



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TUDENGIVORMELI AKUPAKI PROTOTÜÜP

PROTOTYPE OF FORMULA STUDENT BATTERY PACK

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Martin Viik

Üliõpilaskood: 155500MAHB

Juhendaja: Priit Põdra

Tallinn 2018

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 2018

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Martin Viik, 155500
Õppekava, peeriala: MAHB 02/13, Mehhatroonika
Juhendaja(d): Dotsent, Priit Põdra, 620 3269

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Tudengivormeli akupaki prototüüp

(inglise keeles) Prototype of Formula Student battery pack

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Erinevate tootmistehnicate analüüs akukasti mooduli korpuse disainile
2. Mooduli klemmi analüüs ja optimeerimine
3. Akupaki laadimise tarkvara edasiarendus

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tootmistehnoloogiate analüüs ja koostamismeetodi lahendus, klemmide analüüs	19.03.2018
2.	Konstruksiooni monteerimine ja ühenduste tootmine, tarkvara arendus	01.05.2018
3.	Töö vormistamine, trükkimine ja köitmine	25.05.2018

Töö keel: eesti keel Lõputöö esitamise tähtaeg: "25" mai 2018 a

Üliõpilane: Martin Viik "....."201....a
/alkiri/

Juhendaja: Priit Põdra "....."201....a
/alkiri

Konsultant:

"....."201....a

/alkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
SISSEJUHATUS	8
1 AKUKASTI MOODUL	9
1.1 Mooduli disainimisfaas.....	9
2 TEHNOLOOGIA VALIK.....	10
2.1 3D printeriga või laserpaagutusseadmega tootmine	10
2.2 Survevalu meetodil tootmine.....	11
2.3 Lehtmaterjalist tootmine.....	12
2.3.1 Laserlõikus	12
2.3.2 Vesilõikus	13
3 DETAILIDE OMAVAHELINE ÜHENDUS JA TUGEVUSE TESTIMINE.....	15
4 TOOTMISPROTSESS	16
4.1 Eeltöötlus.....	16
4.2 Monteerimine.....	17
4.3 Järeltöötlus.....	18
5 TOLERANTSID.....	19
6 ELEMENTIDE VAHELINE ÜHENDUS	20
6.1 Klemmi materjalivalik.....	20
6.2 Klemmi kuju analüüsimine.....	21
6.3 Klemmi ühendusviis	24
6.3.1 Poltliitega ühendamine	24
6.3.2 Alumiiniumkeevitus	24
7 ÜHENDUSTE TOOTMINE	25
7.1 Klemmide tootmine	25
7.2 Elementide sisse ladumine.....	25
7.3 Elementide terminalide parajaks lõikamine	26
8 TSAL TULI.....	27
8.1 Disainimisfaas	28
8.1.1 Korpus	28

8.1.2 Trükkplaat.....	29
9 AKUPAKI LAADIMISE TARKVARA ARENDUS	31
9.1 Eelneva laadimise tarkvaraga tutvumine	31
9.2 Tarkvara edasiarendus	31
10 OHUTUSANALÜÜS.....	33
10.1 Ohutusvarustus	33
11 PROJEKTI HINNAKALKULATSIOON.....	34
11.1 Majanduslik analüüs	34
KOKKUVÕTE	35
SUMMARY	36
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	37
LISAD	39
LISA 1. Akupaki laadimise tarkvara algoritm.....	39

EESSÕNA

Lõputöö on valminud koostöös Formula Student Team Tallinn meeskonnaga. Tehtud töö valmi peamiselt Tudengivormeli ruumides TTÜs. Sooviksin tänu avaldada projekti valmimisele panuse andmisel Kaarel Värki, Markus Koertit ja Martin Ploomi. Samuti tahaksin tänada ka juhendajat Priit Põdrat.

Lõputöö eesmärk on luua Team Tallinna 2018 aasta vormelile kvaliteetne ja kerge akupaki prototüüp. Akupaki prototüüp hõlmab mooduli konstruktsiooni valmistamist, klemmide disainimist ja tootmist, TSAL tule disaini ning akupaki laadimise tarkvara arendust.

Võtmesõnad: lehtmaterjal, vesilõikus, temperatuuri analüüs, TSAL, CC-CV

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

132s2p – 132 jadamisi 2 paralleelselt i.k. *132 series 2 parallel*

3D – kolme dimensiooniline

CAD – i.k. Computer Aided Design

CAN – i.k. Controller Area Network

CC-CV – i.k. Constant Current – Constant Voltage

CNC – i.k. *Computer Numerical Control*

GLV – Maandatud madalpinge i.k. *Grounded Low Voltage*

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

Li-ion – Liitiumioon i.k. *Lithium ion*

PP – Polüpropüleen i.k. Polypropylene

PVC – Polüvinüülkloriid i.k. Polyvinyl chloride

THT – i.k. *Through Hole Technology*

TS – kõrgepinge i.k. *Tractive System*

TSAL – i.k. *Tractive System Active Light*

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

USB – i.k. *Universal Series Bus*

$\Phi_{v(lm)}$ - valgustugevus lumenites

SISSEJUHATUS

Tudengivormeli võistlus on ülemaailmne disainimise võistlus, kus meeskonnad arendavad oma vormelit septembrist kuni järgmise aasta juunini. Suvel toimuvad võistlused, kus saavad meeskonnad oma disainitud lahendused proovile panna. Samamoodi on ka antud projekti tehtud alates septembrist. Team Tallinna meeskonnas keskendutakse üldjuhul septembrist jaanuarini disainimisele ja jaanuarist alates tootmisele. See töö keskendubki rohkem teisele poolele ehk tootmisele.

Lõputöö eesmärk on luua Team Tallinna 2018 aasta vormelile kvaliteetne ja kerge akupaki prototüüp. Akupaki prototüüp hõlmab mooduli konstruktsiooni valmistamist, klemmide disainimist ja tootmist, TSAL tule disaini ning akupaki laadimise tarkvara arendust. Ülesandeks on mooduli korpuse puhul leida lahendus võimalikult tugeva ja täpse konstruktsiooni jaoks, klemmide puhul leida võimalikult kerge ja samas väikese takistusega disain ning tarkvara poole pealt automatiseerida laadimisprotsess.

Töös analüüsitakse erinevaid tootmisvõimalusi mooduli korpusele. Tuuakse välja iga tootmismeetodi eelised ja puudused. Konstruktsiooni katsetatakse ja vajadusel kohandatakse. Moodulitele ei ole määratud reeglitega kindlat tugevusele vastupidavuse nõuet. Seega peab moodul vastu pidama vähemalt enda raskusjõule. Disainimisel on võetud antud raskusjõud varuga ning moodul peab disaini järgi vastu, mis aga vajab ka reaalses elus valideerimist.

Moodulis paiknevad elemendid on ühenduses ise disainitud klemmidega. Klemmide disainimisel tuleb järgida võistluste poolt sätestatud reegleid. Klemmi omaduste teada saamiseks tuleb teha analüüs, mis näitab kus on suuremad temperatuurid ja kui kuumaks võib klemm maksimaalse voolu puhul minna.

Akupaki laadimine toimib laadija abil, mida peab hetkel manuaalselt juhtima ning peab pidevalt pilku peal hoidma laadimisprotsessil. Laadimisprotsess Li-ion akudel toimub CC-CV meetodil, kuid laadijas olev toiteplokk ei võimalda anda välja konstantset pinget. Laadimise hõlbustamiseks tuleks automatiseerida protsess, mis hetkel toimub manuaalselt.

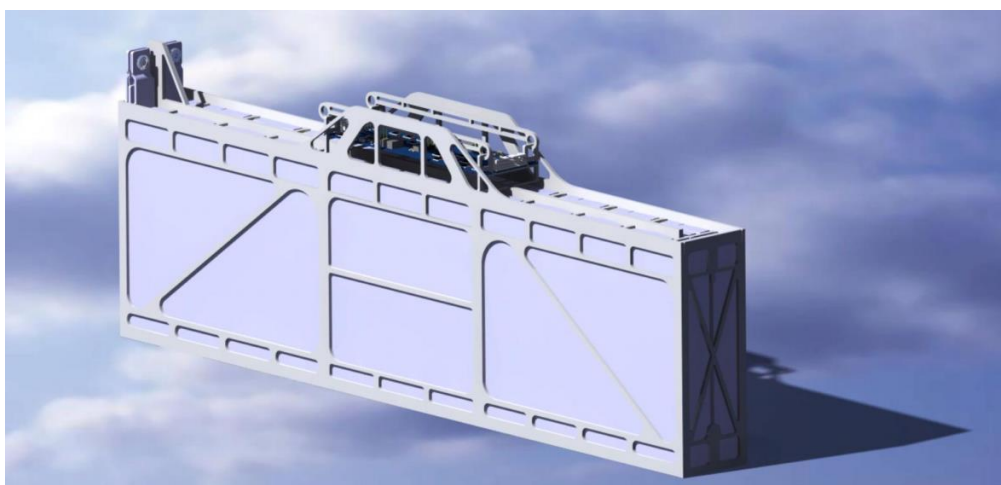
1 AKUKASTI MOODUL

Akukasti moodulit ehitatakse prototüüpvormeli jaoks, mis kannab nime FEST 18. Vormeli ehitust alustati 2017 aasta septembris ja valmib kuni võistlusteni, mis algavad juunis. Septembrist jaanuari alguseni toimub disainimisfaas, kus mõeldakse läbi auto ehitus ja disainitakse see arvutis valmis. Jaanuarist peab iga tiimiliige hakkama oma disaini tootma. On ka kaks valmimistähtaega, mida järgitakse iga-aastaselt. Esiteks peab vormel ratastele saama 1. märtsiks ja sõitma peab 1. aprilliks. Edasi toimub vormeli testimine, kus saab näha, kuidas disainitud lahendus vastu peab. Samad tähtajad kehtivad ka moodulile ehk kuni septembrist jaanuarini disainiti moodul arvutis ning edasi hakati tegelema tootmisega.

1.1 Mooduli disainimisfaas.

Disainimisfaasis leiti moodulisse minevate elementide arv ning vajaliku pinge saamiseks moodulite arv. Korpus loodi CAD tarkvaras, milleks oli CATIA V5. Selle abil tehti ka analüüsid ning optimeerimised. Analüüsiga sai selgeks, et moodul peab vastu talle rakendatud raskusjõududele. Elementide vahele jäeti vahe, kust pääseks õhk liikuma ja oleks võimalik jahutada neid sõidu ajal. Lõpptulemuseks saadi korpus, mis pidas vastu jõududele ja oli võimalikult kerge (joonis 1) [1].

Mooduli materjali valik toimus peamiselt plastide seast. Valitud materjaliks sai PP, mille põhjenduseks oli peamiselt väike materjali tihedus. Kuna PP on painduv materjal, oli tarvis teha ka moodulile läbipainde analüüs PP parameetritega [1].



Joonis 1. Disainifaasi tulemus ehk lõplik mooduli disain [1]

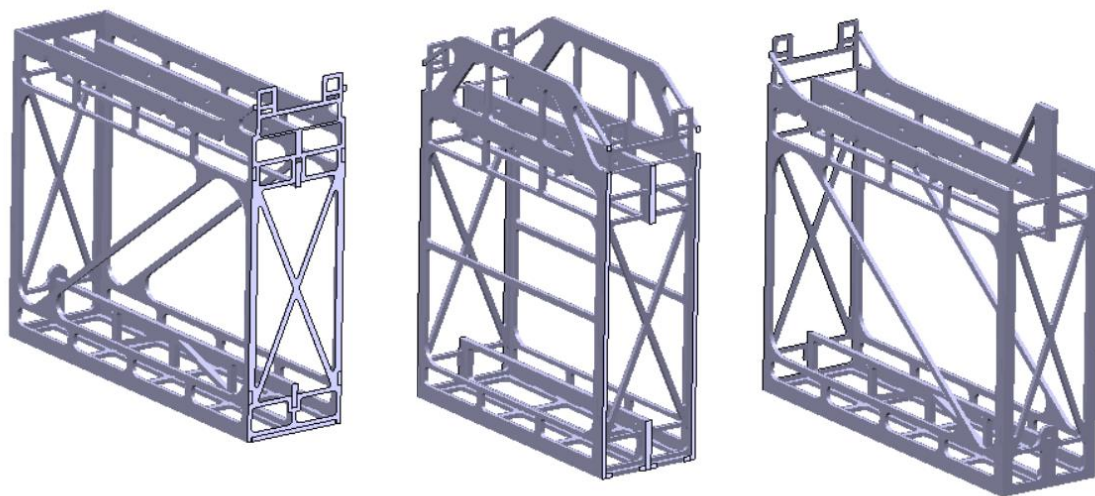
2 TEHNOLOOGIA VALIK

Tootmisel tuleb arvesse võtta disainimise käigus selgeks saanud mooduli korpuse mõõte. Kuna tegemist on pika mooduliga, siis on võimaluste arv piiratud.

2.1 3D printeriga või laserpaagutusseadmega tootmine

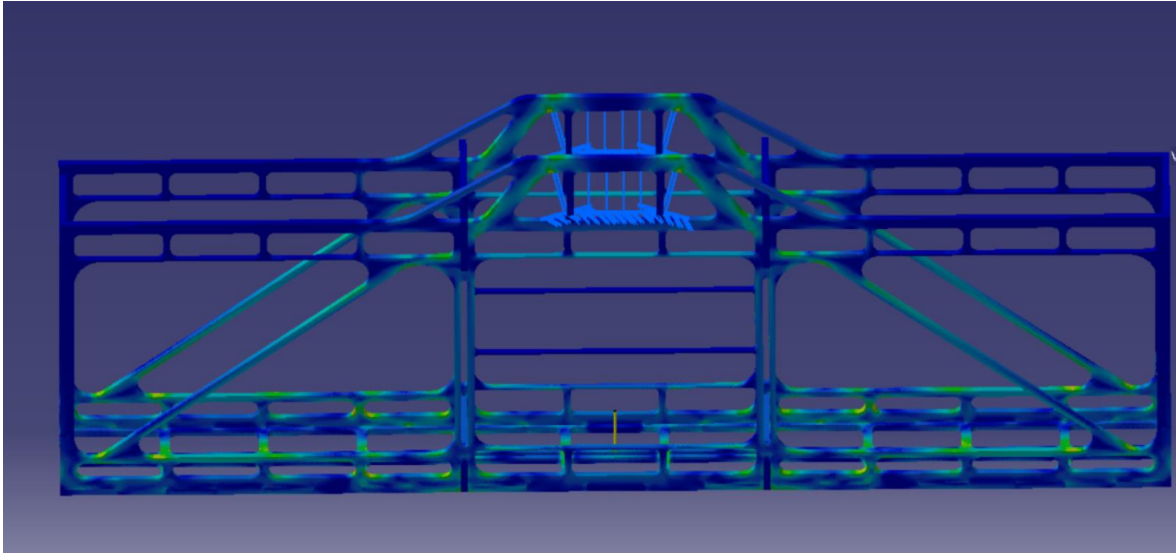
Kõige lihtsam oleks 3D printeriga lasta printida mooduli korpused ja suurem osa tööst olekski tehtud. Kahjuks on 3D printeriga printimisel mõõdud piiratud. Tüüpilise filament-tüüpi 3D printeriga on võimalik printida maksimaalselt 200 x 200 x 185 (mm) suuruseid detaile [2]. Laserpaagutusega oleks võimalik valmistada maksimaalselt 190 x 230 x 315 (mm) suuruseid detaile [3]. Mooduli pikkuseks on aga 477,5 mm, mis ületab ilmselgelt printeri ja laserpaagutusseadme tööala mõõtmeid.

3D printeriga oleks võimalik printida ka kolmes osas (joonis 2).



Joonis 2. Kolme osasse jaotatud mooduli korpus

Osade kokku liitmine käiks atsetooniga, mis jätkaks väidetavalt äärmiselt tugeva ja vähemärgatava liitekohaga [2].



Joonis 3. Mooduli terviklik analüüs [1]

Mooduli analüüsi pildilt on näha, et äärmised otsad vajuvad moodulil veidi allapoole, kui keskel ja moodul paindub kuna mooduli tõstepunktid asuvad mooduli keskel (joonis 3). Reaalses elus on paine väga väike, kuid paine on ikkagi olemas. See tähendab aga, et liitekohad toimiksid samuti paindele. Liitmikud on praktikas tavaliselt nõrgemad kui puhas materjal ja tsüklilisel koormusel võivad just liitmikud järgi anda.

2.2 Survevalu meetodil tootmine

Kõige kvaliteetsema tulemuse saakski just survevalu meetodil. Mooduli materjalivalikuks oli PP, mis oleks ka ideaalne survevalu tootmiseks, kuna PP on üsna madala sulamistemperatuuriga (165 °C [4]).

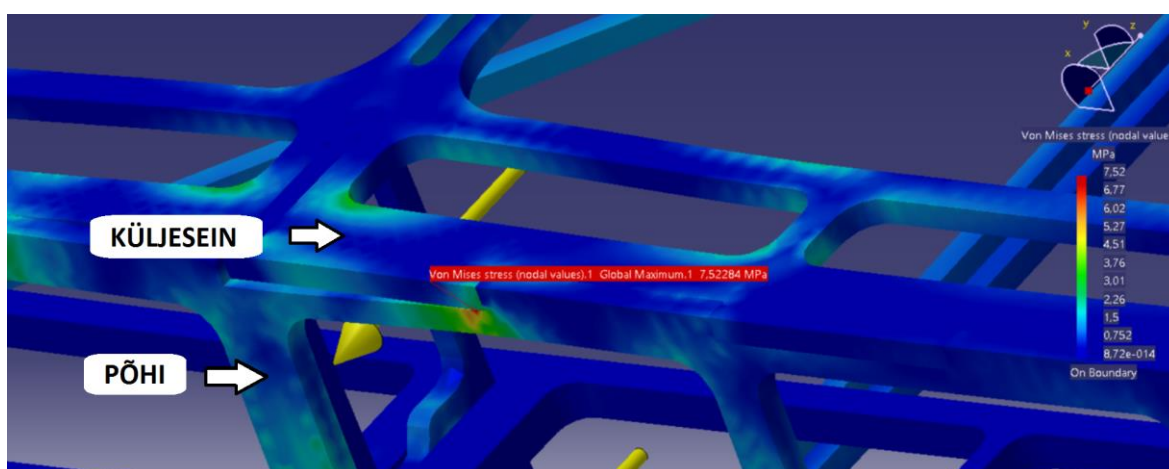
Survevalu kasutatakse tavaliselt suurtemates tootmistes, kus detaile samasugust detaili toodetakse ühe ja sama vormiga. Soovitatakse kasutada survevalu meetodit, kui on plaanitav detailide kogus üle 300 [5]. Mooduleid aga on 6, mida on nähtavasti vähem.

Vormid tuleks freesida CNC pingis, kuid soovitav on kõigepealt 3D printeriga teha prototüüpvormid, teha parandusi ja korrata sama protsessi kuna enam ei ole vormis vigu ja saab selle tugevamast materjalist välja freesida [5].

Antud projekti jaoks oleks survevalu meetod ebaefektiivne ning selletõttu ei võetud sellist tootmise meetodit kasutusele.

2.3 Lehtmaterjalist tootmine

Mooduleid on võimalik toota lõigates iga sein eraldi välja ja hiljem need kokku liita. See tähendab, et seinad tuleks välja lõigata lehtmaterjalist. Antud juhul saaks mooduli pikema seina täismöödus välja lõigata ja ei peaks moodulit poolitama hakkama. Seinadele saab teha tapid, et oleks rohkem liitepinda ja seinad seisaks struktuursemalt koos. Kõige kriitilisemaks kohaks tuleks ilmselt põhi, kuna elementide toetumisel põhjale töötavad põhja ja külgliseinte liitekohad nihkele ja paindele (joonis 4).



Joonis 4. Põhja ja seina liitekoht [1]

Kui võtta võrdluseks kolmes osas 3D printitud detailide liitmise ja seinte kokkuliitmise, siis viimasel variandil oleks rohkem liitepinda kriitilisemates liitekohtades ehk põhja ja külgliseinade vahel. Teiseks on liitekohtades jõudude jaotus ühtlasem. Seetõttu osutus tehnoloogia valikuks lehtmaterjalist seinte välja lõikamine ja hiljem kokku liitmine.

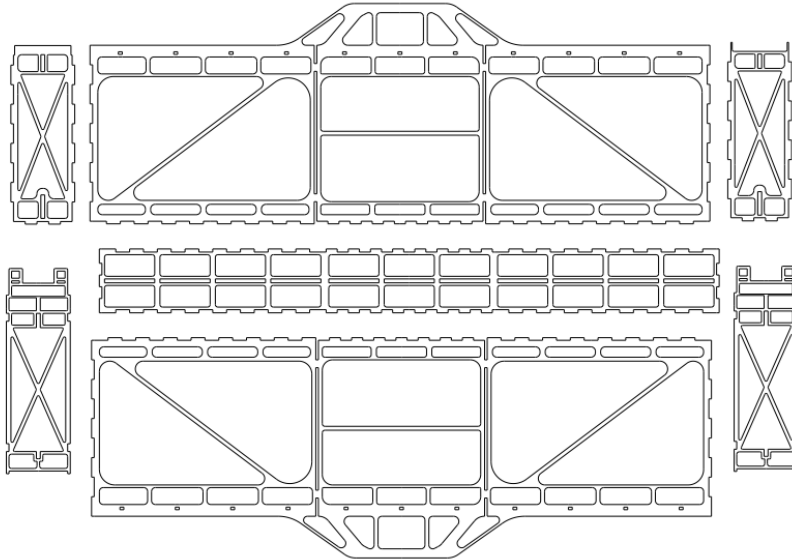
Lõikamise meetodeid on erinevaid. Kaks kõige mõistlikumat lõikust plastiku lõikamiseks on vesilõikus ja laserlõikus.

2.3.1 Laserlõikus

Nagu nimigi ütleb, kasutab laserlõikus detailide välja lõikamisel laserkiirt, ning sulatab kõrgel temperatuuril laserkiirega materjali lõikejoone [6]. Üldjuhul saab hästi lõigata plastikut laserlõikusega nii, et lõikejoon jääb puhas ja tolerantsid on üsna täpsed. Disainimisfaasis osutus valitud materjaliks PP just väikese tiheduse ja heade isoleerivate omaduste tõttu[1]. PP ehk polüpropüleenil sulamistemperatuur on väga madal, täpsemalt 165 °C [4], mistõttu on seda raske lõigata, kuna materjal lihtsalt hakkab sulama ja tulemus on ebakvaliteetne.

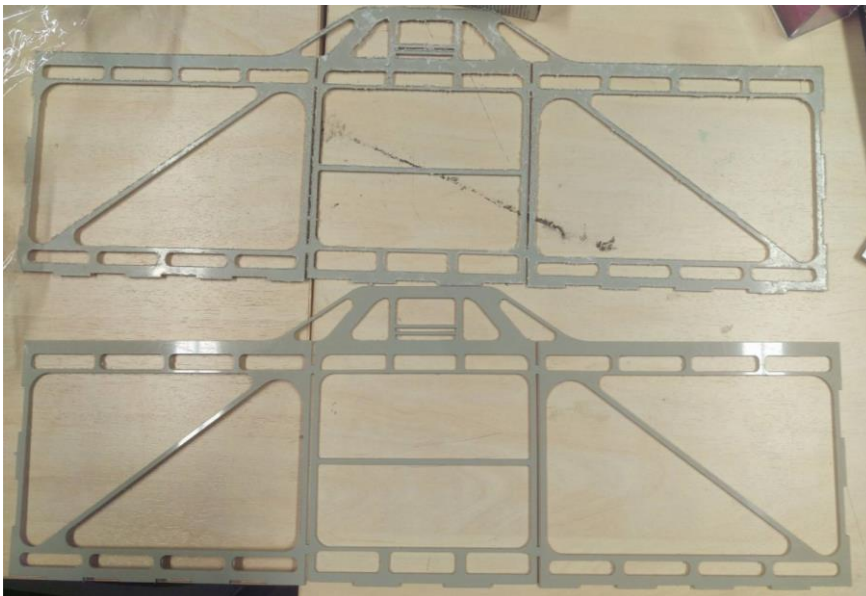
2.3.2 Vesilõikus

Võrreldes laserlõikusega, ei eralda vesilõikus lõikamisel soojust ning seetõttu ei saa materjal sulada [7]. Iseenesest toimub lõikamine samamoodi ühel tasapinnal. Tootmiseks on vajalikud joonised, kus on märgitud ainult lõikejooned (joonis 5). Kui lisada mõõte, siis lõikab vesilõikus automaatselt ka need materjali sisse.



Joonis 5. Vesilõikuse tööjoonis [1]

Peale lõikust oli märgata, et lõikejoone alumine serv oli „karvane“, kus narmendasid materjali jäägid. Üldjuhul oli kvaliteet hea. (joonis 6).



Joonis 6. Vesilõikusest tulnud detailid

Lõikejoonel oli märgata ka, et endine sile ja läikiv plastiku pind on muutunud krobelineks ja mattjaks (joonis 7).



Joonis 7. Detailide lõikejoone krobeline pind

Positiivse poole pealt on see-eest liitepinda krobelisuse tõttu rohkem ja krobelisus on piisavalt miniatuurne ning ei hakka silma.

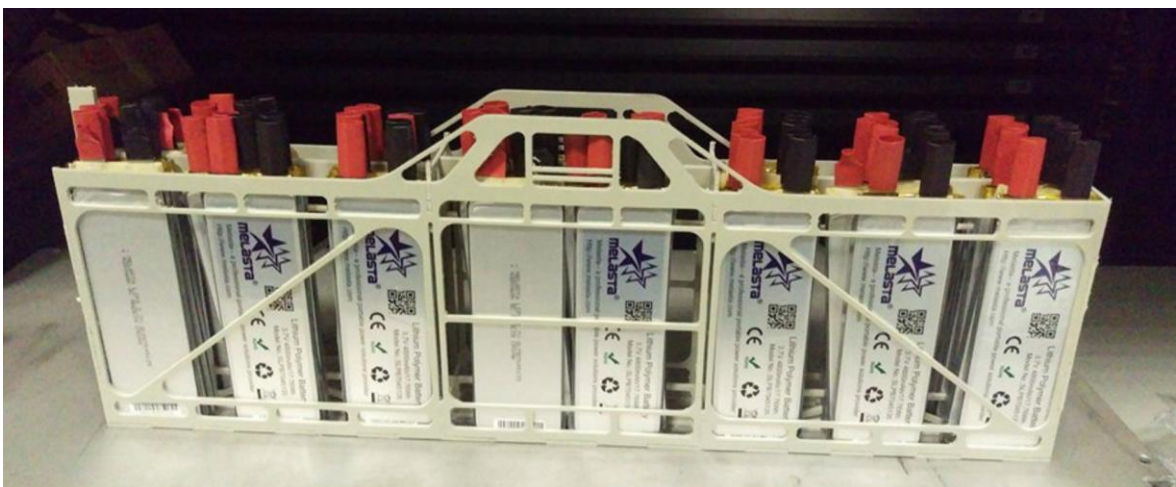
3 DETAILIDE OMAVAHELINE ÜHENDUS JA TUGEVUSE TESTIMINE

Reeglite järgi ei ole nõutud katsekehade tegemist moodulitele. Üldjuhul on moodulid võimalikult kerged ning peavad ainult elementide kaalu vastu pidama. Seetõttu ei kasutatud antud töös standardset lähenemist tõmbeteimidega, vaid testiti kogu mooduli ligikaudset vastupidavust.

Testiti kahte erinevat liimi, milleks olid Loctite 3038 ja Loctite 3090. Esialgelt testiti 3038, mis on mõeldud PP materjalide kokku liimimiseks [8]. Antud liimiga liimitud moodul tuli väga elastne, liim meenutas rohkem silikooni ja ei tundunud väga struktuurne. Samuti ei ole kirjeldatud ka andmelehes liimi elektrilisi omadusi, mida võib vaja minna elektriohutuse dokumendis. Teisalt testiti 3090 liimi, mis on sarnane üldtuntud Loctite Superattakile. Liim oli tugev ja pidas vastu ka kergele paindele. Seega sai valitud liimiks Loctite 3090, mis on mõeldud erinevatele plastidele [9]. Pindade paremaks haakumiseks karestati siledad liitepinnad ja lisati ka aktivaatorit Loctite 770.

Tervikliku mooduli testimise ajal ei olnud veel kohale jõudnud elemendid, mis oleksid pidanud tegelikult moodulisse minema. Seega tuli kasutada varasemate aastate elemente. Antud testimisel kasutati 2017. aasta vormeli elemente. Elemendid olid teist mõõtu ning maksimaalne kaal, mis saavutati elementidega oli 5,2 kg (joonis 8). Projekteeritud moodulid pidid aga kandma 5,6 kg. Testiti ka terasest toorikutega, mis olid paigutatud ebaühtlaselt, kuid kokku andsid 6 kg.

Katsel ei testitud ainult elementide raskuse tõstmist, vaid tehti läbi kahe minutiline tsükliline koormus elementidele lähedase raskusega. Nii varasemate elementidega testimisel kui ka terasest toorikutega testimisel ei nähtud ühtegi liimist lahti tulnud kohta, seega võis mooduli tugevuse valideerituks lugeda.

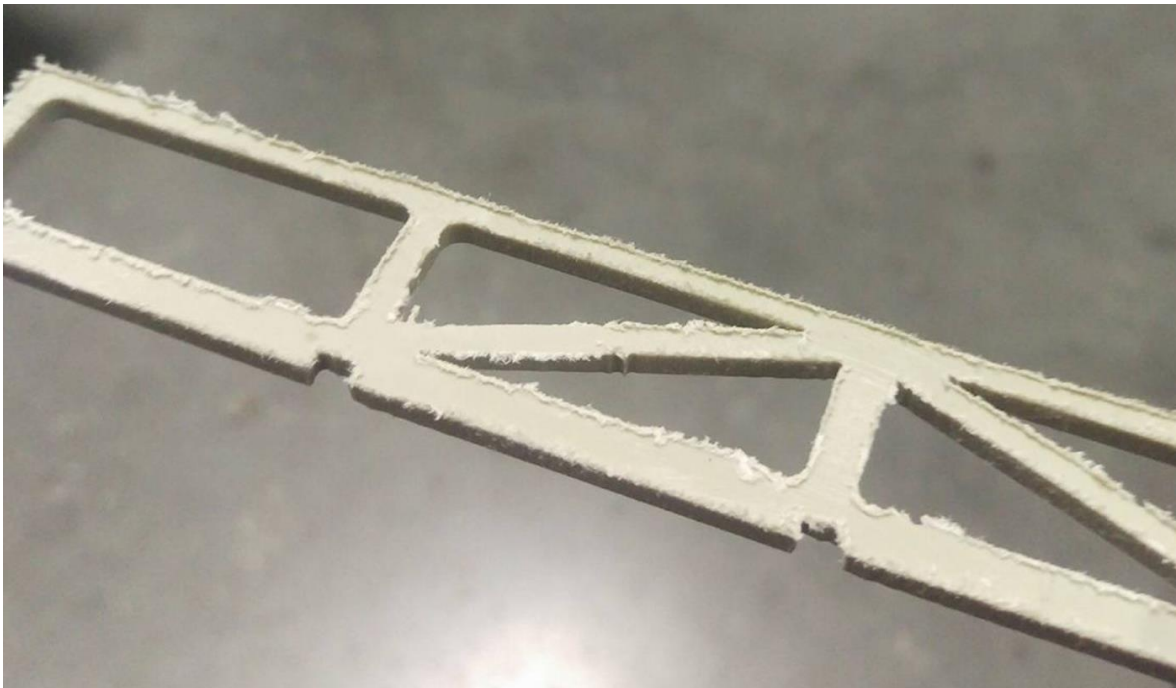


Joonis 8. Kogu mooduli raskuse testimine

4 TOOTMISPROTSESS

4.1 Eeltöötlus

Kui detailid on lõikusest valmis, on vaja enne monteerimist need töödelda. Põhiliseks tööks on narmendate servade maha lihvimine, mis võtab üsna palju aega (joonis 9). Pikkuseks oli seda kuni 1 mm, mis tähendab, et kui liimida ilma töötluseta, siis on võimalik, et pool seina paksusest ei saa korralikult kokku liimitud. Narmendav osa võib jääda ülemise ja alumise liimitava detaili vahele.



Joonis 9. Vesilõikuse jääknähud

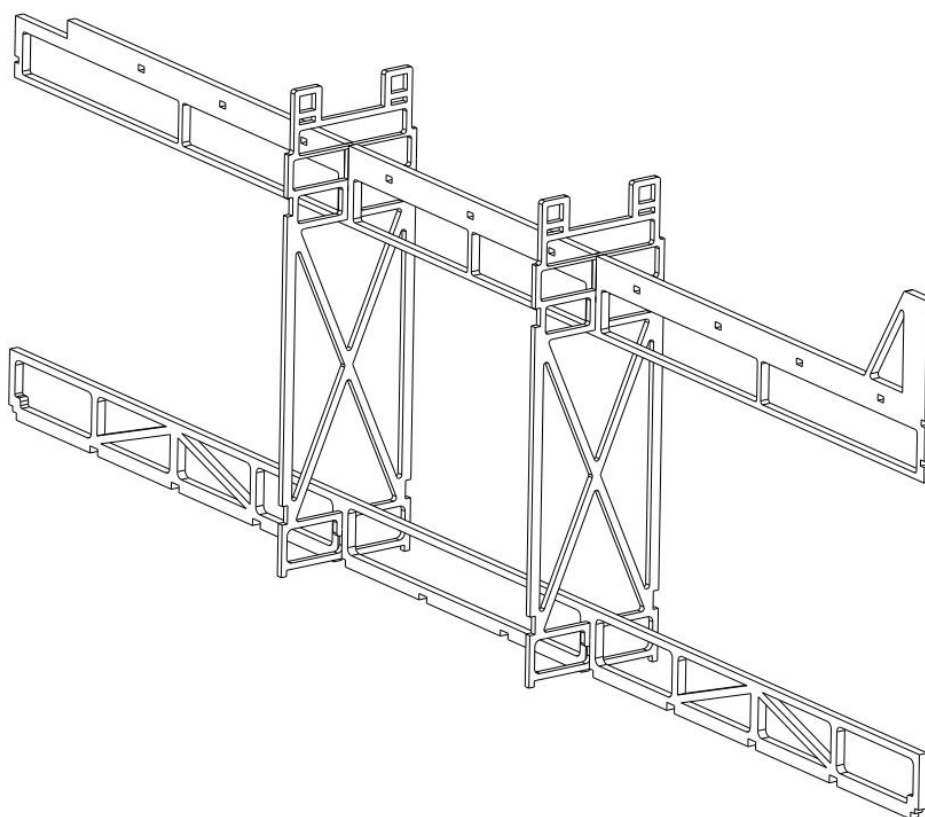
Lõikamisest tekkinud jäägi eemaldamiseks oli kõige efektiivsem kasutada kipsinuga, mis oli jäik aga samas ei lõiganud materjali sisse. Kitsamates kohtades sai kasutada liivapaberit.

Lihvimine ise on väga aeglane tegevus – ühe mooduli lihvimiseks läks aega ligi 7 tundi, kokku 7 mooduli peale 49 tundi. Siit tulebki välja vesilõikuse suur miinus võrreldes laserlõikusega. Kui oleks olnud võimalik lõigata detailid laserlõikuses, ei oleks olnud sellist muret ning oleks säästunud suurel hulgal aega.

4.2 Monteerimine

Detailide kokkumonteerimisel tuli vaadata järjekorda, milliseid detaile omavahel ühendada. Monteerimine ja liimimine toimus vaheldumisi, sest liim Loctite 3090 kuivab sekunditega. Kui monteerida vales järjekorras, siis vea märkamise ajaks on liim juba kõvenenud, seega tuleb algusest peale õiges järjekorras detaile kokku liimida.

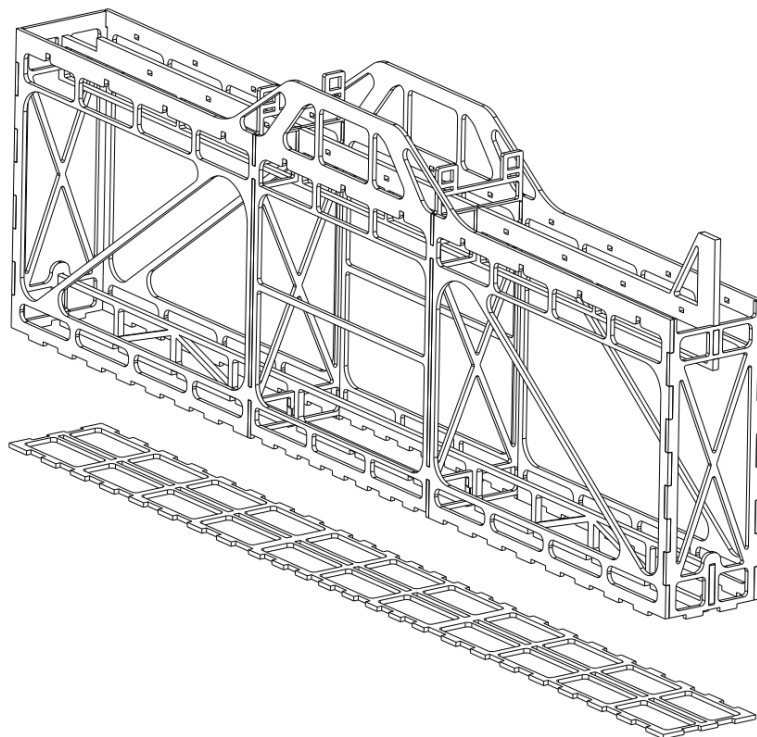
Esialgelt tuleb kokku monteerida sisemised osad ja hiljem selle ümber kinnitada välimised detailid (joonis 10).



Joonis 10. Sisemiste detailide koost

Sisemiste detailide juures võis tekkida pikematele detailidele paine sisse, mis tähendas, et pidi lihvima veel sisemiste detailide omavahelisi liitekohti. Painde sissejättnisel surutakse liimimisel detail sirgeks ja liitekohas tekib sisepinge, mis võib mooduli korpuse kooslusele halvasti mõjuda.

Kõige suuremaks katsumuseks tekkis just põhja liimimine, kuna põhjas on suurel hulgal tappe, kuhu tuleb liimi lisada. Seetõttu tuli põhi liimida viimasena ja kolmes osas – äärmised servad ja keskmised tapid kõik eraldi (joonis 11).



Joonis 11. Kogu mooduli koost ja põhi

Kui detailid on omavahel kokku liimitud, peab moodul seisma 24 tundi, kuni liim teeb lõpliku kõvenemise. Kuigi Loctite 3090 teeb esialgse kõvenemise juba sekunditega, on tootja poolt öeldud, et liim peab veel seisma 24 tundi, et saavutada maksimaalne vastupidavus [9].

4.3 Järeltöötlus

Kohtades, kus on liimi üleliia läinud, tuleb see eemaldada, kuna võib juhtuda, et moodul ei mahu akukasti või ei mahu elemendid moodulisse. Mooduli mõõdud peavad olema samad nagu on projekteeritud. Seetõttu tuleb ka mõnest kohast lihvida maha materjali, kus on valesti liimitud. Näiteks kui on tappide vahele läinud liiga palju liimi ja liitekohad on paisunud.

5 TOLERANTSID

Esialgse testmooduli detailide lõikejooned joonistel olid täpselt samad nagu projekteeritud ja olema peavad. Ei olnud teadmisi plastiku vesilõikuse kohta, et kuidas väljalõigatud detailidel tolerantsid tulevad.

Peale lõikust oli märgata, et masin lõikab pigem väljaspool lõikejoont ehk detailid tulevad veidi suuremad ja avad väiksemad kui projekteeritud. Kõige tähtsam oli aga et mooduli korpused oleksid laiuselt 49 mm ja pikkuselt 477,5 mm. Seega liimiti esialgne mooduli korpus täismahus kokku ja vaadati mõõte. Tulemuseks saadi, et moodul oli 0,8-0,9 mm laiuselt ja pikkuselt suurem kui projekteeritud. Optimeeriti kõiki väliseid tappe sissepoole 0,4 mm ehk mooduli laiust ja pikkust vähendati 0,8 mm.

Teoreetiliselt peaks olema maksimaalselt moodul 0,1 mm veel suurem, kuid liimimisel võib tekkida veel vigu ja mooduli mõõdud võivad veel kasvada.

Testimisel tuli välja, et elemendid mahuvad hästi sisse, kuid on samas tihkelt moodulites kinni, mis on just positiivne. Akukasti proovides ei läinud esimesel katsel aga moodul sisse. Ülemõõtes oli märgata, et mõnes kohas olid mõõdud erinevad, mida tuli maha lihvida. Samuti oli näha, et mõõdud olid erinevad ilma ja koos elementidega – PP plastik on üsna paindub materjal ja moodul paindus õrnematest kohtadest läbi.

6 ELEMENTIDE VAHELINE ÜHENDUS

Kogu akupaki elemendid on ühenduses 132s2p viisil, mis tähendab, et 132 elementi on jadamisi ühenduses ja 2 paralleelselt. Moodul üksinda aga 22s2p ühendusega. Ühenduse viisideks üldjuhul on klemmid, mis ühendavad ühe elemendi miinus poole teise elemendi pluss poolega. Antud juhul on ka paralleelühendus, seega ühendatakse kahe elemendi miinus pooled kahe teise elemendi pluss pooltega.

Klemmi disainimise puhul tuleb vaadata klemmi juhtivust, et ei tekiks akupakis liiga suurt sisemist energiakadu. Teisalt on tähtis, et materjal ei hakkaks oksüdeeruma, mis võib ühendust halvendada ja hullemal juhul ühenduse katkestada. Kuna tegemist on võistlussarjaga on tähtis ka klemmi kaal. 1g kaaluvõitu iga klemmi pealt tähendab terve akupaki peale 161 g kaaluvõitu. Samuti on tähtis ka hind.

6.1 Klemmi materjalivalik

Disainimisel on väga tähtis otsus just materjalivalik, sest materjalivaliku järgi saab määrata soojusliku juhitavuse, elektrilise takistuse ja kaalu.

Tabel 1. Klemmi materjalivalik

Materjal	Tihedus g/cm ³	Elektriline takistus nΩ*m (at 20 °C)	Soojuslik juhtimine W(m*K)
Alumiinium	2,70	28,8	237
Vask	8,96	16,8	401
Hõbe	10,5	15,9	429
Kuld	19,3	22,4	318

Antud tabelis on peamiselt kõige suurema juhtivusega materjalid. Kõige väiksema takistusega materjal on hõbe, samuti on hea soojuslik juhtimine, mis juhib soojust eemale. Sarnased omadused on ka vasel. Kohe on aga näha, et ei tasu võtta kulda, kuna tal ei ole teiste materjalidega võrreldes eeliseid. Alumiinium see-eest on palju kergem ning elektrilise takistuse ja soojusliku juhtimise väärtused pole ka kõige hullemad, siis valikuks jäi alumiinium.

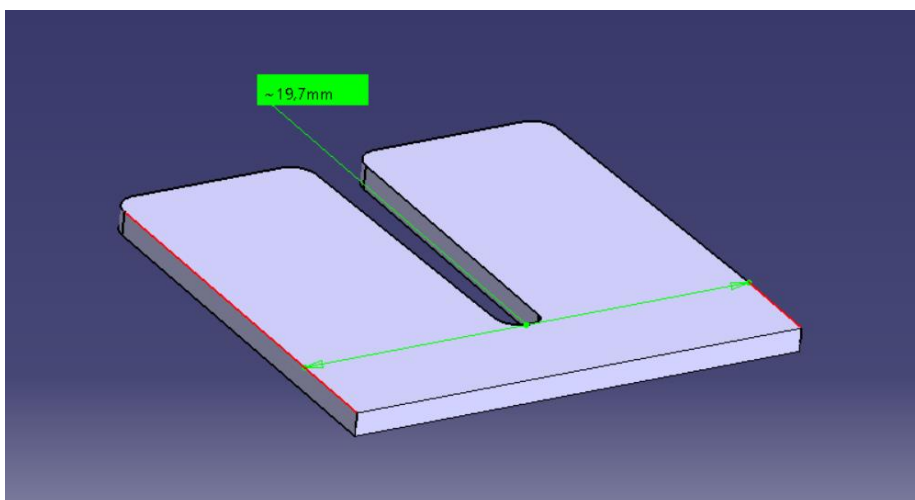
6.2 Klemmi kuju analüüsimine

Klemmi kuju on vaja viia võimalikult optimaalseks. Tingimusteks on, et klemm ei tohi minna 80 A korral kuumemaks kui 60 kraadi. Kogu akupaki maksimaalne vool saab olla 80 A, kuna ahelasse on ühendatud aeglase löögi kaitse. Sõidu ajal võib tekkida suuri piike voolul, ning seetõttu ei lähe kohe kaitse läbi.



Joonis 12. Esialgne klemm

Esialgne klemm oli H-tähe kujuline, kuhu painutati elemendi terminalid peale (joonis 12). Kuna akupaki maksimaalne vool on 80A, siis peab olema ühenduse ristlõige vähemalt 10 mm^2 [10]. Seetõttu saab materjali paksuse juba ära määrata. Keskkohas on klemmi laius 19,7 mm, mille määrab ära mooduli vaheline laius (joonis 13). Moodulil on elementide jaoks jäetud ruumi 21 mm ja 19,7 mm puhul jääks veel 1,3 mm vaba ruumi, kuna on parem kui metall ei oleks vastu plastikut, vaid seal oleks kasvõi väike vahe sees.



Joonis 13. Klemmi ristlõige

Sobiva paksuse saab välja arvutada minimaalse ristlõike järgi. Teada on pindala ja üks pikkus.

Seega arvutatakse:

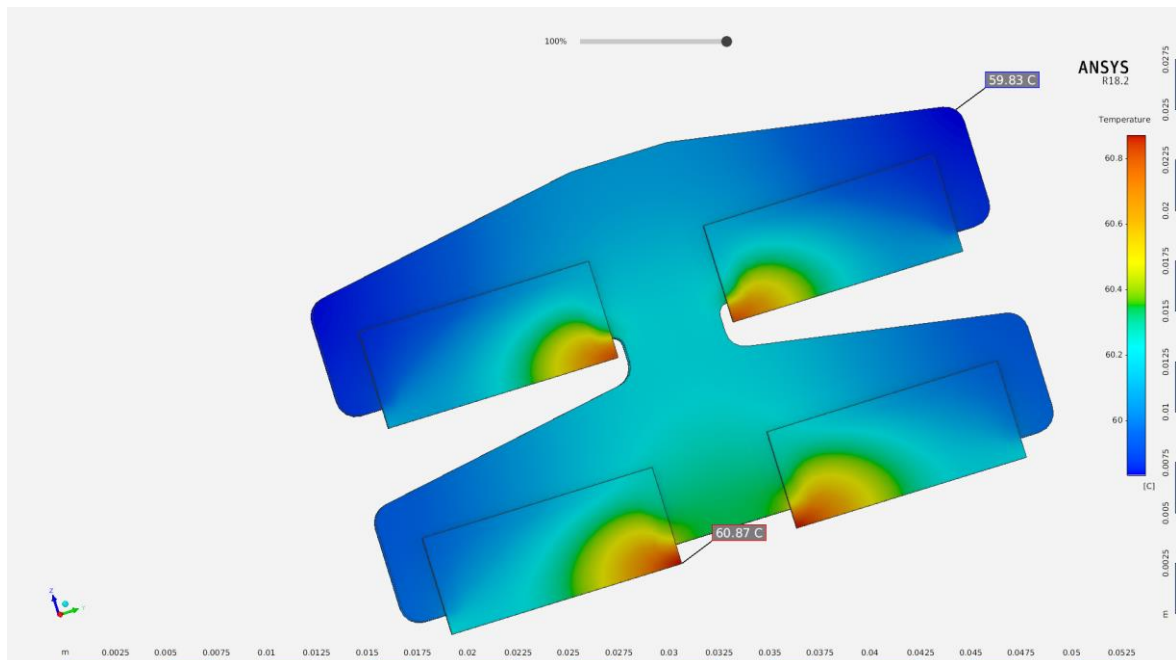
$$19,7 * PAKSUS = 10$$
$$PAKSUS = \frac{10}{19,7} = 0,51 \text{ (mm)}$$

Materjali paksuse saaks ümardada 0,5 mm peale ja klemmi laiuse tõsta 20 mm peale, et kriteeriumid oleksid täidetud. Testimisel selgus aga, et 0,5 mm paksused alumiinium klemmid painduvad juba käes ja ei ole kõige tugevamad. Tulevikus probleemi tekkimise vältimiseks otsustati paksema materjali kasuks. Poole millimeetri paksusest alumiiniumist järgmine on 1 mm paksune alumiinium. Testides olid klemmid palju tugevamad ja hoidsid oma kuju hästi.

Analüüsimine on läbi viidud programmiga ANSYS ja analüüsi tingimusteks olid:

- Välistemperatuur 30 kraadi;
- Klemmi läbiv vool 160 A (kahekordse varuga);
- Klemmi temperatuur maksimaalselt 60 kraadi.

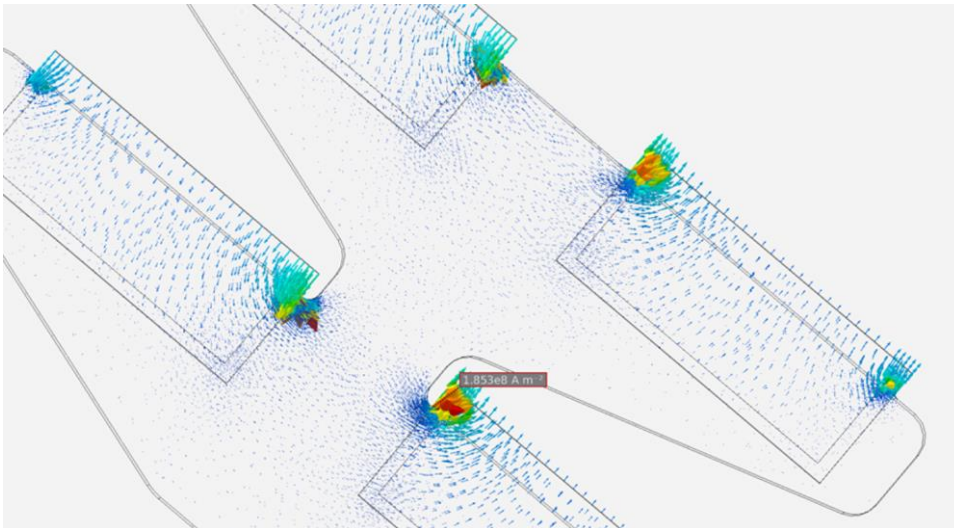
Analüüsi pildil on välja toodud temperatuuride vahemikud klemmil (joonis 14). Pealmised 4 objekti on elementide terminalid, mille all asub klemm ise.



Joonis 14. Klemmi temperatuuri analüüs

Analüüst tuleb selgesti välja, et suuremad temperatuurid asuvad pigem klemmi keskpunktis. Üldjuhul on temperatuur ühtlaselt jaotunud. Maksimalise ja minimaalse temperatuuri vahe on ainult 1 °C. Temperatuuri erinevused tulevad aga välja just sellest, et suurem vooluhulk tahab liikuda kõige lühemat teed pidi [11].

Voolu tiheduse joonist vaadates tuleb välja, et kohtades, kus on suurem temperatuur, on ka suurem vooluhulk (joonis 15).



Joonis 15. Klemmi voolu tihedus

Võrreldes esialgse klemmiga on maha võetud materjali just ülevalt servadest (joonisel 15 allpool), kuna need on just kõige jahedamad kohad. Samuti on ka voolu tiheduse joonisel näha, et vool liigub pigem terminade vahelisel klemmi alal ja väljapoole seda väga ei jõua. Kokku kaalub optimeeritud klemm 1,6 g. Eelnevalt kaalus aga 1,8 g. 0,2 grammi ei tundu väga suur kaaluvõit, kuigi kogu akupaki peale saab sealt juba suurema arvu.

Ühel moodulil on 20 klemmi ja mooduleid kokku on 6.

$$0,2 * 20 * 6 = 24 (g)$$

Seega tuli optimeerimise pealt 24 grammi kaaluvõitu.

Moodulil on veel 3 klemmi, mis erinevad analüüsitud klemmist. Sama protsess tehti läbi ka nende kolme klemmi puhul.

6.3 Klemmi ühendusviis

Akuelemendi terminal ei seisa ise klemmi peal kinni ja seega peab mehaaniliselt need klemmiga liitma. Väga rangelt on määratud tudengivormeli võistlussarjas, et ühendustes ei tohi kasutada plastikut [12]. Samuti peab kinnitus olema kinnitatud sedasi, et vibratsioonide toimele kinnitus lahti ei tuleks. Seega valikus on poltliitega ühendus ja alumiiniumkeevitus.

6.3.1 Poltliitega ühendamine

Poltliitega ühendamise meetodi puhul tuleks puurida klemmi ja elemendi terminali sisse auk, kust mahuks polt läbi. Klemmi tuleks seejärel teha keere, kuhu kinnitub polt. Tõenäoliselt tuleks ka lisada seib poldi pea ja terminali vahele lisada. Elemendi terminali paksuseks on 0,1 mm, mis võib kergelt hõõrdumisel puruneda. Poltliite positiivne pool on, et kui mõni element akupakis lakkab töötamast, on võimalik see kerge vaevaga ära vahetada. Miinusteks on peamiselt suur mass ja ohtlik tootmine. Iga klemmi külge tuleks neli poltliidet ja kui kasutada alumiiniumpolte tuleks kaaluks ligi 1 g poldi pealt [13]. Iga klemmi kohta teeks see 4 g ja akupaki peale kokku 552 grammi.

Teiseks suureks miinuseks on tootmisel tekkiv oht. Kui elemendi miinus ja pluss terminal kokku ühendada tekib lühis, mis kutsub esile sädemeid ja vahel ka kaarleegi. Poltliite jaoks on vaja teha auk elemendi terminali ja kui puur läheb kogemata vastu mõlemat terminali, tekib eelpool kirjeldatud lühis. Tootmisel tuleks üks terminal katta isoleeriva materjaliga, mis samal ajal peaks vastu, kui pöörlev puur peaks sellega kokkupuute tegema.

6.3.2 Alumiiniumkeevitus

Teine valik oleks alumiiniumkeevitus, kus elemendi terminalide servade ja alumiiniumklemmi peale tehakse alumiiniumkeervis. Võrreldes poltliitega on keevitus märksa kergem lahendus, kuna keervis ise ei kaalu väga midagi. Samuti on keevitamine ohutum. Kui keevitada laserkeevitusega, siis keevitatakse vertikaalselt ja üldjuhul on laserkeevitused väga täpsed. Miinuseks on mooduli raske hooldamine peale keevitamist. Juhul kui ütleb mõni element üles, tuleb keevitus lahti lõigata, asendada element ja uuesti keevitusse saata. Väga suur negatiivne pool on veel, et alumiiniumkeevitus laserkeevitusega on väga kallis.

Lisaks peab nii poltliitega kui ka alumiiniumkeevitusega lõikama elemendi terminalid sobivasse pikkusesse. Kõige mugavam on teha seda kääridega, kuid sel juhul tekib jällegi lühistamisohu.

Võttes arvesse mõlema variandi plusse ja miinuseid, otsustati siiski alumiiniumkeevituse kasuks peamiselt just massivõidu pärast.

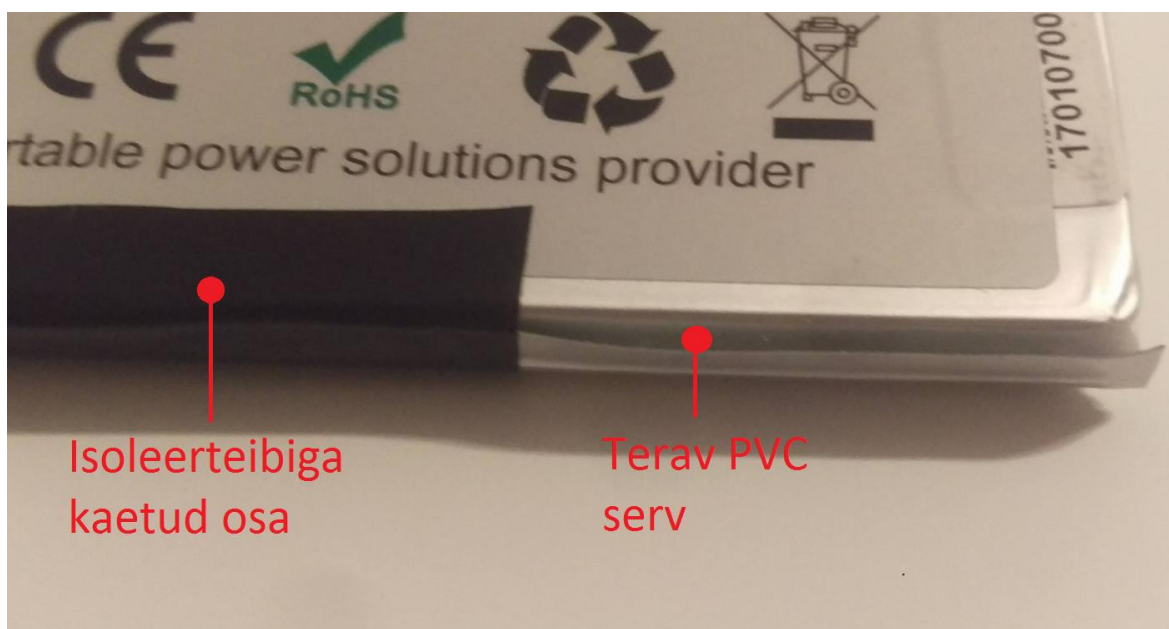
7 ÜHENDUSTE TOOTMINE

7.1 Klemmide tootmine

Sarnaselt moodulile saab klemme toota lehtmaterjalist. Alumiiniumit saab lõigata samamoodi nii laserlõikusega kui ka vesilõikusega. Tulemus on väga ligilähedane, seega ei ole vahet millise lõikamismeetodi valida. Valikuks sai vesilõikus.

7.2 Elementide sisse ladumine

Kui on olemas kõik klemmid, elemendid ja kokkuliimitud moodulid, saab hakata sisse laduma elemente. Elemendid on kaetud õhukese PVC kattega, mis võib teravama serva vastu minnes puruneda [14]. PVC kate on pandud kahe kihina ja üle serva ulatuvad ääred on volditud vastu elementi (joonis 17). Ääred on üsna teravad ja kuna elemendid paiknevad üksteisega lähestikku, võivad vibratsiooni tõttu üksteist vigastada. Selleks lisati elemendi serva isoleerteipi. Piisab kui lisada ainult ühele poole. Teine põhjus, miks peaks isoleerteipi lisama on elementide vahel potentsiaali tekkimise välistamine.



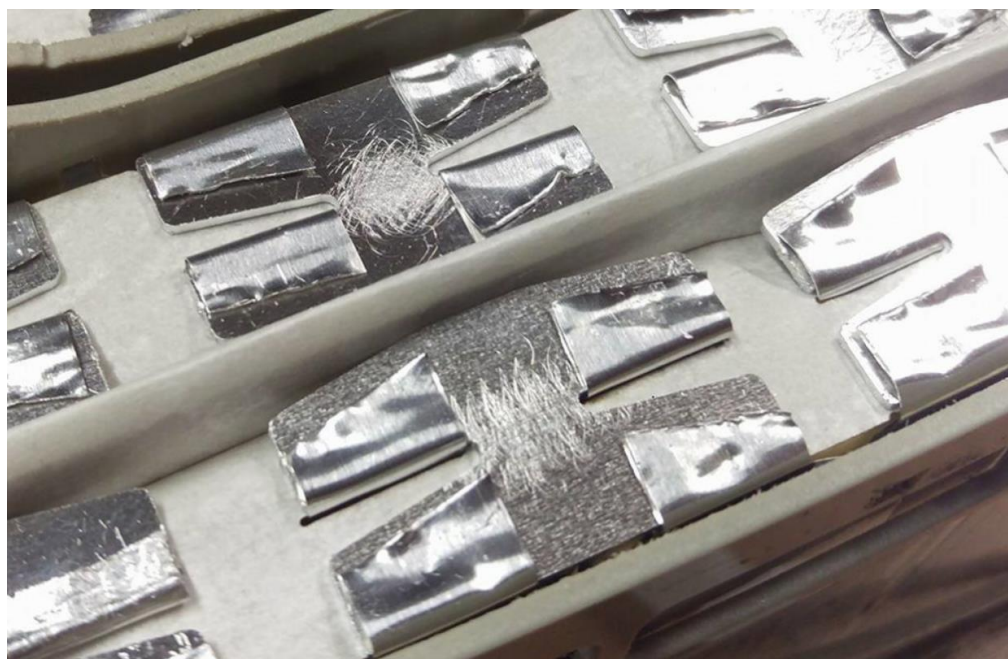
Joonis 16. Isoleerteibiga kaetud ja katmata osa võrdlus

7.3 Elementide terminalide parajaks lõikamine

Tootja saadab elemendid, millel on pikad terminalid. Terminalide parajaks lõikamiseks on kaks varianti:

1. Lõigata varem klemmid parajaks ja hiljem panna elemendid moodulitesse ja klemmid peale ning vajadusel teha parandusi. Antud variandi puhul oleks positiivne just see, et lühistamisohu on väike ning lõigata on mugav. Lõikamisvahenditeks sobivad just kõige paremini lihtsalt käärid. Tegeledes ühe elemendi kallal ei pea lõikama asendis, mis võib potentsiaalselt ohtlik olla. Negatiivse poole pealt hakkab rolli mängima täpsus. Elementide ja elemendi terminali mõõdud erinevad üksteisest ja seetõttu võib pärast lõikamist moodulisse asetatud terminal olla klemmi jaoks liiga pikk või liiga lühike. Kui terminal jääb pikaks, saab seda veel lühemaks lõigata, kuid kui see jääb lühikeseks, siis ei saa seda elementi enam kasutada.
2. Laduda elemendid moodulitesse koos klemmidega ja seejärel lõigata parajaks terminalid (joonis 18). Selle variandiga on positiivne just see, et klemmid saavad lõigatud täpselt õigesse pikkusesse ja on võimalik seda koheselt kontrollida. Puudseks sellel meetodil on, et terminalide lõikamisel võib kääridega kogemata tekitada lühise.

Otsustati lõplikuks variandiks mooduli peal terminalide parajaks lõikamine. Põhjuseks just see, et elemendid on üsna kallid ning kuna tulevad Hiinast, siis on ka tarneaeg üpriski pikk. Lõikamise ajal oli muidugi kohustuslik kanda ka ohutusvarustust.



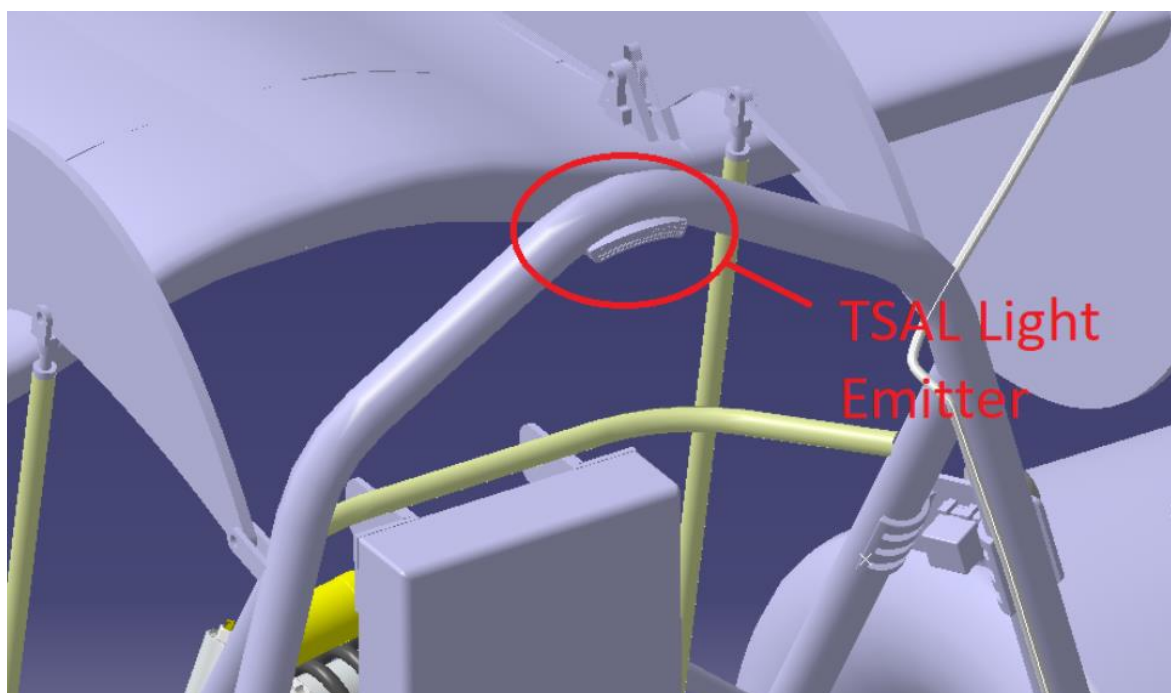
Joonis 17. Parajaks lõigatud klemmid enne keevitust

8 TSAL TULI

Auto seisvas olekus ei ole näha, kas akupakk on ühendatud või mitte. Selleks on olemas TSAL tuli, mis annab märku, kas auto on ühendatud akupaki toitega vooluvõrku või mitte. Kokku on tulel kolm asendit:

1. Asend, kus tuli ei põle – näitab, et akupakk ei ole millegiga ühenduses ja akupakist voolu ka läbi ei lähe;
2. Asend, kus põleb konstantselt roheline tuli – tähendab, et akupakk toidab madalpinge peal töötavaid trükkplaate ja objekte. Madalpinget nimetatakse reeglites GLV ehk *Grounded Low Voltage* ja defineeritakse kui pingeid, mis jäävad alla 50 V DC [12];
3. Asend, kus vilgub punane tuli – tähendab, autoga on ühendatud kõrgepinge ehk maksimaalne pinge, mis akupakk suudab välja anda. Kõrgepinget nimetatakse reeglites TS ehk *Tractive System* ja defineeritakse kui pinged, mis ületavad 50 V DC [12]. Auto sõitma saamiseks tuleb lisaks eraldi sisse lülitada ka kontrolleri ja lülitama sisse *Drive Mode* asendi.

TSAL tuli peab asetsema võimalikult kõrgel, milleks on *roll-over hoop*'i tipu alumine osa (joonis 19). Võistluste kohtunikud on toonitanud, et TSAL tule kinnitused ei tohi asuda väljaspool *roll-over hoop*'i, sest ümbermineku situatsioonis võib kinnitus koos tulega puruneda ning siis ei oleks õnnetusejuhtumi korral abistajatel teada, kas kõrgepinge on autos ühendatud või mitte [15].



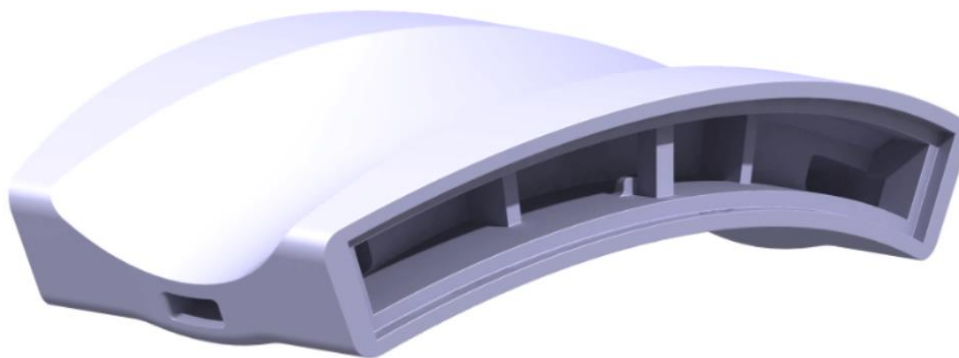
Joonis 18. TSAL tule asukoht vormelil

8.1 Disainimisfaas

Eelnevatel aastatel on TSAL tuli tehtud THT LED'idega, kuid see aasta oli kavas teha TSAL trükkplaadi peal asetsevate LED'idega, mis mahutaks ühele pinnale rohkem tulesid ja oleks kokkuvõttes kompaktsem. Puuduseks sellise otsuse puhul on, et LED'id eraldavad palju soojust ja trükkplaadid võivad kuumeneda.

8.1.1 Korpus

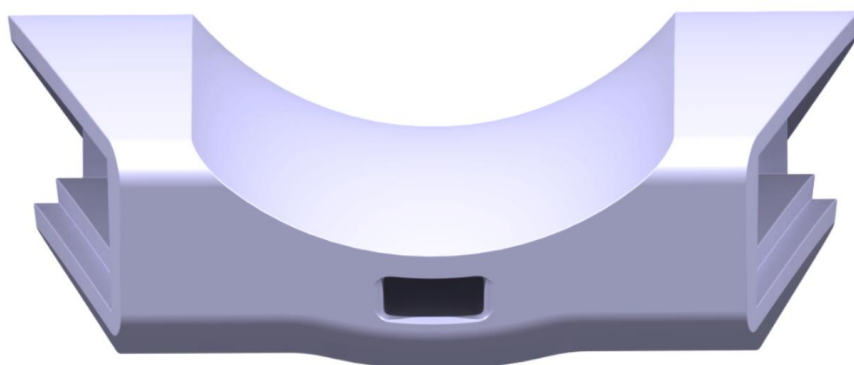
Korpuse disainimisel tuleb arvestada, et tuld peab olema näha 360° ulatuses ehk iga nurga pealt [12]. Samuti peab olema kinnitatav *roll-over hoop*'i külge nii, et ümbermineku situatsioonis ei tuleks tuli sealt lahti [14]. Korpusesse tuleb ära mahutada trükkplaadid, trükkplaatide ühendavad juhtmed ja kate.



Joonis 19. TSAL tule korpus

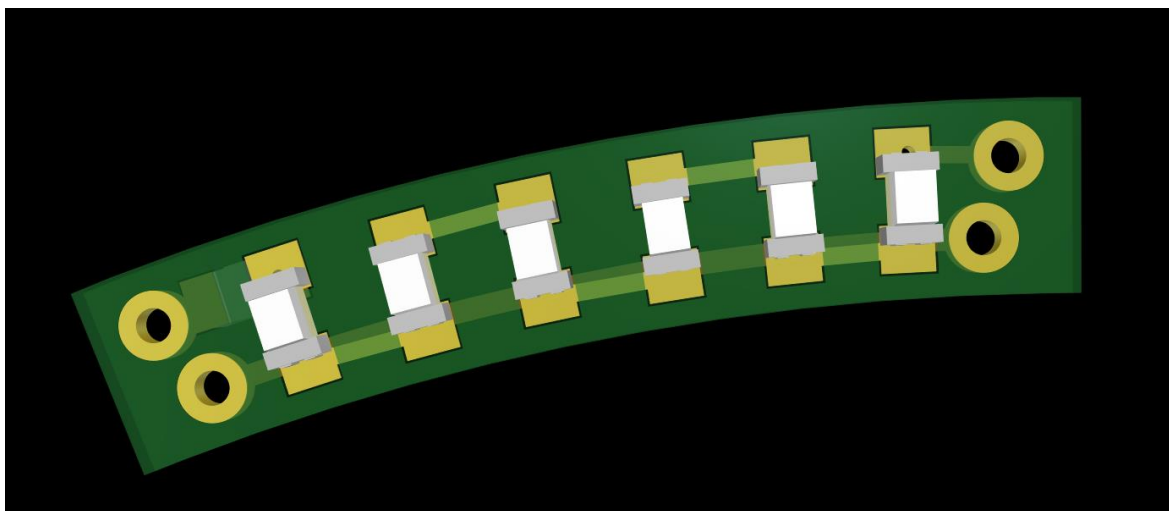
Korpusesse tulevad toitejuhtmed vasakult küljelt ningavad lähevad nii paremale kui vasakule. Trükkplaatide jaoks on tehtud sooned, mis hoiavad trükkplaati soovitud asukohas kindlalt kinni. Kui trükkplaadid on sisestatud, läheb peale ka läbipaistev kate. Katte jaoks on tehtud korpusesse sooned (joonis 20).

Küljepealt vaadates on näha, et korpus on eest poolt kumer (joonis 20). Kumeruse tõttu on näha TSAL tule asendit ka külje pealt. Korpus võiks olla ka kitsam, kuid kui asetada tuli *roll-over hoop*'i külge, ei tohi tuli jääda *hoop*'i varju.



Joonis 20. TSAL tule korpus külgvaates

8.1.2 Trükkplaat



Joonis 21. TSAL trükkplaat

Trükkplaadi disainimisel tuleb tähele panna, et tuli peab vilgutama nii punast kui ka rohelist valgust (joonis 21) [12]. Olemas on LED'id, mis suudavad anda edasi kahte erinevat värvi. Kui lasta ühtepidi vool läbi LED'i, hakkab särama roheline valgus ja kui vastupidi siis punane valgus.

Kasutusel on LED'id KPB-2012SURKCGKC. LEDid peavad olema nähtavad ka päikesevalguse käes. LED'ide valgustugevust vaadati parameetrite *luminous intensity* ehk valguse tugevus ja *viewing angle* ehk vaatenurga abil. Nende kahe parameetri abil saab arvutada valgustugevuse lumenites.

Valem lumenite arvutamiseks:

$$\Phi_{v(lm)} = I_{v(mcd)} \times (2\pi(1 - \cos(\theta/2))) / 1000$$

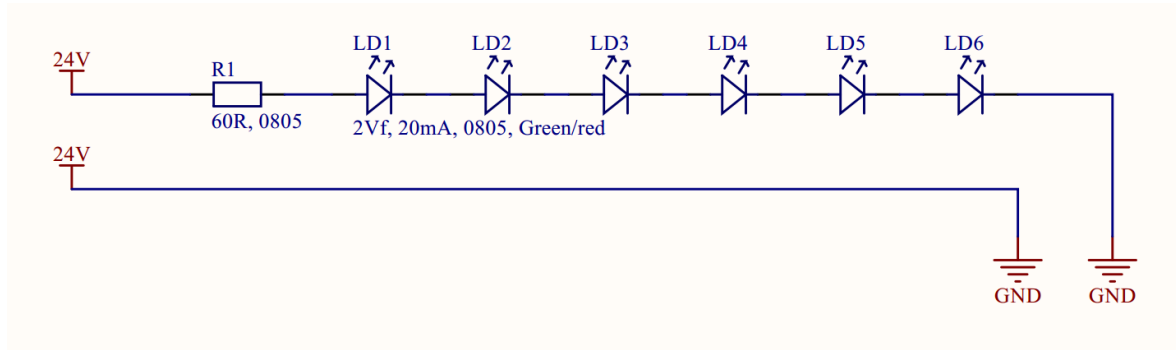
Seega punase LED'i valgustugevus: $\Phi_{v(lm)Punane} = 0.37 \text{ lm}$

Ja roheline LED'i valgustugevus on: $\Phi_{v(lm)Roheline} = 0.25 \text{ lm}$

Skeem

Kokku on LEDe 24 ning igal LEDil pingelang 2 V [16]. Toiteks 24V. Seega ei suuda ühe ahelaga kõiki LEDe ära toita. Seega tuleb teha juurde paralleelahel, kus ühes ahelas on 12 LEDi ja teises samuti 12.

Ühe plaadi skeem näeb välja järgnevalt (joonis 23):



Joonis 22. TSAL plaadi skeem

Kokku on TSAL tules 4 sarnast plaati (joonis 22). Esialgu viiakse 24V toide esimesse plaati, kus ühendatakse paralleelselt LED'idega rada ja tühi rada. Sealt edasi ühendatakse LED'idega rada uute LEDidega rajaga ja tühi rada samuti tühja rajaga. Kuna nüüd ühes ahelas toide antud 12 LED'ile, siis ühendatakse kolmandal ja neljandal plaadil see rada tühjade radadega, et ühendusel oleks takistusevaba maandus. Eelnevalt tühjade rajadega ahel ühendatakse nüüd kolmandal ja neljandal plaadil LED'ide rajaga.

9 AKUPAKI LAADIMISE TARKVARA ARENDUS

9.1 Eelneva laadimise tarkvaraga tutvumine

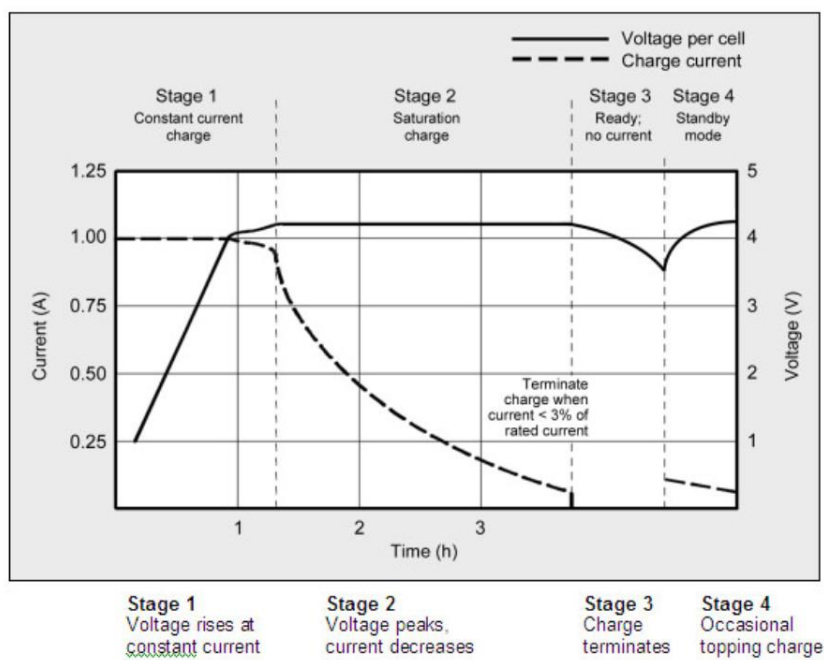
Tarkvara idee võrreldes eelnevate aastatega oli tehtud kasutajasõbralikumaks. 2015 aastal kasutati pingete ja temperatuuride jälgimiseks „Putty“ programmi. Elementide pingete ja temperatuuride nägemiseks tuli aga pidevalt värskendada [17].

Ühendus oli akuhaldussüsteemi ja arvuti vahel. Suhtlusprotokoliks oli UART kuna akuhaldussüsteemil olid vajalikud väljaviigud juba olemas. Ühendusel olid kasutuses mikroskeemiga konverteerimiskaablid, mis võimaldasid läbi arvuti USB pesa UART signaali kätte saada. Tarkvara programmeerimiskeeleks oli valitud Java ja keskkonnaks NetBeans IDE [17].

9.2 Tarkvara edasiarendus

Eelnev tarkvaraarendus keskendus tarkvara loetavaks tegemisele. Akupaki laadimisel peab olema ülevaade elemendi minimaalsetest ja maksimaalsetest pingetest ning temperatuuridest. See annab hea ülevaate, kui miskit laadimisel läheb valesti. Näiteks kui mõne elemendi temperatuur märgatavalt erineb teistest.

Laadimise ajal peab aga inimene jälgima pingeid ja temperatuure. Kui laadimisel saavutab konstantse vooluga elementide pinge soovitud väärtuse, siis langetab laadimisega tegelev operaator voolu veidi. Seejärel langeb elementide pingenäit ning laaditakse madalama vooluga taas soovitud pingenäiduni. Sama protsessi korratakse kuni jõuab 0,2 A juures elementide pinge soovitud väärtuseni. Teoreetiliselt võiks voolu vähendamise ajal pinge jääda koguaeg samaks. Sellist laadimismeetodit kutsutakse CC-CV meetodiks (joonis 23).



Joonis 23. Tüüpilise Li-ion aku täislaadimistsükkel [19]

Laadimisel kasutatav toiteplokk suudab väljundiks anda konstantset voolu, küll aga mitte konstantset pinget. Protsessi automatiseerimiseks tuleb juhtida voolu nii, et saavutada konstantne pinge. Voolu juhtimine toimiks kasutades PID algoritmi, et ei toimiks laadimisega pinge ülemäärast kasvu, mis võib elementi rikkuda. Soovitud elemendi pinge graafik hüppekaja puhul oleks sujuv. Toiteploki juhtimine toimub CAN kaudu, kus arvuti saadab toiteplokkile vajaliku väärtuse.

Programmi ekraanil peab operaator sisestama soovitud ühe elemendi pinge, elementide arvu jadaühenduses ning maksimaalse laadimisvoolu. Pinge ja voolu peab operaator ise arvutama, kuna sama laadijaga laaditakse erineva konfiguratsiooniga akupakke. Maksimaalse laadimisvoolu leiab elemendi andmelehel. Üldiselt on Li-ion akudel 4.2 V maksimaalne pinge ja soovituslik on laadida täis 4.0 V-ni ehk 80% maksimaalsest [20]. Antud akupaki konfiguratsioon on 132s2p, seega tuleb laadimispinge arvutamiseks teha tehe:

$$4.0 * 132 = 528 (V)$$

Kui parameetrid on sisestatud ja vajutatakse laadimise nuppu, alustab programm konstantse vooluga laadimist. Hakates lähenema soovitud pingeni, vähendab vähehaaval programm laadimisvoolu, kuni on käes soovitud pinge. Edaspidi hakkab programm rohkem voolu vähendama ja hoiab ühtlast pinget. Antud akupaki puhul 528 volti. Kui vool on 0,2 A, lülitub laadimine välja. Samuti lülitatakse ka laadimine välja kui on mõni pinge või temperatuur väga erinev. Koodi algoritm on välja toodud lisas 1.

10 OHUTUSANALÜÜS

Kõige tähtsam elementidega töötamisel on ohutus.

Elemendid on kaetud õhukese PVC kattega, mis võib teravama serva vastu minnes puruneda [14]. Kui elementi tekib sisselõige, ühendatakse elemendis asuvad anood ja katood kihid, mida muidu eraldab separaator ning tekib lühis (joonis 16). Piisab juba ühe kihi lõhkumisest, sest tekkiv leek kahjustab ka järgmisi kihte ehk tekib ahelreaktsioon. Leegi tugevus sõltub energiahulgast elemendis, ehk kui element on tühjaks laetud, siis erilist ohtu ei esine. Kui aga element on täis laetud, on see kõige ohtlikum.

Kui ehitada akupakki ja kasutada uusi elemente, siis on tavaliselt akuelemendid nominaalpinge juures, sest selle pinge juures säilivad need kõige paremini. Sellise pinge juures on elemendid veel võimelised sisselõike juures tugevat leeki tekitama (joonis 16).



Joonis 24. Sisselõige Li-ion elementi [18]

10.1 Ohutusvarustus

Elementide ladumisel tuleb elemendid moodulitesse paigutada ja seejärel lõigata parajaks elementide terminalid klemmidele keevituse jaoks. Töö tegemise käigus võib tekkida lühiseid, mille tulemusena võib sattuda inimene voolu alla. Teisalt võivad lühised tekitada kaarleegi.

11 PROJEKTI HINNAKALKULATSIOON

Projekti hinna määrasid peamiselt vesilõikus ja alumiiniumkeevitus.

Tabel 2. Projekti hinnad

Protsess/materjal/toode	Kogus	Hind	Summa
PP plast	4 m ²	12	48
Vesilõikus	174 m	2,4	417,24
Alumiiniumkeevitus	6 tk	187	1120
TSAL Tule Trükkplaadid	8 tk	2.5	20
LED-id	24 tk	0.21	5,04
		KOKKU:	1610,28 €

Märkus: Tabelisse on lisamata sponsorkorras saadud detailid, nagu näiteks erinevad liimid või laserpaagutuses toodetud TSAL korpus.

11.1 Majanduslik analüüs

Selleks, et tulemus oleks võimalikult kvaliteetne, ei seatud piiranguid projekti maksumusele. Kuigi kõik tööd, mis andis ise ära teha, sai tehtud enda poolt. Antud tabelist tuleb välja, et kõige kulukam osa on alumiiniumkeevitus. Esiialgu ei osanud arvata, et keevitus nii kalliks läheb. Tagasivaadates oleks võinud leida rohkem alternatiive praeguse lahenduse jaoks. Küll aga suure hinna juures on keevitus kindel ühendus ja ühendused on väga kvaliteetsed.

KOKKUVÕTE

Lõputöö käigus sai analüüsitud erinevaid akupaki prototüüpi valmistamismeetodeid ning lõpptulemusena saavutati terviklik ja töötav lahendus. Lahenduste leidmisel keskenduti peamiselt vastupidavusele, kvaliteedile, ohutusele, hõlpsusele ja kergele kaalule.

Mooduli korpuse tootmise sobilikuks tootmismeetodiks saadi lehtmaterjalist detailide väljalõikamine vesilõikusega ning detailid liideti kokku hiljem Loctite 3090 liimiga. Välja tuli vesilõikuse suur miinus PP materjali lõikamisel – lõikeserva ääres olid „narmendavad“ materjali jäägid. Jääkide eemaldamiseks kulus palju aega, kuna detailid pidi käsitsi üle käima. Sellegipoolest saavutati eesmärk valmistada võimalikult täpne ja tugev korpus. Mooduli korpus pidas hästi vastu erinevatele testidele, mille tulemusena ei tulnud ühtegi kohta liimist lahti. Samuti läksid üsna täpselt mõõtudelt kokku projekteeritud detailid vesilõikusest tulnud detailidega.

Elementide vaheliste klemmide disainimisel valiti alumiinium, mille põhiargument oli mitmekordne tiheduse vahe teiste võrreldavate materjalidega ehk alumiinium oli kaalult palju kergem kui teised materjalid. Võrreldes teiste materjalidega oli alumiiniumi elektriline sisetakistus kõige suurem, kuid võrreldavad materjalid olid valitud kõrge juhitavusega materjalide seast, seega võib lugeda ka klemmidele seatud eesmärgi täidetuks. Samuti analüüsiti ka erinevaid ühendusi klemmi ja elemendi terminali vahel. Kuna peamiseks eesmärgiks oli kaalult kerge lahendus, sai valituks alumiiniumkeevitus, mille puudusteks on raske hooldatavus kui ütleb mõni element üles ja suur maksumus.

Tarkvara arenduse poole peal leiti sobilik koodi juhtimise meetod, milleks sai PID kontroller. Elemendid laetakse täis CC-CV meetodil, kus esialgu hoitakse konstantset voolu ja seejärel konstantset pinget. Kuna laadija toiteplokk suudab ise hoida konstantset voolu, siis saab tarkvaraga hoida konstantset pinget laadimisvoolu juhtimisega. Algoritmi järgi on laadimisprotsess täielikult automatiseeritud, kuna nii soovitud pingeni laadimiseni kui ebanormaalse nähtuse korral lülitatakse laadimine automaatselt tarkvara poolt välja.

Projekti käigus sai loodud akupaki prototüüp, mis järgib ka üldist eesmärki, et prototüüp oleks kvaliteetne ja kerge. Samuti sai uusi teadmisi lahenduste kohta, mida internetist muidu ei leia. Töös esines ka vigade tegemist, mida on võimalik võtta arvesse järgmise aasta disaini tegemisel.

SUMMARY

Throughout the thesis, there was analysed different methods of manufacturing and in the end a complete and working solution was achieved. When finding the solutions, the focus was on the reliability, quality, safety, easiness and lightweighness.

Suitable material for manufacturing the segment was cutting details out of sheet plastic with waterjet cutter and details were later joined with Loctite 3090 glue. A huge minus was found out when cutting PP material with water-jet cutting – the cutting edge had grubby material residue. A lot of time was spent on removing the residue, because it had to be removed by hand. Nonetheless the goal of creating a strong and precise housing was achieved. Segment's housing withstood different tests, where there was no loose connection in the result. Also the details that came from water-jet cutting had quite similar dimensions as the details that were projected.

While designing the cell tabs between cells, the suitable material chosen was aluminium, which was justified with the density being multiple times different than the others', in other words aluminium was much lighter than the other materials. In comparison with other materials, aluminium was with the biggest electrical resistivity, but the materials that were in comparison were chosen from high conductivity materials, so the goal set for cell tabs can also be said to be achieved. Also there was analysed different connections between cell terminals and cell tabs. Because mostly the goal was to find a lightweight solution, aluminium welding was chosen. Shortcoming for this choice was difficult maintainability and big cost.

On the software development side, there was a suitable control method found, which was a PID controller. Cells have to be charged with CC-CV method, where at first constant current is held and afterward constant voltage is held. Because the power supply unit of charger can hold constant current, you can hold constant voltage with the software by controlling the current. By the algorithm the charging process is fully automated, because charging is automatically shut down after charging to desired voltage or in case of abnormal activity.

During the projekt there was created a prototype of a battery pack, which follows a common goal, that the prototype should be high-quality and lightweight. Also new knowledge was found out, which normally can not be found on the internet. There was also appearance of mistakes in this projekt, which can be taken into account while designing next years' design.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Viik, Martin, Akukasti mooduli disain, TTÜ, 2017.
- [2] 3D Print – Shaperize [WWW] <https://shaperize.com/pood/3d-prindi/> (22.01.2018)
- [3] Laserpaagutusseade Formiga P100 [WWW] <https://www.ttu.ee/instituut/mehaanika-ja-toostustehnika-instituut/teenused-64/3d-printimine/laserpaagutusseade-formiga-p100-6/> (22.01.2018)
- [4] Polüpropylene datasheet [WWW] <https://www.directplastics.co.uk/pdf/datasheets/Polypropylene%20Natural%20Data%20Sheet.pdf> (3.01.2018)
- [5] Everything about injection molding [WWW] <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-injection-molding> (20.01.2018)
- [6] How does laser cutting work [WWW] <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/how-does-laser-cutting-work.cfm> (19.01.2018)
- [7] Waterjet cutting process basics [WWW] <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/waterjet-cutting-process-basics.cfm> (19.01.2018)
- [8] Loctite 3038 [WWW] <http://www.loctite.ee/loctite-1104.htm?nodeid=8802634989569> (03.03.2018)
- [9] Loctite 3090 [WWW] <http://www.loctite.ee/loctite-1104.htm?nodeid=8802631221249> (03.03.2018)
- [10] American Wire Gauge Chart [WWW] https://www.powerstream.com/Wire_Size.htm (01.01.2018)
- [11] The path of least resistance [WWW] <http://www.ecmweb.com/content/path-least-resistance> (08.04.2018)
- [12] Formula Student Germany Rules [WWW] <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/> (20.05.2018)
- [13] M3 Aluminium Round Head Screws 5mm [WWW] https://hobbyking.com/en_us/7075-alu-m3-round-head-screw-5mm-green-1.html?__store=en_us (20.05.2018)

- [14] How lithium polymer batteries are made [WWW]
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-lithium-polymer-batteries-are-made> (07.05.2018)
- [15] Electrical inspection (Formula Student Germany) [WWW]
https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2017/20171021_Academy/Slides/04_E-Inspection__FSG_Academy_20171021_Herzogenaurach.pdf (20.10.2017)
- [16] KPB-2012SURCGKC LED RED/GREEN [WWW]
<http://ee.farnell.com/kingbright/kpb-2012surcgc/kc/led-smd-bi-polar-0805-red-green/dp/2079908?st=led> (14.04.2018)
- [17] Ploom, Martin, Elektrivormeli FEST16 akude laadimissüsteemi edasiarendus, TTÜ, 2016
- [18] Smashing a phone battery with a knife [WWW]
<https://www.youtube.com/watch?v=cXXIYA8i8HU> (20.05.2018)
- [19] Charging lithium ion batteries [WWW]
http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries (07.05.2018)
- [20] How to prolong lithium based batteries [WWW]
http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries (07.05.2018)

LISAD

LISA 1. Akupaki laadimise tarkvara algoritm

