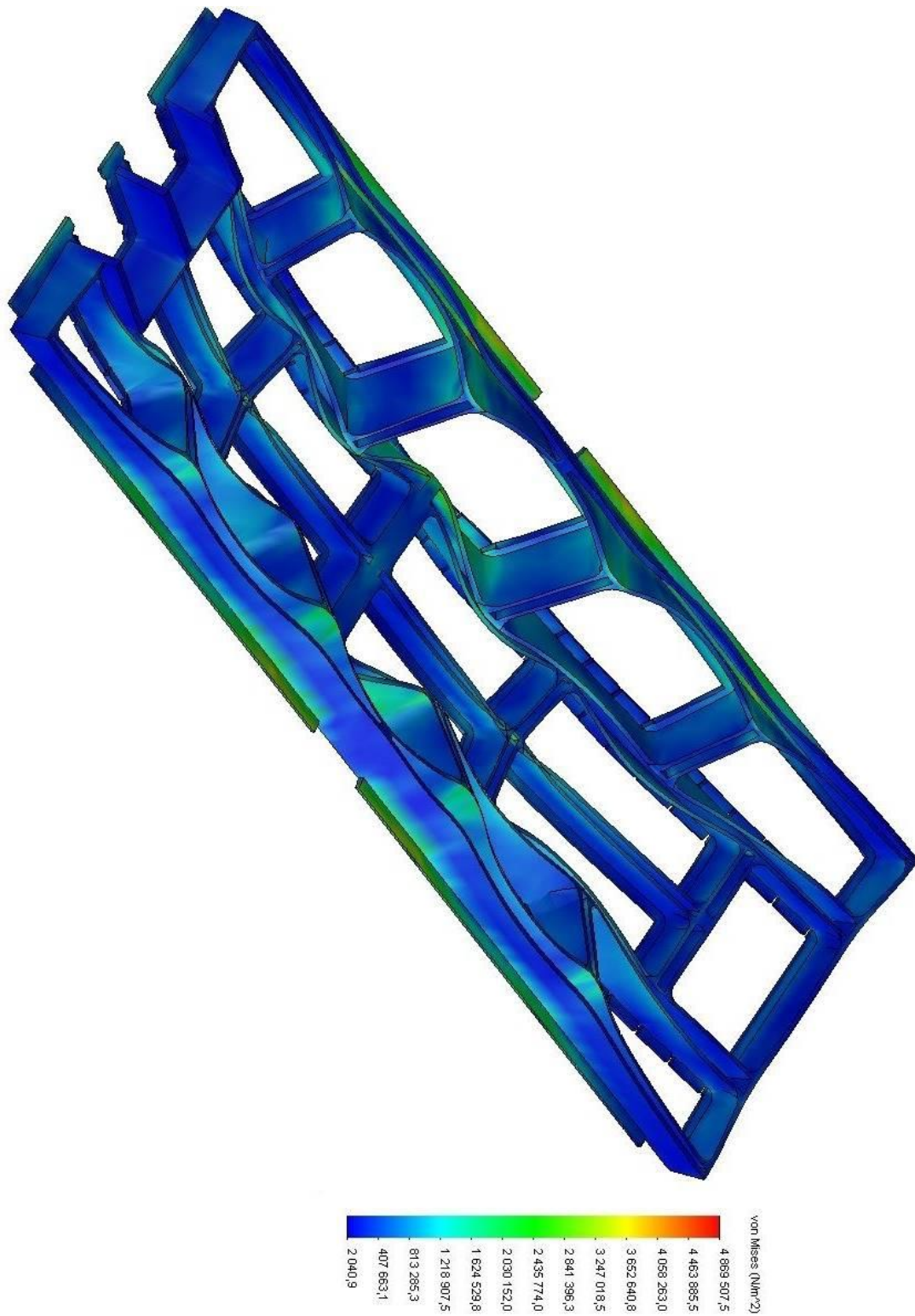
Lisa 6: Akuhaldussüsteemi alama paiknemine akumoodulis



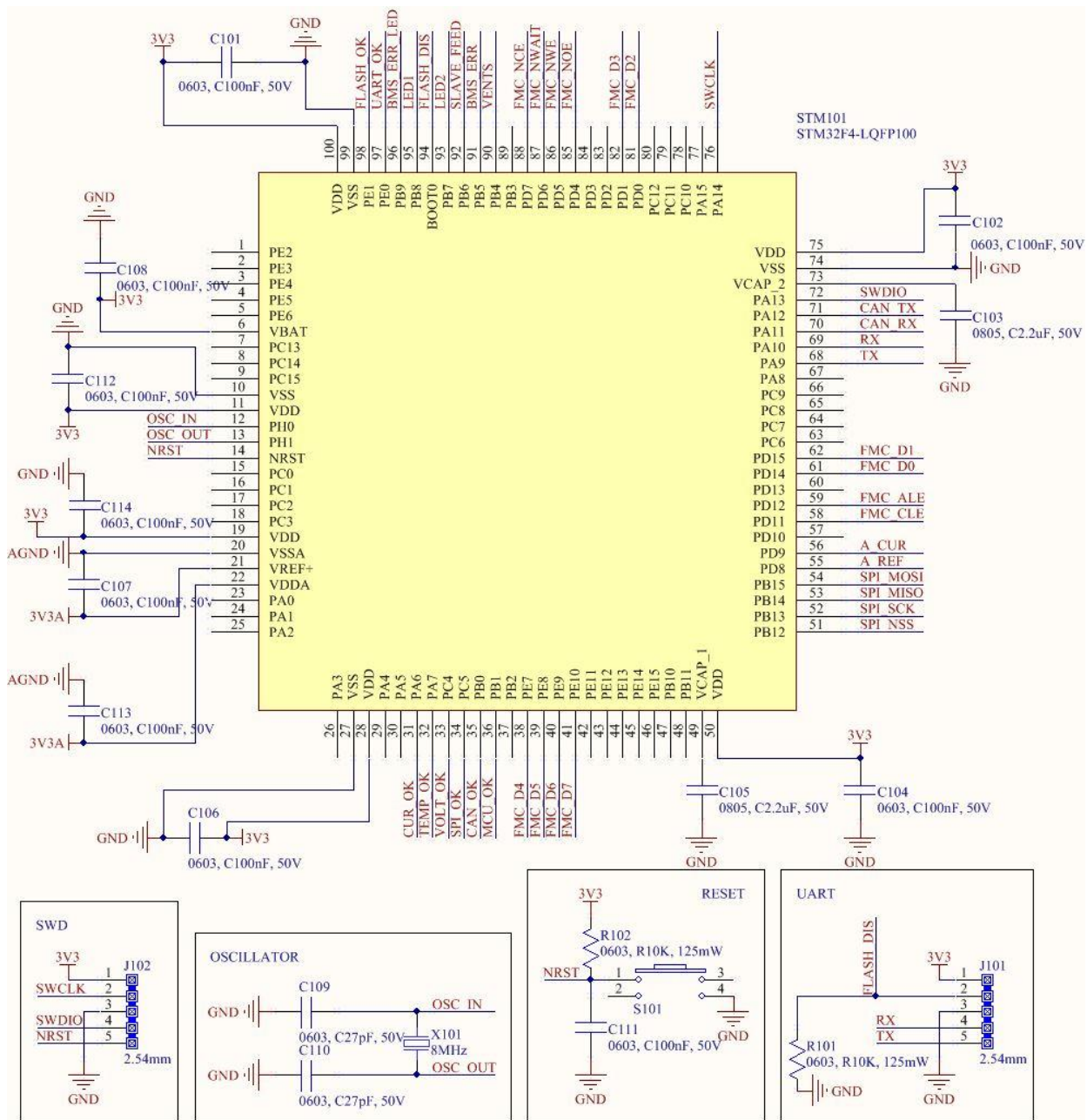
**Lisa 7: Akuhaldussüsteem ülema kinnituse analüüsi ekraanitõmmis
- pinged**



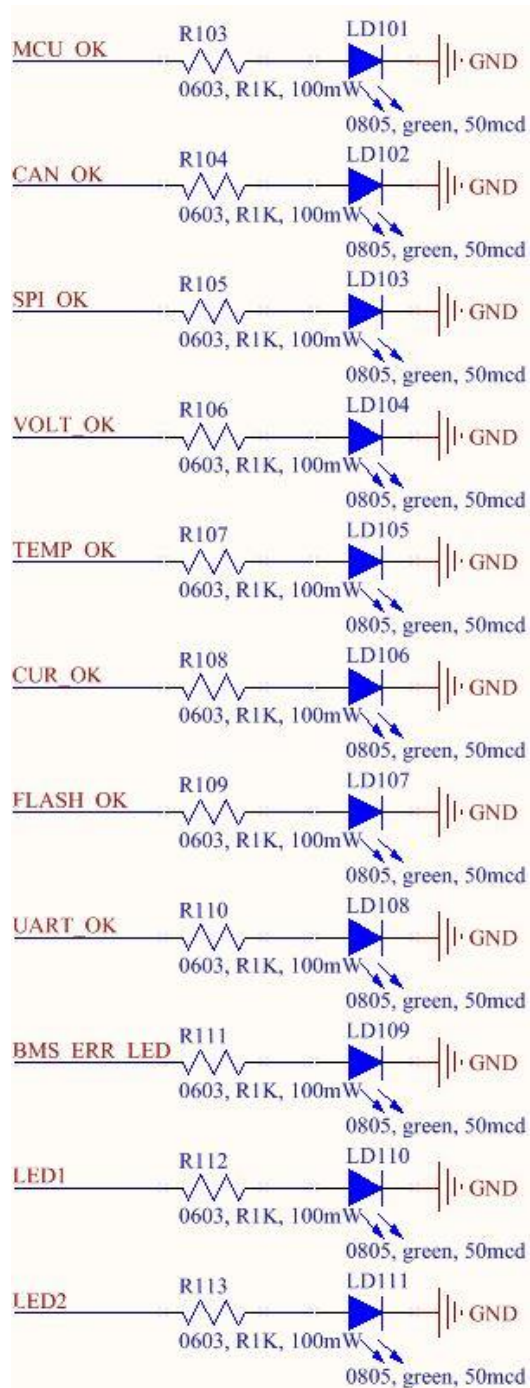
**Lisa 8: Ühendusplaatide toestusplaadi analüüsi ekraanitõmmis -
pinged**



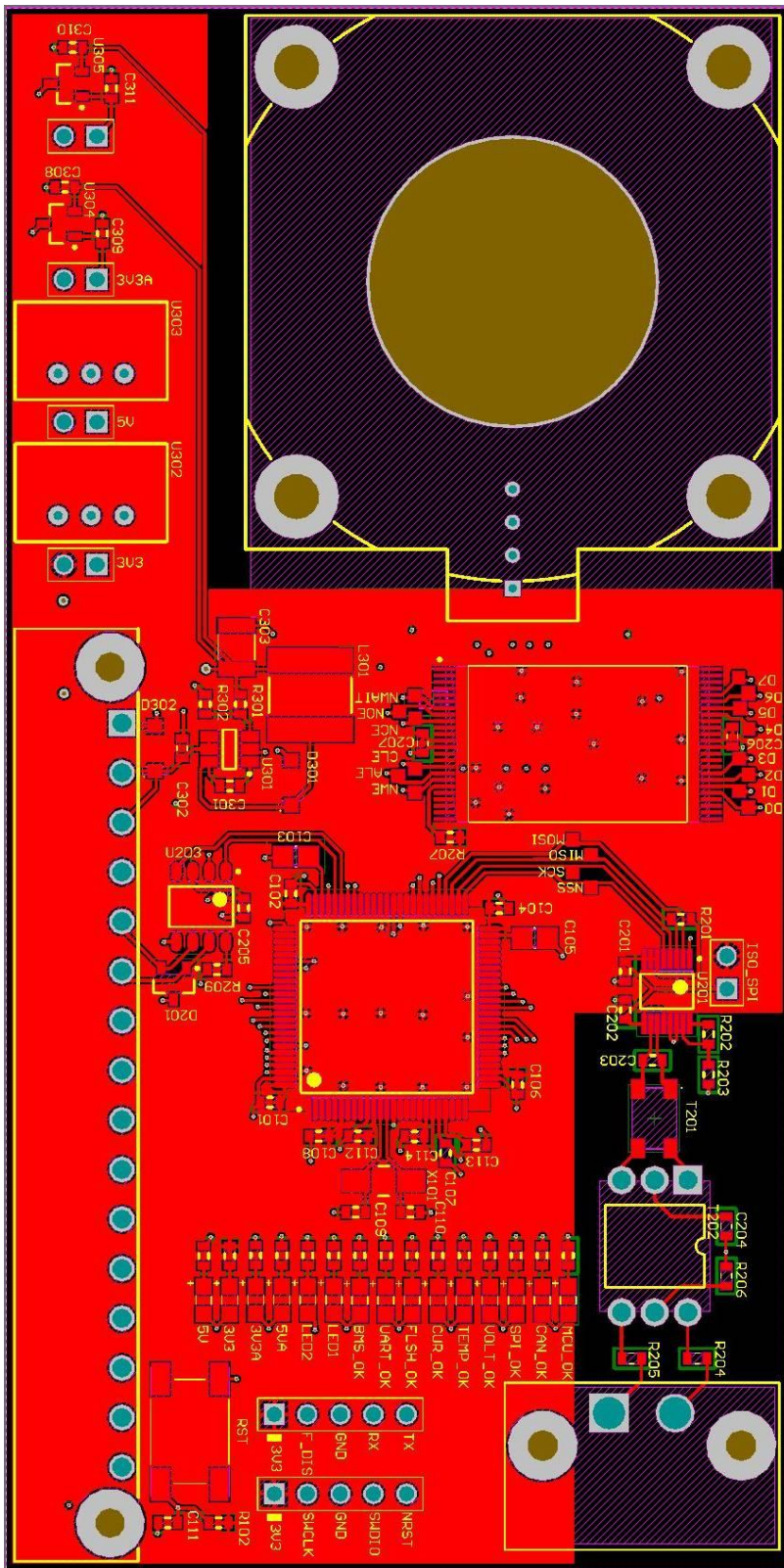
Lisa 9: Mikrokontrolleri ploki skeem



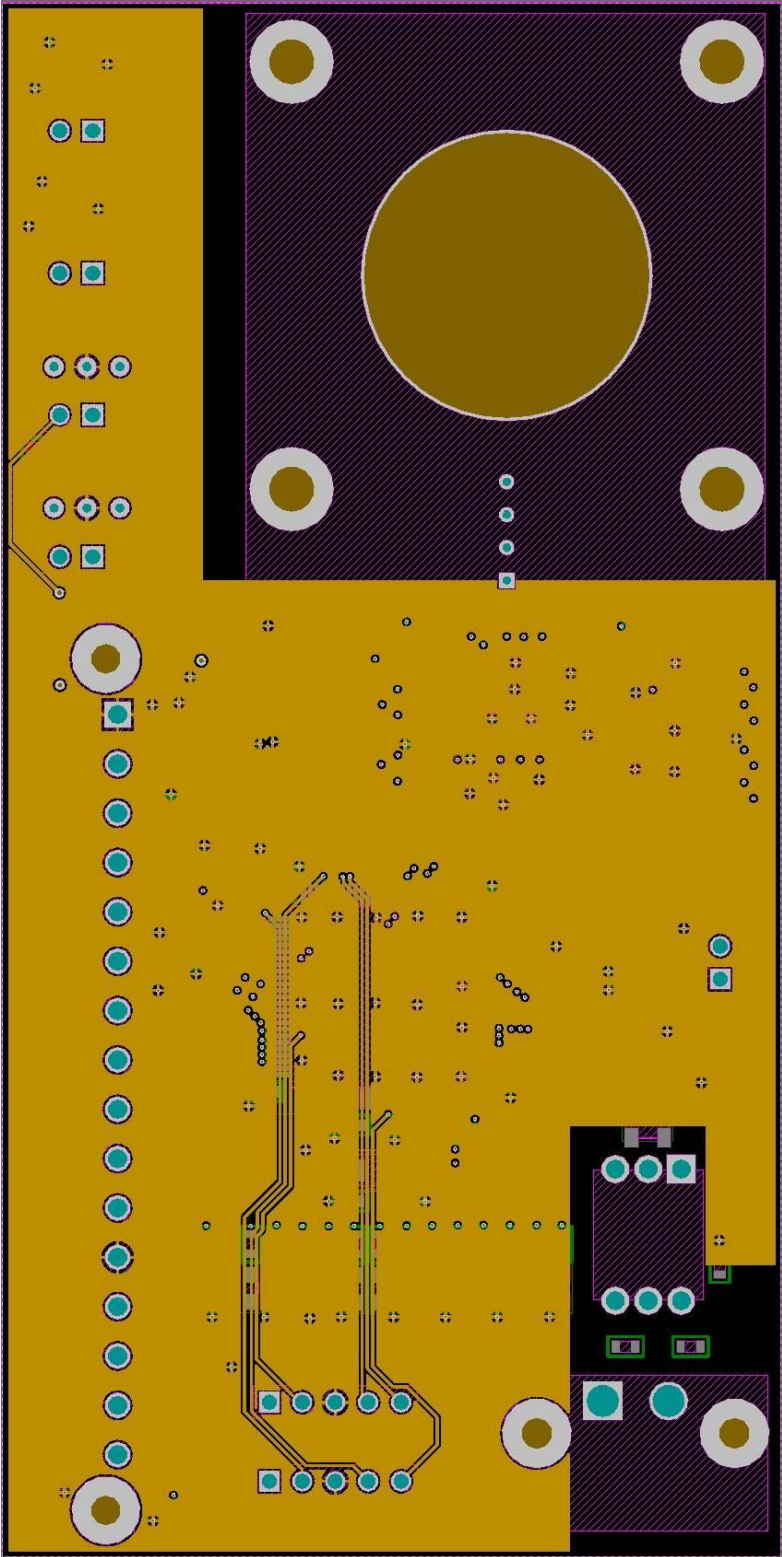
Lisa 10 Akuhaldussüsteemi ülema mikrokontrolleri poolt lülitatavad LEDid



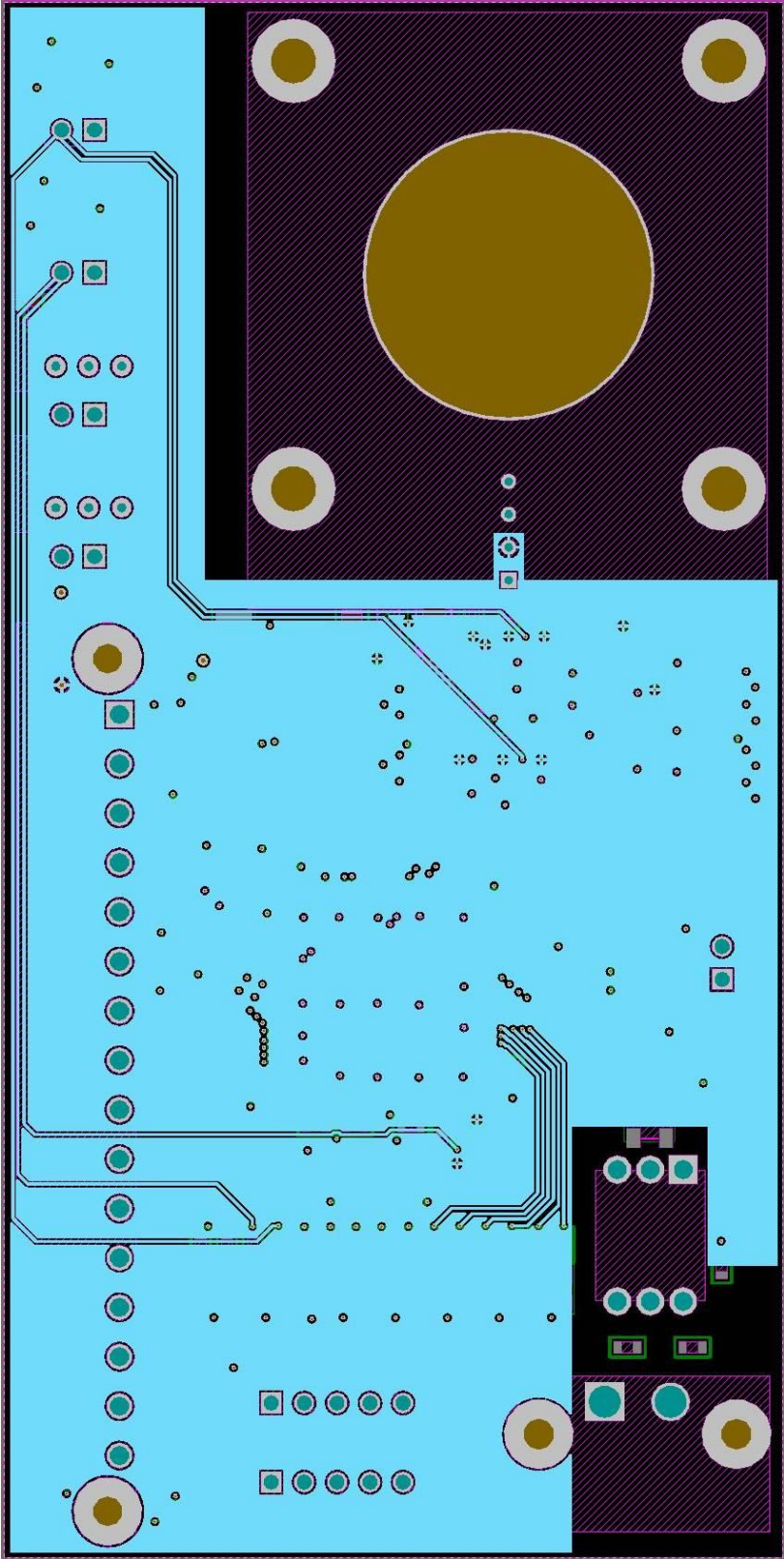
Lisa 13: Akuhaldussüsteemi ülema pealne kiht



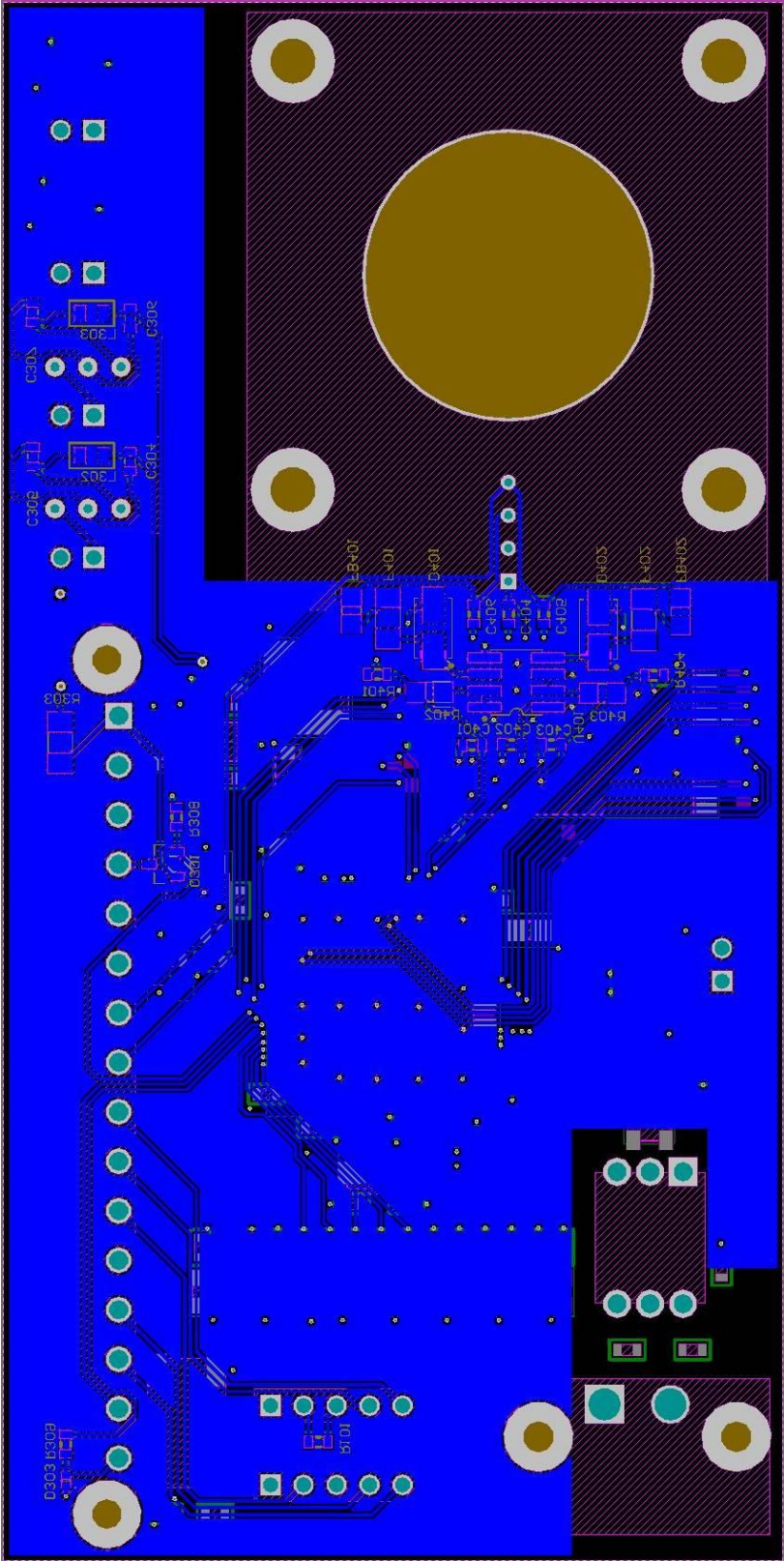
Lisa 14: Akuhaldussüsteemi ülema teine kiht



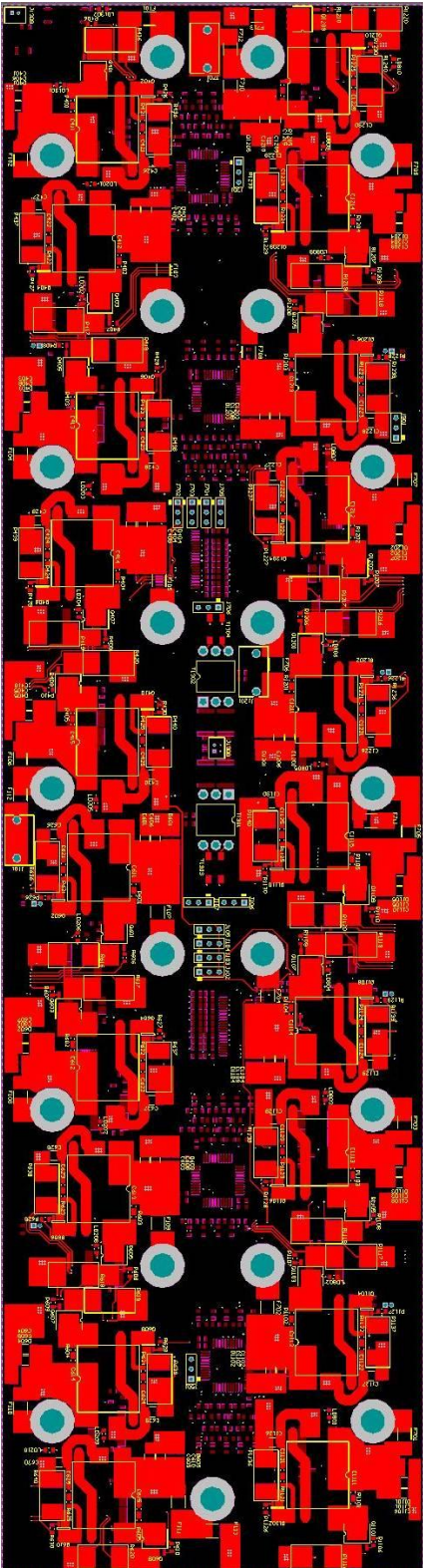
Lisa 15: Akuhaldussüsteemi ülema kolmas kiht



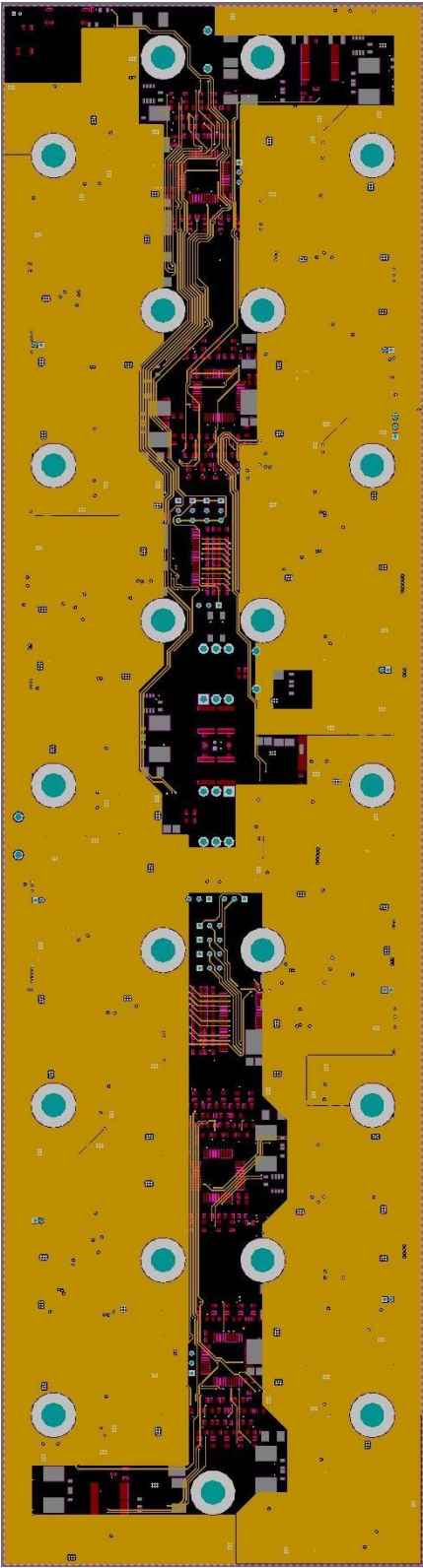
Lisa 16: Akuhaldussüsteemi ülema alumine kiht



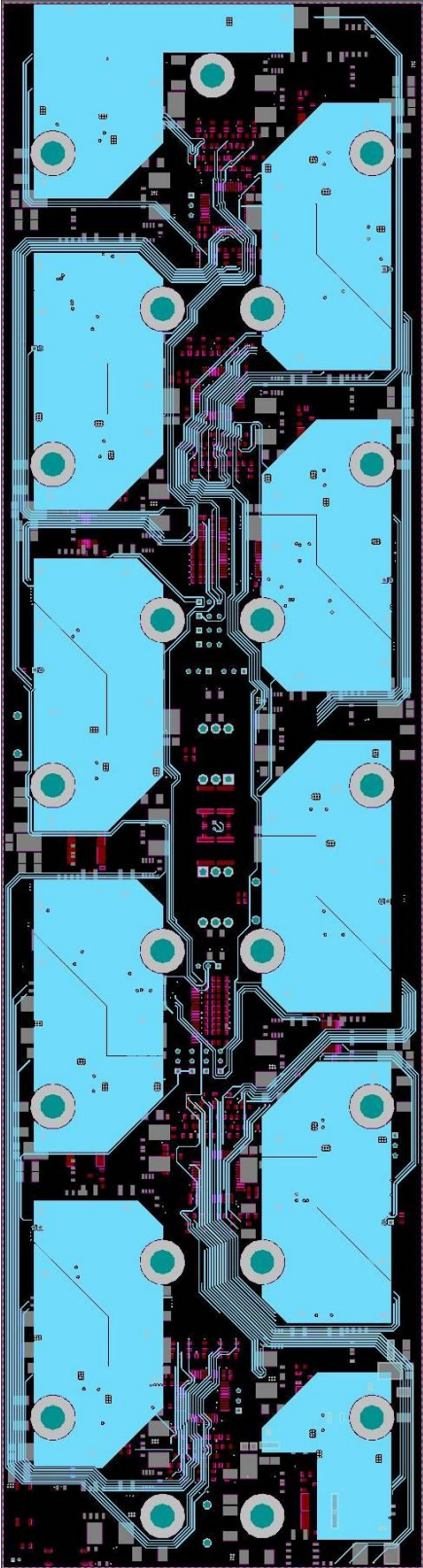
Lisa 17: Akuhaldussüsteem alama pealmine kiht



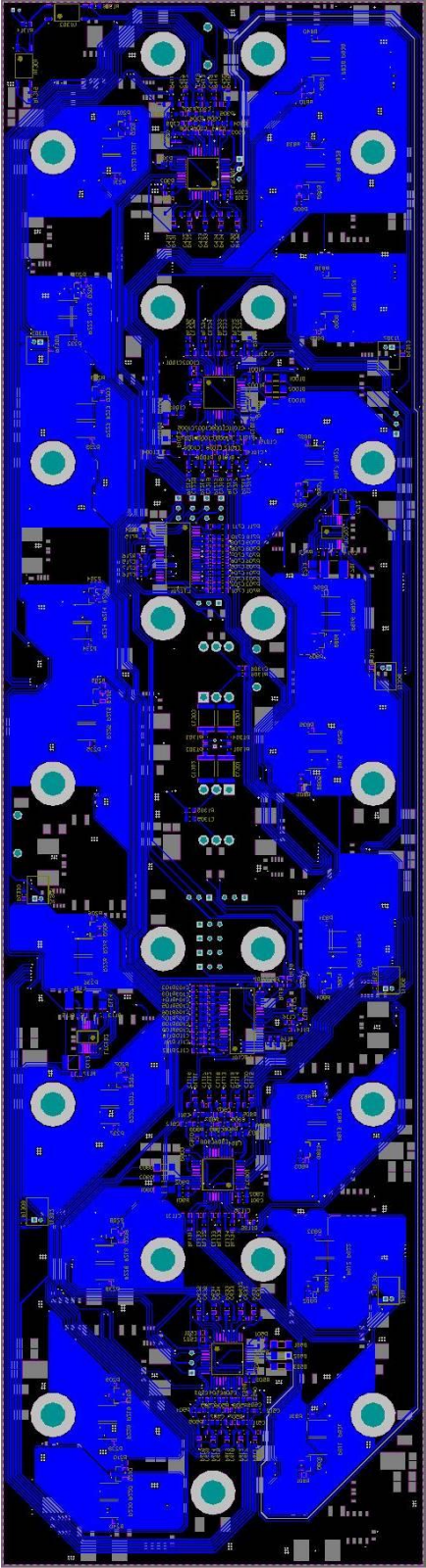
Lisa 18: Akuhaldussüsteem alama teine kiht



Lisa 19: Akuhaldussüsteem alama kolmas kiht



Lisa 20: Akuhaldussüsteem alama alumine kiht



Lisa 21: Akuhaldussüsteemi ülema elektroonikakomponentide nimekiri

Comment	Description	Designator	Quantity
0603, C100nF, 50V	Capacitor	C101, C102, C104, C106, C107, C108, C111, C112, C113, C114, C201, C202, C205, C206, C207, C308, C309, C310, C311, C402	20
0805, C2.2uF, 50V	Capacitor	C103, C105	2
0603, C27pF, 50V	Capacitor	C109, C110, C204	3
0603, C100pF, 50V	Capacitor	C203	1
0603, C0.15uF, 50V	Capacitor	C301	1
0603, C1uF, 50V	Capacitor	C302, C304, C305, C306, C307	5
1210, C22uF, 25V	Capacitor	C303	1
0603, C47pF, 50V	Capacitor	C401, C403	2
0603, C47nF, 50V	Capacitor	C404, C405	2
0603, C4.7nF, 50V	Capacitor	C406	1
6V, 5A	Dualunidirectional TVS	D201	1
30V, 0.5A	Schottky diode	D301, D302	2
4V	Bidirectional Transient Voltage Suppression	D303	1
5V, 35A	Zener diode	D401, D402	2
1206, 30V, 125mA	Fuse	F401, F402	2
FERRITE_BEAD	Ferrite bead	FB401, FB402	2
2.54mm	Pin header 1x5	J101, J102	2
2.54mm	Pin header 1x2	J201, J301, J302, J303, J304	5
2-PIN-PHOENIX_CONTACT		J202	1
16-PIN-PHOENIX_CONTACT		J305	1
L47µH, 760mA	Inductor	L301	1
L6.8µH, 400mA	Inductor	L302, L303	2
0805, green, 50mcd	Light emitting diode	LD101, LD102, LD103, LD104, LD105, LD106, LD107, LD108, LD109, LD110, LD111, LD301, LD302, LD303, LD304	15
60Vds, 20Vgs, 2.1Vth, 350mA	N-channel MOSFET	Q301	1
0603, R10K, 125mW	Resistor	R101, R102, R207, R302, R308, R401, R404	7
0603, R1K, 100mW	Resistor	R103, R104, R105, R106, R107, R108, R109, R110, R111, R112, R113, R209, R304, R305, R306, R307	16
0603, R2K, 63mW	Resistor	R201	1
0603, R2K8, 63mW	Resistor	R202	1
0603, R1K21, 100mW	Resistor	R203	1
0603, R22, 100mW	Resistor	R204, R205	2
0603, R10M, 63mW	Resistor	R206	1
0603, R95K3, 100mW	Resistor	R301	1
1206, R0, 100mW	Resistor	R303	1
0603, R10, 100mW	Resistor	R309	1
0805, R5K, 200mW	Resistor	R402, R403	2
TACTILE-SWITCH	SMD tactile switch, 6x6mm	S101	1
STM32F4-LQFP100		STM101	1
COMMON_MODE_CHOKE		T201	1
Pulse transformer		T202	1
LTC6820		U201	1
FLASH		U202	1
MCP2551		U203	1
BUCK_CONVERTER, LMR14206XMK		U301	1
LINEAR_VOLTAGE_REGULATOR		U302, U303	2
3V3, 100mA	LDO/linear voltage regulator	U304	1
5V, 100mA	LDO/linear voltage regulator	U305	1
800kHz, 16V, Rail to rail output	Dual Operational Amplifier	U401	1
CURRENT_SENSOR-HTFS 200-P		U402	1
8MHz		X101	1

Lisa 22: Akuhaldussüsteemi alama elektroonikakomponentide nimekiri

Comment	Description	Designator	Quantity
0603, C10nF, 50V	Capacitor	C101, C102, C103, C104, C105, C106, C107, C108, C109, C110, C111, C701, C702, C703, C704, C705, C706, C707, C708, C709, C710	21
0603, C0.1µF, 100V	Capacitor	C112, C711	2
1210, C2.2µF, 100V	Capacitor	C113, C712	2
0805, C22µF, 16V	Capacitor	C114, C713	2
0603, C0.22µF, 16V	Capacitor	C115, C714, C1004	3
0603, C1µF, 25V	Capacitor	C116, C117, C118, C715, C716, C717	6
0603, C4.7µF, 16V	Capacitor	C301, C305, C307, C309, C312, C501, C505, C507, C509, C511, C512, C901, C905, C907, C909, C911, C912, C1001, C1008, C1010, C1012, C1014, C1015	23
0603, C1µF, 16V	Capacitor	C302, C303, C304, C306, C308, C310, C502, C503, C504, C506, C508, C510, C902, C903, C904, C906, C908, C910, C1002, C1003, C1005, C1007, C1009, C1011, C1013	25
0603, C10µF, 10V	Capacitor	C311, C1006	2
1206, C100µF, 6.3V	Capacitor	C401, C402, C403, C404, C405, C406, C407, C408, C409, C410, C601, C602, C603, C604, C605, C606, C607, C608, C609, C610, C1101, C1102, C1103, C1104, C1105, C1106, C1107, C1108, C1109, C1110, C1201, C1202, C1203, C1204, C1205, C1206, C1207, C1208, C1209, C1210	40
0603, C470pF, 100V	Capacitor	C411, C412, C413, C414, C415, C421, C422, C423, C424, C425, C611, C612, C613, C614, C615, C621, C622, C623, C624, C625, C1111, C1112, C1113, C1114, C1115, C1121, C1122, C1123, C1124, C1125, C1211, C1212, C1213, C1214, C1215, C1221, C1222, C1223, C1224, C1225	40
0603, C2.2nF, 50V	Capacitor	C416, C417, C418, C419, C420, C616, C617, C618, C619, C620, C1116, C1117, C1118, C1119, C1120, C1216, C1217, C1218, C1219, C1220	20
1206, C2.2µF, 100V	Capacitor	C426, C427, C428, C429, C430, C626, C627, C628, C629, C630, C1126, C1127, C1128, C1129, C1130, C1226, C1227, C1228, C1229, C1230	20
0603, C470pF, 50V	Capacitor	C431, C432, C433, C434, C435, C631, C632, C633, C634, C635, C1131, C1132, C1133, C1134, C1135, C1231, C1232, C1233, C1234, C1235	20
1812, C33nF, 1kV	Capacitor	C1301, C1302, C1303, C1304	4
0603, C27pF, 50V	Capacitor	C1305, C1306	2
200V, 10A	Schottky diode	D401, D402, D403, D404, D405, D601, D602, D603, D604, D605, D1101, D1102, D1103, D1104, D1105, D1201, D1202, D1203, D1204, D1205	20
600V, 1.4A	Diode	D501, D502, D503, D901, D902, D903, D1001, D1002, D1003	9
40V, 2A	Schottky diode	D1004, D1005	2
SLAVE_MP		E101, E102, E103, E104, E105, E106, E107, E108, E109, E110, E111, E701, E702, E703, E704, E705, E706, E708, E709, E710, E711	21
12A, FAST ACTING	Fuse	F101, F102, F103, F104, F105, F106, F107, F108, F109, F110, F111, F112, F113, F701, F702, F703, F704, F705, F706, F707, F708, F709, F710, F711, F712, F713	26
1-PIN-PHOENIX_CONTACT		J101, J701, J1201	3
2mm	Pin header 1x3	J102, J103, J104, J105, J106, J107, J301, J501, J702, J703, J704, J705, J706, J901	14

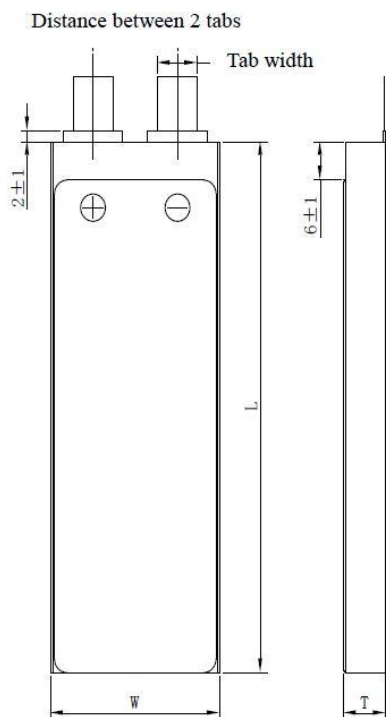
2-PIN-PHOENIX_CONTACT		J1301, J1302, J1303, J1304, J1305, J1306, J1307	7
2-PIN-PHOENIX_CONTACT		J1308, J1309	2
L3.3μH, 1.8A	Inductor	L101, L701	2
F0603, RED, 15mcd	Light emitting diode	LD201, LD202, LD203, LD204, LD205, LD206, LD207, LD208, LD209, LD210, LD801, LD802, LD803, LD804, LD805, LD806, LD807, LD808, LD809, LD810, LD1301, LD1302	22
LTC6804-2		LTC101, LTC701	2
LTC3990		LTC102, LTC702	2
LTC3300-1		LTC301, LTC501, LTC901, LTC1001	4
-60Vds, -10Vgs, -1.6A	P-channel MOSFET	Q201, Q202, Q203, Q204, Q205, Q206, Q207, Q208, Q209, Q210, Q801, Q802, Q803, Q804, Q805, Q806, Q807, Q808, Q809, Q810	20
100Vds, 20Vgs, 60A	N-channel MOSFET	Q401, Q403, Q405, Q407, Q409, Q601, Q603, Q605, Q607, Q609, Q1101, Q1103, Q1105, Q1107, Q1109, Q1201, Q1203, Q1205, Q1207, Q1209	20
100Vds, 20Vgs, 30A	N-channel MOSFET	Q402, Q404, Q406, Q408, Q410, Q602, Q604, Q606, Q608, Q610, Q1102, Q1104, Q1106, Q1108, Q1110, Q1202, Q1204, Q1206, Q1208, Q1210	20
0603, R100, 63mW	Resistor	R101, R102, R103, R104, R105, R106, R107, R108, R109, R110, R111, R112, R701, R702, R703, R704, R705, R706, R707, R708, R709, R710, R711	23
0603, R374K, 200mW	Resistor	R113, R713	2
0603, R1M, 63mW	Resistor	R114, R716	2
0603, R2K8, 63mW	Resistor	R115, R714	2
0603, R1K21, 100mW	Resistor	R116, R715	2
0603, R1K, 100mW	Resistor	R117, R712	2
0603, R2K, 63mW	Resistor	R118, R119, R120	3
0603, R3K3, 63mW	Resistor	R201, R202, R203, R204, R205, R206, R207, R208, R209, R210, R801, R802, R803, R804, R805, R806, R807, R808, R809, R810, R1314	21
2512, R18, 2W	Resistor	R211, R212, R213, R214, R215, R216, R217, R218, R219, R220, R221, R222, R223, R224, R225, R226, R227, R228, R229, R230, R811, R812, R813, R814, R815, R816, R817, R818, R819, R820, R821, R822, R823, R824, R825, R826, R827, R828, R829, R830	40
0603, R100, 125mW	Resistor	R231, R232, R233, R234, R235, R236, R237, R238, R239, R240, R831, R832, R833, R834, R835, R836, R837, R838, R839, R840	20
0603, R40.2K, 63mW	Resistor	R301, R501, R901, R1001	4
0603, R44.2K, 63mW	Resistor	R302, R502, R902, R1002	4
0603, R1K5, 100mW	Resistor	R303, R503, R903, R1003	4
0603, R0, 100mW	Resistor	R304, R305, R306, R307, R504, R505, R506, R507, R508, R904, R905, R906, R907, R908, R1007, R1008, R1009, R1010, R1011	19
0603, R20, 250mW	Resistor	R401, R402, R403, R404, R405, R601, R602, R603, R604, R605, R1101, R1102, R1103, R1104, R1105, R1201, R1202, R1203, R1204, R1205	20
0605, R5.1, 100mW	Resistor	R406, R407, R408, R409, R410, R426, R427, R428, R429, R430, R606, R607, R608, R609, R610, R626, R627, R628, R629, R630, R1106, R1107, R1108, R1109, R1110, R1126, R1127, R1128, R1129, R1130, R1206, R1207, R1208, R1209, R1210, R1226, R1227, R1228, R1229, R1230	40

0603, R20, 100mW	Resistor	R411, R412, R413, R414, R415, R431, R432, R433, R434, R435, R611, R612, R613, R614, R615, R631, R632, R633, R634, R635, R1111, R1112, R1113, R1114, R1115, R1131, R1132, R1133, R1134, R1135, R1211, R1212, R1213, R1214, R1215, R1231, R1232, R1233, R1234, R1235	40
R0.005, 1W	Resistor	R416, R417, R418, R419, R420, R616, R617, R618, R619, R620, R1116, R1117, R1118, R1119, R1120, R1216, R1217, R1218, R1219, R1220	20
0603, R18, 250mW	Resistor	R421, R422, R423, R424, R425, R621, R622, R623, R624, R625, R1121, R1122, R1123, R1124, R1125, R1221, R1222, R1223, R1224, R1225	20
R0.01, 1W	Resistor	R436, R437, R438, R439, R440, R636, R637, R638, R639, R640, R1136, R1137, R1138, R1139, R1140, R1236, R1237, R1238, R1239, R1240	20
0603, 6R8, 100mW	Resistor	R1012	1
0603, R22, 100mW	Resistor	R1301, R1302, R1303, R1304	4
0603, R10M, 63mW	Resistor	R1305, R1306	2
0603, R10K, 100mW	Resistor	R1307, R1308, R1309, R1310, R1311, R1312, R1313, R1315, R1316	9
Slave_transformer		T401, T402, T403, T404, T405, T601, T602, T603, T604, T605, T1101, T1102, T1103, T1104, T1105, T1201, T1202, T1203, T1204, T1205	20
Pulse transformer		T1301, T1302	2
COMMON_MODE_CHOKE		T1303, T1304	2
50mA input, 7V output, 2.5kV isolati	Phototransistor based optocoupler	U1301, U1302	2

Lisa 23: Väljavõte kasutatavate akuelementide andmelehest

3. 产品规格 SPECIFICATION

单颗电池规格 Specifications of single cell



◆ 标称容量 Typical Capacity①		5.2Ah
◆ 标称电压 Nominal Voltage		3.7V
◆ 充电条件 Charge Condition	最大电流 Max. continuous charge Current	10.4A
	峰值充电 Peak discharge current	20.8A(≤1 sec)
	电压 charge Voltage	4.2V±0.03V
◆ 放电条件 Discharge Condition	Max Continuous Discharge Current	182A
	Peak Discharge Current	208A(≤1 sec)
	Cut-off Voltage	3.0V
◆ 交流内阻 AC Impedance(mOHM)		≤2.0
◆ 循环寿命 【充电:1.0C,放电:35C】 Cycle Life 【CHA:1.0C,DCH:35C】		>100cycles
◆ 使用温度 Operating Temp.	充电 Charge	0℃~45℃
	放电 Discharge	-20℃~60℃
◆ 电芯尺寸 Cell Dimension	厚度 Thickness(T)Max	10.4±0.3mm
	宽度 Width(W)	42±0.5mm
	长度 Length(L)	127.5±0.5mm
	极耳间距 Distance between 2 tabs	18±1mm
◆ 极耳尺寸 Dimension of cell tabs	极耳宽度 Tab Width	12mm
	极耳厚度 Tab Thickness	0.2mm
	极耳长度 Tab Length	Max 35mm
◆ 重量 Weight(g)		128.5±2g
①标称容量: 0.5CmA,4.2V~3.0V@23℃±2℃ Typical Capacity:0.5CmA,4.2V~3.0V@23℃±2℃		