



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**RETROAUTO ELEKTRILISEKS ÜMBEREHITUS -  
ELEKTRIAJAMI JA KÕRGEPINGEAKU VALIK  
NING TEOSTUS**

**RETRO CAR ELECTRIC CONVERSION - SELECTION AND  
IMPLEMENTATION OF ELECTRIC DRIVE AND HIGH  
VOLTAGE BATTERY**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Georg Seema

Üliõpilaskood 201579MATM

Juhendaja: Raivo Sell, PhD

# 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.

23. mai 2022

Autor: Georg Seema

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

23. mai 2022

Juhendaja: Raivo Sell

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....2022

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

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

Mina, Georg Seema, sünnikuupäev 29.07.1997:

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Retroauto elektriliseks ümberehitus - elektrilajami ja kõrgepingeaku valik ning teostus“, mille juhendajaks on Raivo Sell.

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

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

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

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

---

<sup>1</sup>*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

\_\_\_\_\_ (allkiri)

23.05.2022

# TalTech Mehaanika ja tööstustehnika instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Georg Seema, 201579MATM  
**Õppekava, peeriala:** MATM, Tootearendus ja tootmistehnika  
**Juhendaja(d):** Prof., Raivo Sell

### Lõputöö teema:

Retroauto elektriliseks ümberehitus - elektrilajami ja kõrgepingeaku valik ning teostus  
Retro car electric conversion - selection and implementation of electric drive and high voltage battery

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Elektriplatvormi valik
2. Akukasti projekteerimine
3. Kõrgepingesüsteemi projekteerimine

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kontseptsiooni loomine	01.07.2020
2.	Mootori ja aku valik	04.07.2020
3.	Mootori modifitseerimine	01.09.2020
4.	Akukasti projekteerimine	01.09.2021
5.	Akude paigaldamine ja BMS ühendamine	20.04.2022
6.	Kõrgepinge skeemi loomine	25.04.2022
7.	Lõputöö vormistamine	23.05.2022

**Töö keel:** Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 23. mai 2022

**Üliõpilane:** Georg Seema ..... 23. mai 2022  
/allkiri/

**Juhendaja:** Raivo Sell ..... 23. mai 2022  
/allkiri/

**Programmijuht:** Martin Eerme ..... 23. mai 2022  
/allkiri/

# SISUKORD

EESSÕNA .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. ELEKTRIAUTO PROJEKTIST .....	9
1.1 Pontiac Fiero kirjeldus .....	9
1.1.1 Fiero tulekahjud .....	10
2. ELEKTRIMOOTORI VALIK .....	11
2.1 Tesla elektriajam .....	12
2.1.1 Hooldus.....	13
3. TESLA ELEKTRIAJAMI JUHTIMINE .....	14
3.1.1 057 Technology kontrollor .....	14
3.1.2 EV controls T2C.....	14
3.1.3 Openinverter.....	14
3.2 Openinverteri paigaldamine .....	14
3.2.1 Openinverteri test.....	17
4. AKU .....	18
4.1 Akude valik.....	18
4.1.1 Mercedes B250e .....	18
5. AKU HALDAMISESÜSTEEM .....	21
5.1 BMSi valik.....	21
5.1.1 EMUS G1 BMS .....	22
SIMP BMS .....	22
6. AKUKAST.....	24
6.1 Akukasti projekteerimine .....	24
6.1.1 Akude paigutus kastis .....	25
6.1.2 Akukasti ventilatsioon. ....	28
6.2 Akukasti ehitamine .....	29
6.3 B250e moodulite modifitseerimine .....	31
6.4 Akude paigaldamine kasti .....	32
6.5 Orion 2 ühendamise .....	34
6.5.1 Orion 2 test .....	35
7. KONTAKTORID .....	37
7.1 Eel-laadimine .....	37
8. AKUPAKI PISTIKUD .....	40
8.1 Kõrgevoolu pistik .....	40
8.2 Aku andmeside pistik .....	42
8.3 Kõrgepinge blokeerimissilmus .....	43
9. KAABLID.....	44
10. KÕRGEPINGE HARUKARP.....	45
10.1 Harukarbi projekteerimine .....	45

10.2 Harukarbi komponendid.....	46
11. LAADIMINE.....	48
11.1 CHAdeMO kiirlaadimine.....	49
11.1.1 Orion 2 CHAdeMO laadimine.....	50
11.2 Alalispingemuundur.....	50
12. ELEKTRISKEEM .....	52
12.1 Üldplaan ja paigutus.....	52
12.2 Elektrisüsteemi skeem ja töökirjeldus.....	52
KOKKUVÕTE .....	54
SUMMARY.....	55
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	56
LISAD .....	63

# EESSÕNA

Antud magistritöö „Retroauto elektriliseks ümberehitus - elektriajami ja kõrgepingeaku valik ning teostus“ on kirjutatud TalTech RetroEV elektriauto projekti jätkuna, mille kavandamine algas autori bakalaureuse omandamise käigus ning selle ehitamine jätkus autori magistriõpingute ajal. Sõiduki akupaki, kõrgepinge süsteemi ning elektriajami projekteerija oli autor, Georg Seema. Töö sai valmis TalTechi Mehaanika ja tööstustehnika instituuti kaasprofessori Raivo Sell juhendamisel. Lisaks aitasid auto ehitamisel paljud teised inseneriteaduskonna tudengid. Autor soovib avaldada neile suurt tänu.

Võtmesõnad: Elektriauto, liitiumaku, kiirlaadimine, elektriajam, kõrgepingesüsteem

## **SISSEJUHATUS**

Magistritöö eesmärgiks on projekteerida ja paigaldada TalTech RetroEV elektriauto projektis kasutatud Pontiac Fierole elektrimootor, akupakk ja laadimise lahendus. Samal ajal soovides säilitada sõiduki originaalset välimust.

Magistritöö teema valik:

Antud töö teema sai autor bakalaureuse õpingute käigus Elektriauto projekt kursusel. Kursuse meeskonna vahel jagati ära erinevad ülesanded ning autor valis enda vastutavaks alaks kõrgepingesüsteemid ja elektrimootori. Projekti käigus sai valitud ning paigaldatud autole elektriajam. Autor jätkas projektiga magistriõpingute ajal võttes endale eesmärgiks sõidukisse paigaldada aku ja saada mootor tööle ning sellest kirjutada oma magistritöö.

Magistritöö väljund:

- Akupaaki lahendus koos aku haldamise süsteemiga;
- Aku laadimise ja kiirlaadimise võimekus;
- Elektrimootori juhtimine;
- Kõrgepinge skeem.



# 1. ELEKTRIAUTO PROJEKTIST

2020 aastal lõi Raivo Sell vabaaine Elektriauto projekt, kus kavatseti Pontiac Fiero ümber ehitada elektriautoks. Plaanis oli paigaldada autole elektrimootor ning akupakk ja lisaks oli plaanis autole paigaldada ning arendada välja autonoomne juhiabisüsteem. Töö jaotati meeskondadesse:

- keretööd,
- elekter,
- mehhaanika,
- sõiduabisüsteemid.

Elekter jagunes eraldi kõrgepinge ja madalpinge gruppideks. 2022 moodustati uued grupid, kus jätkati sõidukiga tööd ning autole sai paigaldatud elektrilised akende tõstukid, kesklukk ning ninasse kapoti alla tehti kinnitus 12 V akule, alalispingemuundurile ning ka kõrgepinge akulaadijale.

## 1.1 Pontiac Fiero kirjeldus

Pontiac Fiero on sportiliku välimusega väike auto, mida General Motorsi tootis aastatel 1984-1988. Selle arendamine hakkas pihta 70ndate lõpus, et kaalu säästa kasutati polümeerist kerepaneele. Raha säästmiseks kasutati erinevaid detaile teistest GM poolt toodetud autodelt [1].



Joonis 1.1 Pontiac Fiero [1].

Esimesel aastal kasutas GM 2.5L nelja silindrist mootorit 4 käigulise manuaali või valikulise 3 käigulise automaatkäigukastiga. Koos automaatkastiga kaalus see mootor 375 naela ehk 170 kg [38]. GM suutis esimesel aastal ületada oma ette nähtud 100000 auto miinimum müügi numbri ja tegi mitmeid muudatusi järgnevate aastate mudelitele. Teisel aastal hakati kasutama Isuzu 5 käigulist manuaali ja lisati valikusse 2.8 V6 mootor, mis ühendati 4 käigulise käigukastiga [1]. Kolmandal aastal tehti Fierole mudeliuendus Fiero GT näol ning Sport ja SE säilitasid endise kupee välimuse. Valikusse pandi ka 5 käiguline manuaal [1]. Viimasel aastal tõsteti 4 silindrilise mootori võimsust ja tehti veel kosmeetilisi muudatusi püüdes langevaid müüginumbreid tõsta [1].

### **1.1.1 Fiero tulekahjud**

Pontiac Fierodel oli probleeme põlema süttimisega. Vastavalt Los Angeles Timesi artiklile Pontiac Fiero mootoripõlengute uurimise kohta, olid tulekahjud põhjustatud mootori õlileketest, mis kuumenedes põlema süttisid [2]. Artiklis mainitakse edasi, et GM sai üle 140 kaebuse, mille sees oli kuus vigastust. 1987. aastal kutsus ettevõtte lõpuks tagasi kõik Pontiac Fiero mudelid [2]. Sõiduki tootmine lõpetati vaid aasta hiljem ja pärast seda pole tootmist jätkatud [1]. Fiero polnud töökindel ega ka hea sportauto ja just sellepärast on ideaalne elektriautoks tegemise kandidaat [3].

## 2. ELEKTRIMOOTORI VALIK

Elektriauto projekt sai alguse elektrimootori valikust. Projekti meeskonnale anti ülesandeks uurida erinevaid elektrimootoreid mis võiks autole sobida.

Valikul oli eesmärkideks:

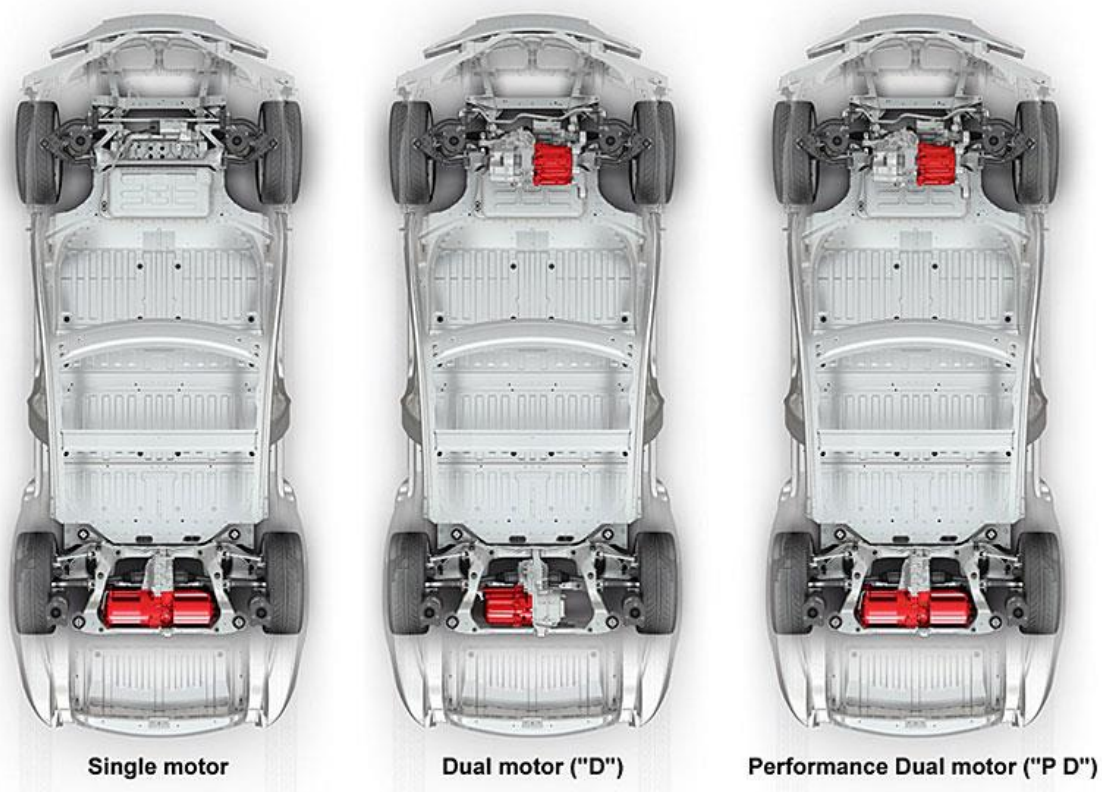
- Võimsus - oleks sama võimas või võimsam kui originaal sisepeõlemismootor (73 kW) [38];
- Soodne;
- Paigaldamise lihtsus.

Elektrimootoreid otsiti erinevatelt Euroopa elektrisõidukite vahendite ja varuosade tarnijatelt. Tabelis 2.1 on välja toodud leitud sobilikud mootorid.

Tabel 2.1 Elektrimootorite võrdlus [5], [6], [7], [8], [9], [10].

Tootja	Mudel	Võimsus kW	Pinge V	Hind €	Kaal kg	Lisainfo
Netgain	Hyper 9	88	96-180	2090	54.5	vajab lisaks kontrollirit, reduktorit, diferentsiaali
HEC- drives	HEC-80-55 kW	55	144	4190	124	
Tesla	Small drive unit (D)	220	404	1899	88	mootor, inverter, reduktor, diferentsiaal, kõik ühes. Puudub garantii
Tesla	Large drive unit (P D)	335 - 475	404	3527	132	

Netgain ja HEC mootorid vajaksid lisaks reduktorit ja ühendust diferentsiaaliga, et auto liikuma saada. Tesla mootoreid saab kutsuda elektrijamiteks, kuna neil on küljes juba inverter, reduktor ning diferentsiaal. Kui teistele mootoritele otsida kõik lisad ja teha neist elektrijamid tähendaks see seda, et need tuleks kokkuvõttes olulisemalt kallimad kui kasutatud Tesla lahendused. Tesla ajami ainsaks miinuseks peeti toe ja garantii puudumist. Seevastu aga on teada, et need on väga töökindlad. [6] See tõttu otsustati võtta risk ja kasutada Tesla platvormi. Tabelist 2.1 on näha et suurem „P D” mootor oleks väga võimas ja raske, see tõttu otsustati kasutada Model S tagumist väiksemat (D) mootorit. (vt Joonis 2.1)



Joonis 2.1 Model S elektriajami valik ja paigutus [10].

## 2.1 Tesla elektriajam

Projektis kasutatud elektriajami tootekood on 1037000-00-F.

Ajami tehnilised andmed [26]:

- Pinge: 240-404 V DC;
- Jõuvool: 650 A;
- Loogika pinge: 10.5 - 16 V DC;
- Loogika vool < 5 A (10 A kaitse soovituslik);
- Võimsus 220 kW;
- Efektiivsus: 92%;
- Reduktor: 9,32:1, avatud diferentsiaal;
- Mootori pöörlemiskiirus: 18000 RPM;
- Vääne: 330 Nm;
- Kaal: 88 kg;
- Maks. jahutus temperatuur: 85 C;
- Maks. jahutuse surve 130 kPA.

### **2.1.1 Hooldus**

Elektriautod on ehitatud selliselt, et neid peaks minimaalselt hooldama. Teslad ei ole selles osas erinevad. Hoolduseid tehakse salongifiltritel, piduritele ja kliima süsteemile. Mootori reduktoris õli sõiduki eluajal ei vahetata [11]. Kuna projekti jaoks osteti kasutatud Tesla Model S mootor millest õli oli välja lastud, siis pidi leidma mis tüüpi ja kui palju õli sinna käib.

Tesla hooldusmanulist leiti vastav info:

- Tagumisesilla mootori õli (suur ja väike): DEXRON VI [12];
- Reduktor, tagumine väike mootor – 2.25 l [13].

## **3. TESLA ELEKTRIAJAMI JUHTIMINE**

Selle lõputöö käigus uuriti võimalusi kuidas Tesla mootor tööle saada. Tesla mootori kasutamise raskendav tegur on, et selle inverterit juhitakse üle CAN-siini. [14] Teslal CAN-siini protokoll info pole ametlikult avalik. Kuigi internetist leiab inimesi, kes on üritanud seda dešifreerida ning oma leitud info avalikuks teinud [15]. Järgnevates alapeatükkides on välja toodud lahendused, mille abil saab Tesla mootoreid juhtida.

### **3.1.1 057 Technology kontrolleri**

057 Technology on arendanud oma eraldiseisva Tesla inverteri kontrolleri. Seda aga ei saa ilma ajamita tellida, 057 Technology müüb neid ainult töötava komplektina [16]. Nende komplekt on oluliselt kallim kui osta kasutatud ajam mujalt [5], [7]. See-eest saab neilt kindlalt töötava komplekti, mis on hea neile, kes ei soovi riski võtta.

### **3.1.2 EV controls T2C**

EV-controls T2C on sarnane eelnevale tootele, aga nad müüvad oma kontrolleri eraldi. T2C-l on armatuurlaua rakendus, mis töötab iPadiga üle Bluetooth ühenduse. Rakendusest saab muuta mootori parameetreid ja informatsiooni. EV-controls müüb oma toodet 2699 \$ eest ning väidab, et see töötab kõikide Tesla Model S ja X mootoritega [17].

### **3.1.3 Openinverter**

Openinverter on avatud lähtekoodiga elektrimootori kontrolleri projekt, mis võimaldab juhtida erinevaid Nissani, Toyota, Tesla ja teiste autotootjate elektrimootoreid. Asendades nende originaal inverteeri loogika trükkplaadi Openinverteri omaga saab mootorite üle täieliku kontrolli. Lisaks annab Openinverter lisafunktsionaalsust erinevate analoog/digitaal sisendite ja väljundite näol. Openinverteri saab konfigurida üle wifi kasutades igat seadet, mis seda toetab [18]. Openinverteri poes maksab Tesla asendusplaat 350 € [19]. Openinverter pakub head funktsionaalsust ning on hetkel ainuke avatud lähtekoodiga lahendus. Seetõttu valiti see Elektriauto projekti Tesla elektrimootori juhtimiseks.

## **3.2 Openinverteri paigaldamine**

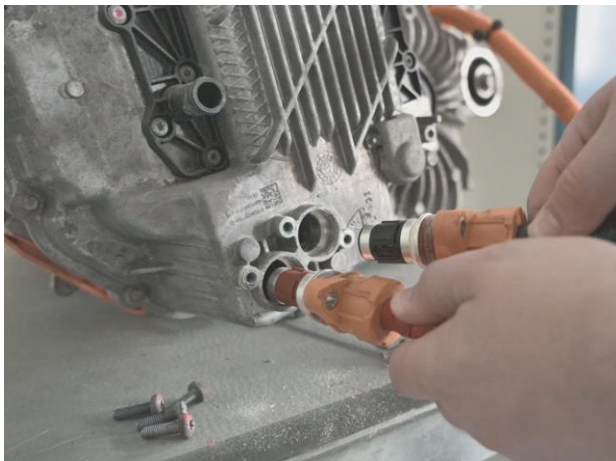
Tesla elektrimootori inverteeri loogika trükkplaat sai ära vahetatud järgides Openinverteri foorumit ja Openinverteri wikis viidatud videojuhendit [20], [21]. Põhjaliku juhendit inverteeri trükkplaadi vahetamiseks ei eksisteeri. Tesla kindlasti omab juhendeid oma mootorite koostamiseks, aga see pole avalik info. Seetõttu pidi mootori lahti võtma katseksitus meetodil. Mootori loogika plaadini jõudmiseks peab

lahti ühendama inverteeri ja mootori kaablid. Seda saab teha väljast, mootori ühel küljel on kate, mille all on kaableid kinni hoidvad poldid. (vt. Joonis 3.1)



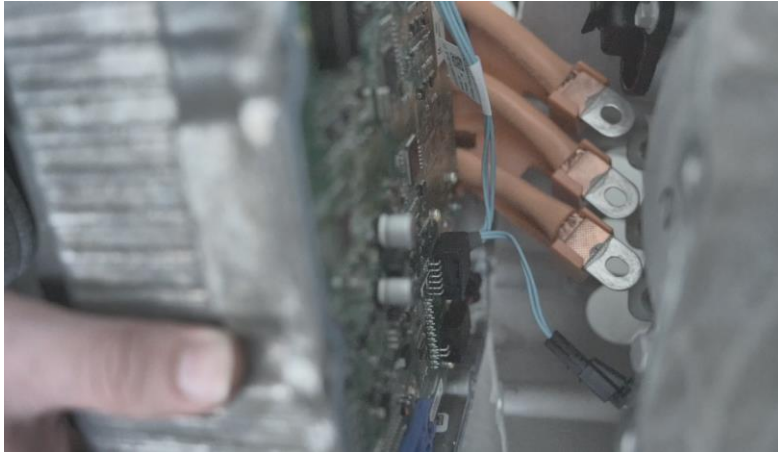
Joonis 3.1 Mootori inverteeri kaablite poldid.

Samuti peab eemaldama kõrgepingekaablid mootori küljelt (vt. Joonis 3.2)



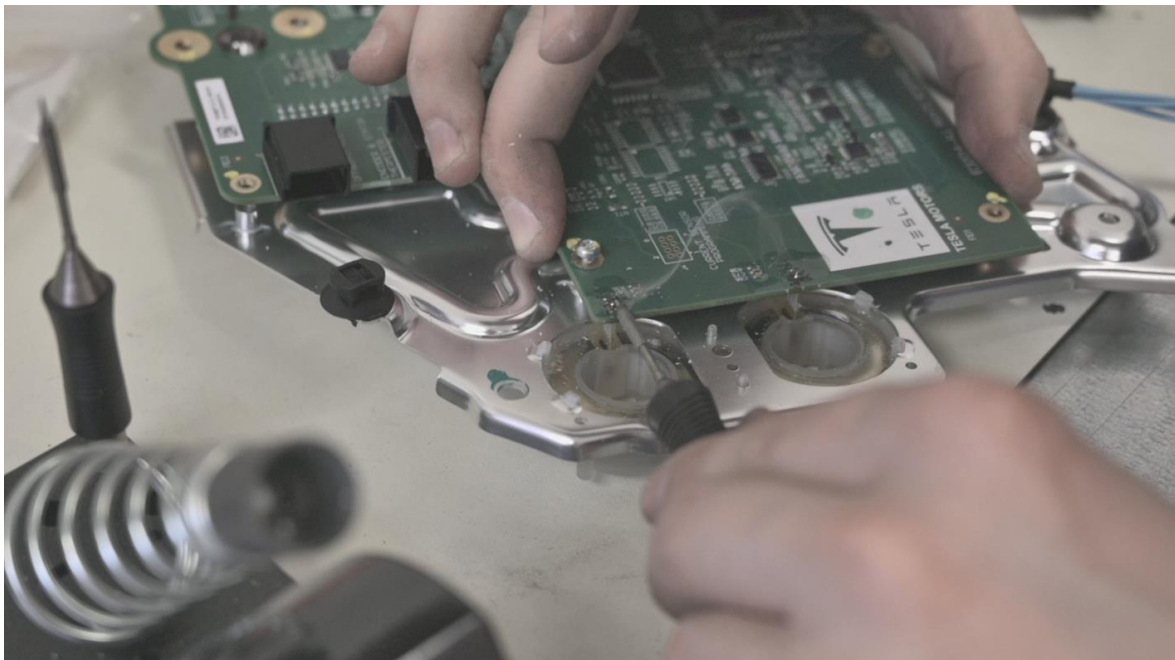
Joonis 3.2 Jõukaablid.

Siis sai inverteeri kaane poldid lahti teha ja selle koos inverteriga ettevaatlikult eemaldada. (vt. Joonis 3.3)



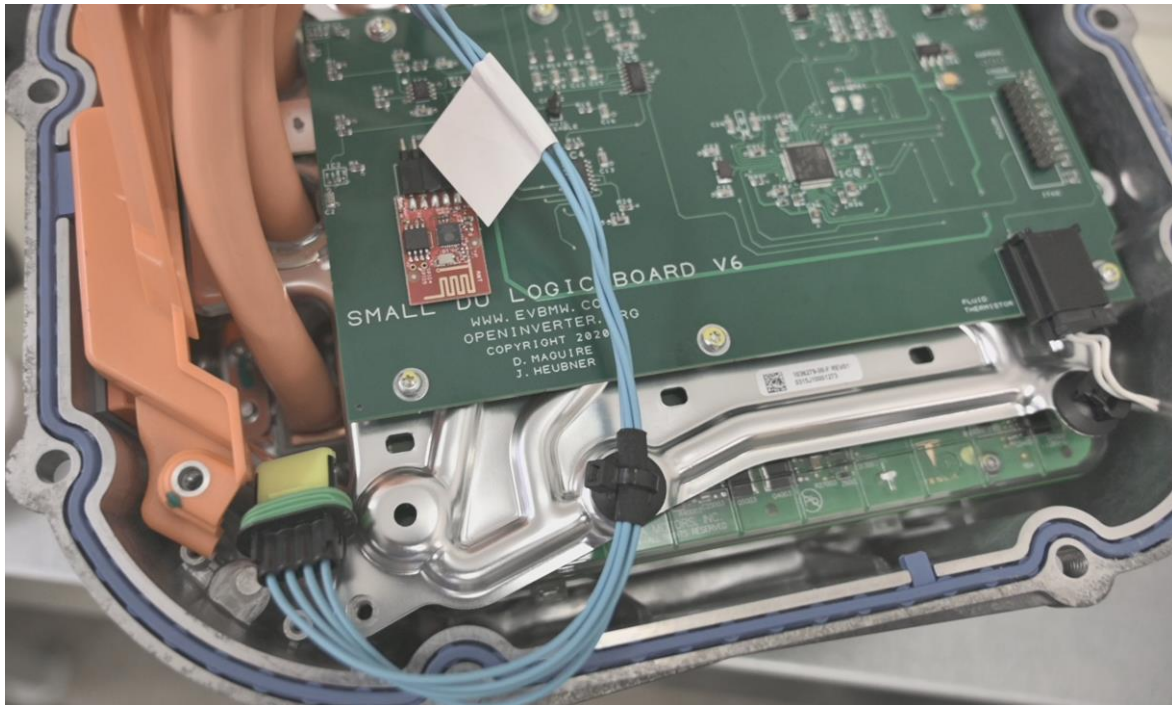
Joonis 3.3 Inverteri eraldamine.

Kuna trükkplaadi eemaldamist juhendav video on autori arvates väga hästi tehtud, siis otsustati töö mahu säästmiseks pilte vähendada ja pisidetailidesse mitte laskuda. Peale Tesla trükkplaadilt vooluanduritest eraldamist, (vt Joonis 3.4) asendati see Openinverteri plaadiga, ning ettevaatlikult pandi kõik täpselt tagurpidi kokku tagasi. (vt Joonis 3.5)



Joonis 3.4 Tesla vooluandurite eraldamine trükkplaadist.





Joonis 3.5 Openinverter paigaldatud.

### 3.2.1 Openinverteri test

Peale mootori kokku panekut kontrolliti, kas trükkplaadi vahetus oli edukas järgides juhendit Openverter wikis [22]. Testimiseks anti mootorile laboratoorsest toiteplokiist 50V pinget ning mootor õnnestus pöörlema saada kasutades Openinverteri veebileidest. Sellega tõestati, et trükkplaadi vahetus oli edukas.

## 4. AKU

Esineb kaks võimalust, kuidas ehitada elektriautole akupakki. Kas komplekteerida see ise akuelementidest või paigaldada sinna akupakk mõnest teisest sõidukist. Kuna akude isetegemine elementidest oleks suur ja riskantne ettevõtmine, siis otsustati kasutada turul olevaid akumooduleid. Teiste autode akumoodulite taaskasutamine võimaldab säästa projekti kulusid, vähendada saastet ning ressursse, mis kulub akude ümbertöötlemiseks.

Sõiduki aku kavandamisel seati mitu eesmärki ning lisaks tuli lähtuda mootori valikust tulenevatele nõuetele. Eesmärgiks oli komplekteerida aku millel on:

- Võimalikult hea sõiduulatus;
- Pinge 300 - 400 V;
- Vool 250A.

Akude valiku tegi erilisel keeruliseks fakt, et Fiero on väike sportauto, milles on vähe ruumi.

### 4.1 Akude valik

Akude valik sai tehtud 2020 projekti käigus peale mootori valikut. Kuna otsustati, et võetakse aku mõne teise sõiduki pealt, siis pidi uurima, mis akud saadaval on. Turgu uurides leiti, et saadaval olid Nissan Leaf, Mitsubishi Outlander, Tesla, Mercedes B250e ja BMW I3 akud. Nende seast osutusid Mercedes Benzi B250e akud kõige mõistlikumaks selle projekti jaoks.

#### 4.1.1 Mercedes B250e

Mercedes (Daimler) omandas 10 protsendise osaluse Teslas 2010 aastal [23].

Nende koostöö tulemusel sündis Mercedes B250e [24]. Sellese paigaldati Tesla poolt toodetud aku ja ka elektriajam, mis sarnaneb suurele Tesla Model S elektriajamile. (vt Joonis 4.1)



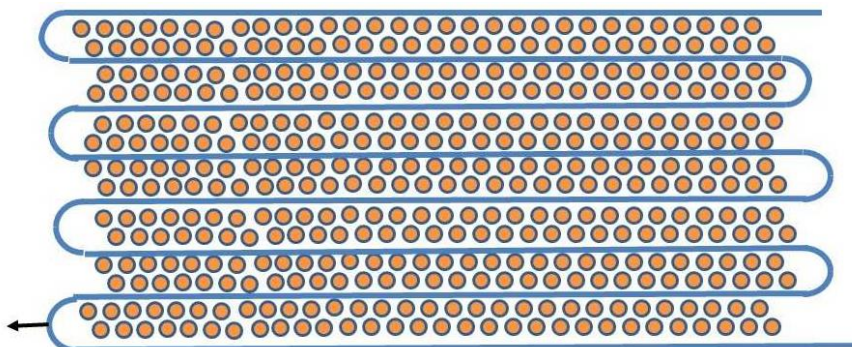
Joonis 4.1 B250e elektrimootor. [24]

B250e aku on aga oluliselt väiksem, 36 kWh ning ka natuke madalama nimipingega kui see, mis Teslades kasutatakse. Tesla akudes on 96 jadamisi aku gruppi (96S) ehk 355.2V [26]. Mercedese aku on 84S ehk 310.8V, see koosneb 12 moodulist. Moodulite kohta leiab suhteliselt vähe infot, aga kasutades leitud allikaid ja akut lähemalt uurides loeti kokku, et igas moodulis on 308, 18650 2700 mAh elementi. Iga moodul on ehitatud 7S44P konfiguratsioonis (7 jadamisi grupeeritud, igas grupis on 44 paralleeli) [27], [28], [29].

Leitud info põhjal sai aku moodulite mitteametlikeks andmeteks:

- Mahutavus 118.8 A;
- Nimipinge 25.9 V;
- Energia 3 kWh;

Igal moodulil on oma akuhaldussüsteem ja kaks temperatuuriandurit. Moodulid on sisemiselt vedelikjahutatud. Akude vahelt on läbipõimitud jahutuseks lintvoolik sarnaselt teistele Tesla moodulitele. (vt Joonis 4.2) Ühe B250e 3 kWh akumooduli mõõtmed on 915 x 180 x 88.9 mm ja kaal 18kg. (vt Joonis 4.3).



Joonis 4.2 Tesla aku jahutus [30].



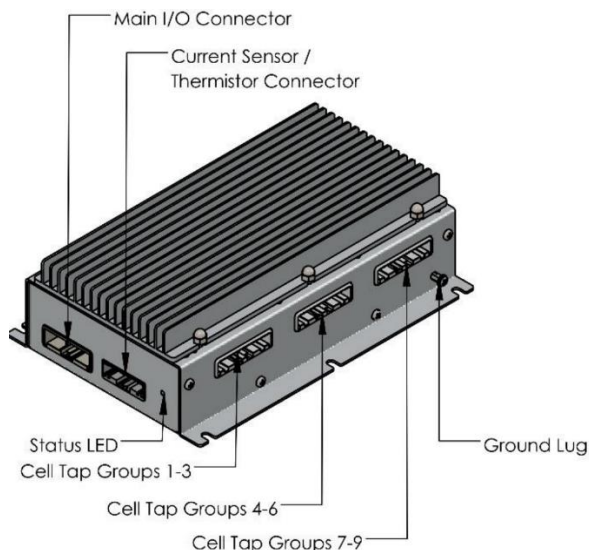
Joonis 4.3 B250e akumoodul [31].

## 5. AKU HALDAMISESÜSTEEM

Valitud akule tuli leida akuhaldussüsteem, inglise keeles *battery managment system*, edaspidi lühendatult BMS. Selle ülesandeks on kontrollida, et aku töotaks ainult lubatud parameetrite piirides ning tagada, et kõik aku elemendid oleks pingelt tasakaalus. Lisaks arvutab BMS aku täituvuse taset ning võimaldab juhtida teisi aku süsteemi kuuluvaid elemente nagu laadijad. Ilma selle süsteemita ei oleks liitiumakude kasutamine mõeldav, kuna ohutust tööpiirist väljas liitiumaku võib valesti kasutades süttida [32], [33].

### 5.1 BMSi valik

Elektriauto projekti jaoks oli vaja BMSi, mis suudab hallata 84 jadamisi aku gruppi ning sellele lisaks oli vaja kiirlaadimise tuge, mis on oluline pikemateks sõitudeks. Turgu uurides leiti, et ainukeseks sobilikuks BMSiks, mis rahuldab kõiki nõudeid osutus Orion 2. (vt Joonis 5.1)



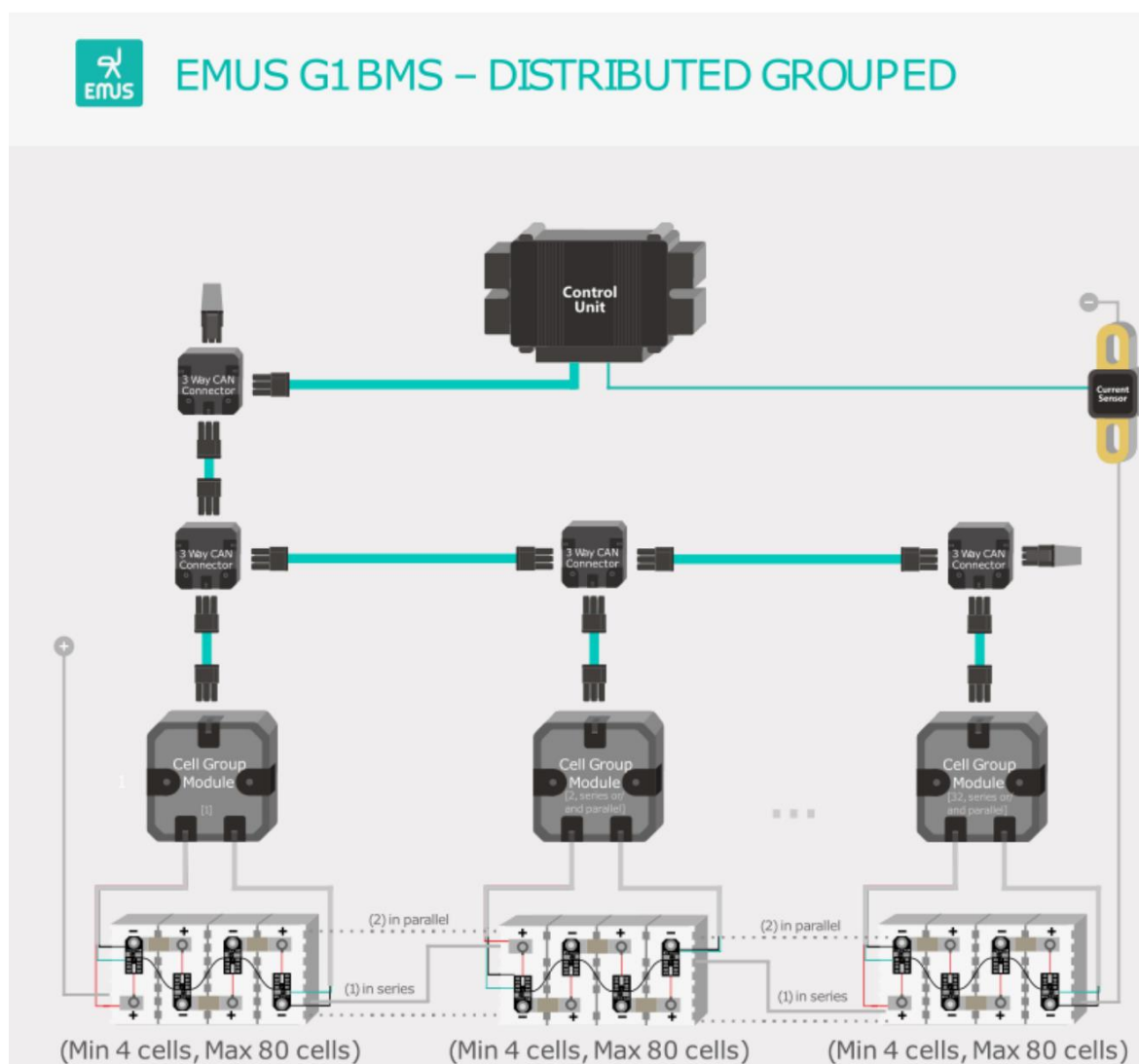
Joonis 5.1 Orion 2 BMS [46].

Orion 2 on Ewert Energy Systems poolt arendatud ja USAs toodetud keskne BMS lahendus. Keskne tähendab, et tal pole lisamooduleid ja kogu juhtimine asub ühes kabis. Orion 2si tehakse kolmes variatsioonis, millest kõige suuremal on võimekus hallata kuni 180 elemendist jadaühendusega akut. Lisaks on see ainuke järelturu BMS, mis toetab CHAdeMO ning SAE J1772 standartidega kiirlaadimist [35]. Elektriauto projektis kasutatakse Orion 2 96S versiooni.

Järgnevates alapeatükkides on välja toodud teised levinumad BMSid, mida kasutatakse isetehtud elektriautode ehitamisel ja ka päikesepaneelide energiasalvestus akupankade jaoks kodudes. Need variandid oleks ka sobinud kui poleks vaja kiirlaadimist.

### 5.1.1 EMUS G1 BMS

EMUS G1 on hajutatud BMS lahendus, tähendab, et see koosneb põhikontrollerist ja alamoodulitest, mis käivad aku moodulite külge. (vt. Joonis 5.2)



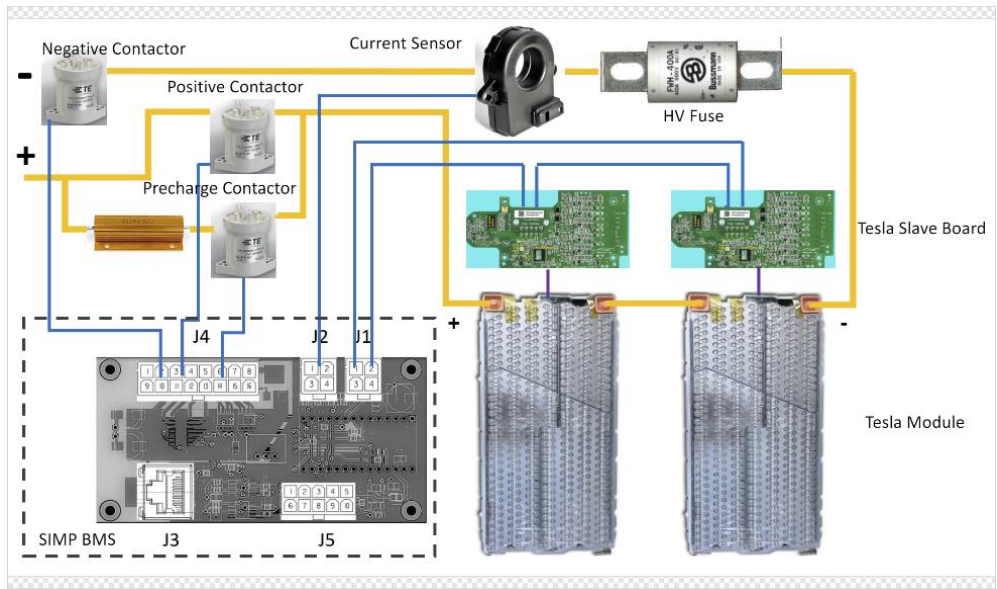
Joonis 5.2 EMUS G1 BMS [36].

See sobib väga hästi isehitatud akupakkidele, mis on laiali jaotatud ning näiteks koduse päikeseenergia salvestussüsteemide teostamiseks. EMUSel puudub kiirlaadmise tugi [35].

### SIMP BMS

Autori arvates nendest kõige huvitavamaks lahenduseks on SIMP BMS, see on avatud lähtekoodiga projekt, mille ülesandeks on võimaldada erinevate sõidukite akupakkide kasutamist nende originaal integreeritud BMS lahendustega. See on teistest

süsteemidest kõige odavam, aga kahjuks puudus sellel kiirlaadimise tugi, mis on Orion 2 BMSil. Kuigi projekt väidab, et see töötab kõikide Tesla akudega, pole tegelikult teada, kas ta töötaks koos Tesla poolt arendatud B250e akudega [37]. (vt Joonis 5.3)



Joonis 5.3 SIMP BMS koos skeemiga [37].

## 6. AKUKAST

Akukasti ülesandeks on hoida akud turvalises ja kuivas keskkonnas ning kaitsta seda mehaaniliste vigastuste eest. Lisaks sellele peab see kaitsma inimesi, et nad ei saaks kuidagi kontakti minna kõrgepingega. Kõrgepinge tavaliselt tähendab pinget üle 60 V [53]. Kasti projekteerimist alustati peale B250E akukasti laiali lammutamist. (vt. Joonis 6.1)



Joonis 6.1 B250e akukast.

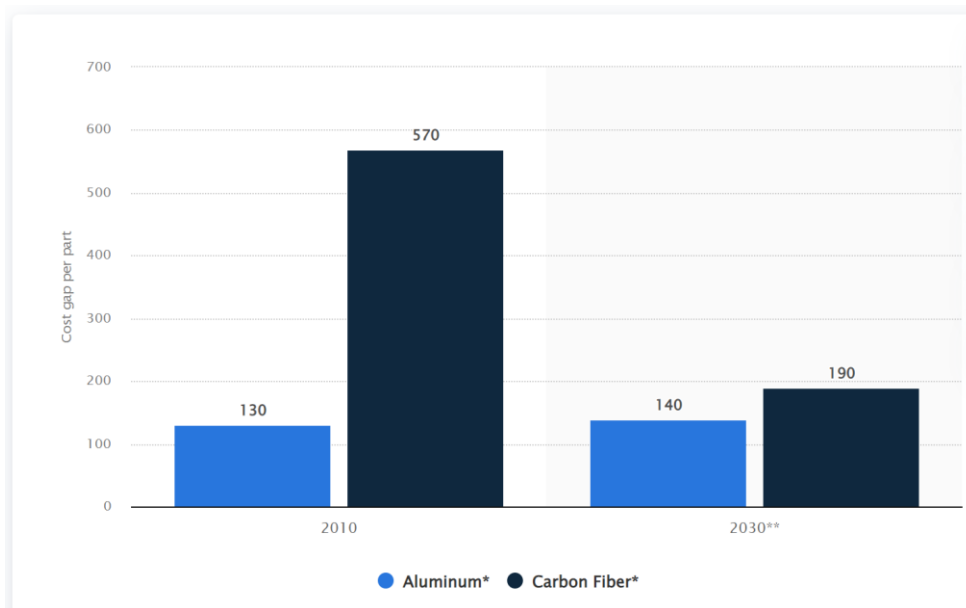
### 6.1 Akukasti projekteerimine

B250e moodulid oli vaja Fierosse paigutada. Autos oli teoreetiliselt ruumi akude jaoks auto endises mootoriruumis, keskel kütusepaagi asemel ja ka natuke ruumi ninas kapoti all. Võimalus oleks akud jagada ära üle auto, aga see tähendaks, et peaks ehitama mitu akukasti. Iga kasti vahele oleks vaja veekindlaid pistikuid, igale kastile oma BMSi või siis jagatud BMSi süsteemi. Aku kasti osadeks jagamine lisaks keerukust töökindluse ja veekindluse saavutamisel. Probleemide korral peaks hakkama viga otsima mitmest kohast. Sellepärast otsustati, et tehakse üks akukast, millele on hea ligipääs, ning mille kaudu saab ohutult ligi kõikidele akudele ja kus on hea ülevaade kogu süsteemist. Nii palju vaba pinda leidis ainult mootoriruumis, mis on hea auto tasakaalu poolest, kuna



see oli enne keskmootoriga. Arvestades eelnevalt välja toodud masse, kaalub uus aku ja elektriajami lahendus 129 kg rohkem kui eelnev sise põlemismootor.

Enne kasti mudeldamist mõeldi, mis materjalist võiks kasti ehitada, aga kiiresti jõuti järelduseni, et teras on kõige odavam lahendus. Fiero raam on tehtud terasest, siis seda on ka kõige lihtsam keevitada. Kaalu säästmiseks oleks võinud kasutada alumiiniumi, mis on kallim kui teras või teha selle isegi eriti kallist süsinikkiust. (vt. Joonis 6.2) Teistest materjalidest tehes oleks pidanud tegema eraldiseisva akukasti, mis oleks polditud või liimitud Fiero raami külge.



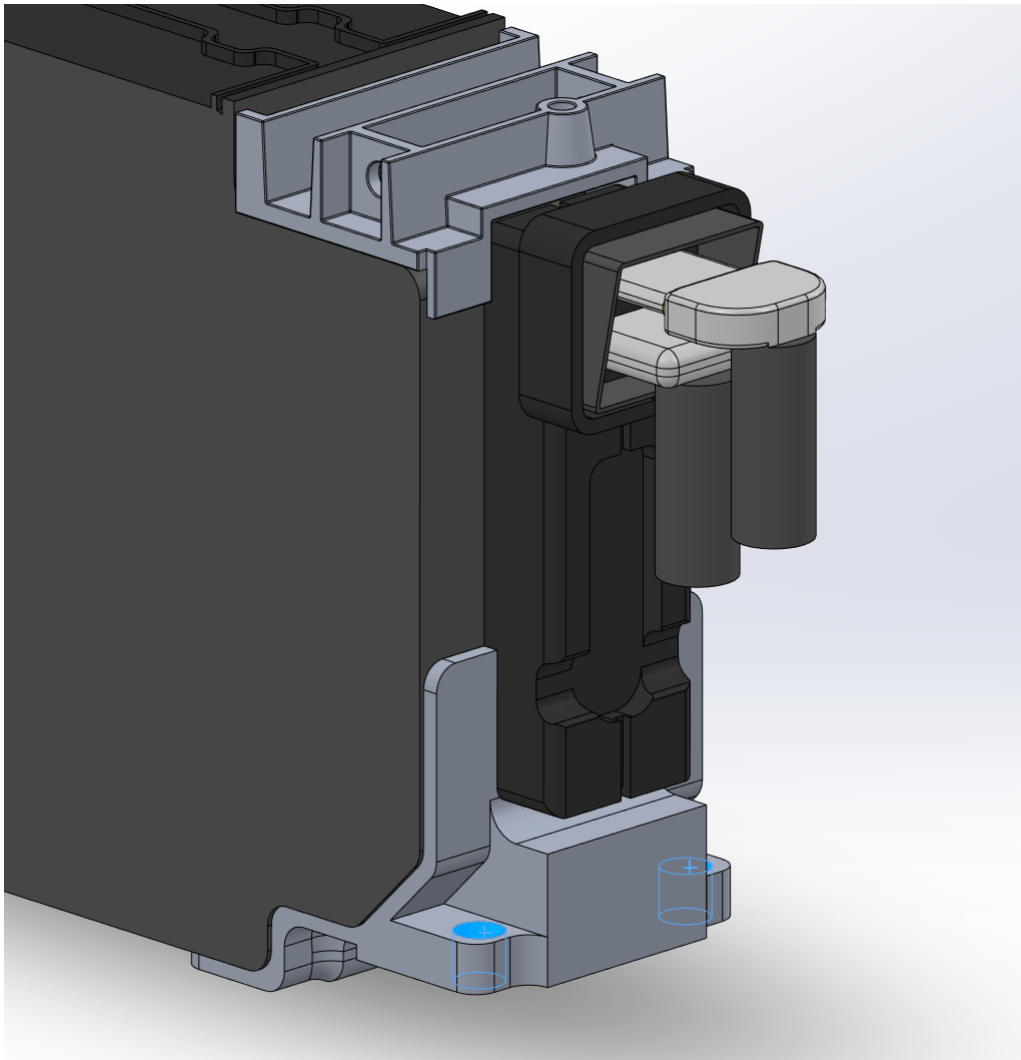
Joonis 6.2 Al ja CF detailide protsentuaalne hinnasuhe võrreldes terasega 2010 ja 2030 [39].

Materjali valikul võeti arvesse ka seda, et plastdetailid akukastis peavad vastama UL 94 V-0 tulekindluse standardile [40]. UL 94 V-0 standardi kohasel peab detail lõpetama põlemise 10 sekundi jooksul lubades plastiku tilkasid, mis ei põle [41]. Akukasti kaaneks sobib kasutada UL 94 V-0 vastavat läbipaistvat Makrolon GP polükarbonaadist lehte [42]. Seda sobib liimida Wacker ELASTOSIL N2034 hermeetikuga, mis on samuti UL 94 V-0 vastav [43].

### 6.1.1 Akude paigutus kastis

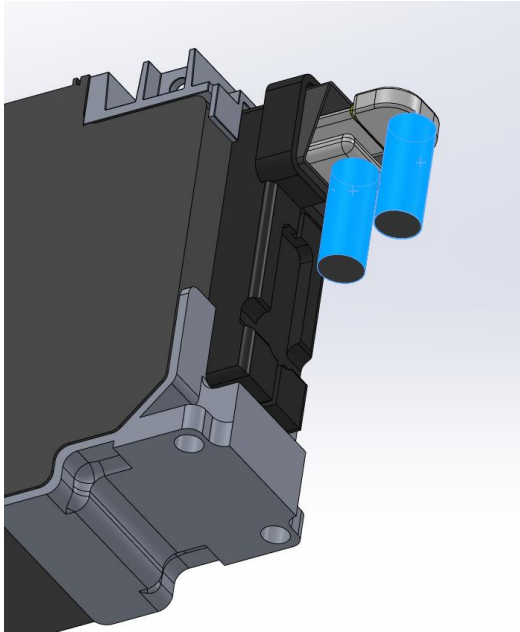
Mercedese akukastis olid kõik 12 moodulit paigutatud kõrvuti, selliselt nende paigutamiseks Fierosse ruumi polnud ja tervik pakk tuli laia lüüa. Akumoodulite paigutuse projekteerimiseks mõõdeti ära mootoriruumi suurus ning mõõtudest lähtuvalt tehti ligikaudne 3D mudel, kus sai proovida erinevaid akude paigutusi. Aku mooduli mudel saadi GrabCADist [73]. Kasti projekteerimisel pidi silmas pidama, et mooduli kinnitus poldidele oleks ligipääs. Iga moodul kinnitub 5 poldiga. 4 polti on mooduli otstes

ja üks suurem polt käib kinni aku keskele alt. Seetõttu pidid akud kasti minema pealt poolt, ning mootori ja aku vahele pidi jääma ruumi, et alumisi polte saaks keerata. Joonisel 6.3 on ära toodud siniselt mooduli poldi avad.



Joonis 6.3 B250e aku mooduli kinnitusavad.

B250e aku moodulid on vedelikjahutusega ning nende jahutusvoolikute ühendus kohad on aku otsades. Jahutusvoolikute ühendamiseks pidi samuti kastis ruumi jätma. (vt. Joonis 6.4)



Joonis 6.4 B250e aku mooduli jahutusvoolikute otsad.

Erinevaid paigutusi proovides jõuti lõpuks Joonisel 6.5 nähtava lahenduseni. 11 moodulit mahutati vertikaalselt amordipüstakute vahele ja üks keerati risti nende ette, kabiini seina vastu. Jahutuse voolikud viidi välja kasti vasakust tagumisest nurgast, ning BMS ja muud pistikud jäeti paremale küljele.



Joonis 6.5 3D mudel - akude paigutus Fieros.

### 6.1.2 Akukasti ventilatsioon.

Akusid koormates tõuseb nende temperatuur, mis omakorda mõjutab kasti sisest õhutemperatuuri ja seetõttu ka rõhku. Rõhu tasakaalustamiseks projekteeriti kasti kaanele veekindel rõhu kompenseeriv element. See ühtlustab kasti rõhku väliskeskkonnaga, aga niiskus sealt sisse ei pääse. Selline element vähendab tihendite ja kasti kaane hermeetikule tekkivaid stresse, pikendades nende eluiga [59].

Järgnevas lõigus on kasutatud kõrvuti ühikuid C ja Celsius (°C), mis võivad tekitada segadust. C-määr on aku tühjenemise kiirus võrreldes selle maksimaalse mahutavusega. Seda ühikut kasutatakse akude andmelehtedes. 1C tähendab, et tühjendusvool tühjendab kogu aku 1 tunniga. 100 Ah aku puhul võrdub 1C vooluga 100 A. [60] Jooniselt 6.6 näeme, et NCR18650B aku elemendi soojenemine 1,5C juures on ligikaudu 0,75 °C /min. (1,5C tähendab B250e aku puhul 180 A voolu.)

Akukasti ruumala lihtsustades on  $1,20 \text{ m} * 1,30 \text{ m} * 0,25 \text{ m} \approx 0,39 \text{ m}^3$ , (6.1)

Ühe akumooduli ruumala  $\sim 0,0146 \text{ m}^3$  leiti kasutades peatükis 4.1.1 välja toodud mõõte. 12x akumooduli kogu ruumala kokku on  $\sim 0,1752 \text{ m}^3$ . Kastis on järelikult  $\sim 0,2148 \text{ m}^3$  õhku.

Kasutades Charle's ruumala seadust [47] leiame kui palju akukasti õhu ruumala suureneb, kui õhk soojeneb 0,75 °C võrra.

$$V_2 = V_1 / T_1 * T_2 \approx (0,2148/293,15)*293,9 \approx 0,2153 \text{ m}^3, \quad (6.2)$$

Kus  $V_2$  – lõppruumala,  $\text{m}^3$

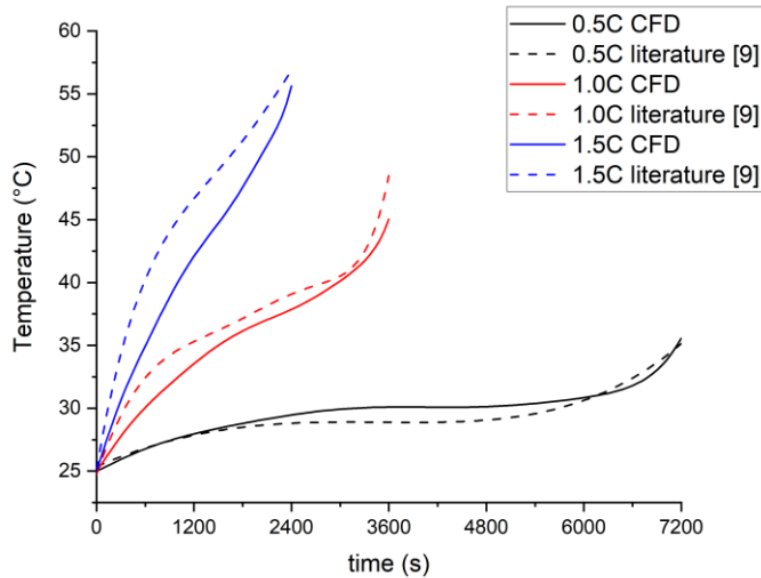
$V_1$  – algruumala,  $\text{m}^3$

$T_1$  – algtemperatuur, K

$T_2$  – lõpp temperatuur, K

Järelikult kasti õhu ruumala suurenes ainult  $0.00055 \text{ m}^3$  ehk 0.55 l.

Proovides ekstreemsemat olukorda, kui soojast 20 °C garaažist liikuda otse -40 °C külma, siis väheneb kastis õhu ruumala  $\sim 43,96 \text{ l}$ . Kuna õhuga soojusülekanne ei toimu hetkega, siis saab kindel olla, et 50 l/min õhu läbivusega klapp RND 455-01112 suudab kastis rõhu ühtlustada [45].



Joonis 6.6 NCR18650B soojenemine tühjaks laadides [44].

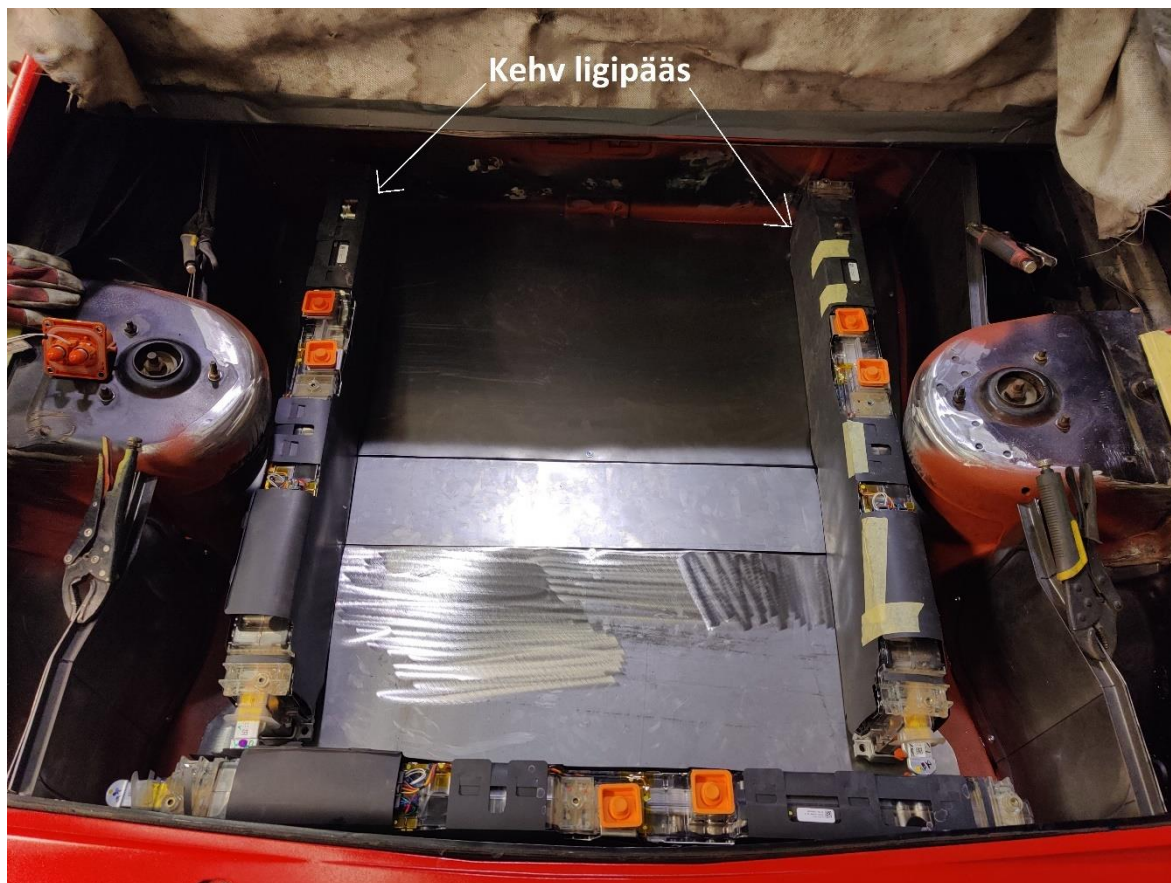
## 6.2 Akukasti ehitamine

Eelnevalt oli ettevõtte Raketibaas ehitanud elektriauto projektile uue alusraami Tesla elektriajama jaoks. Kuna neil oli juba kogemust selle autoga, siis usaldati aku kasti ehitamise ülesanne ka neile. Ehitamiseks anti neile kaasa mõned aku moodulid ning kavandatud mudel, kus oli ära toodud soovitud akude paigutus ning erinevate sisendite ja väljundite asukohad. Akukast kohandati võimalikult hästi mootoriruumi kontuuriga. Kasti põhja keevitati 3 suuremat laserlõigatud tala, mille sisse on keermestatud avad akude kinnitamiseks. Talad toetuvad otse Fiero raamile ning kinni keevitatult seovad kaks raami poolt üheks. Kasti vasakusse äärde pandi AN 12 liitmikud vedelikujahutuse jaoks. Liitmikute täpne paigutus jäeti joonisel lahtiseks, et lihtsustada ehitamist. Liitmikud valiti Raketibaasi poolt, kuna need olid neil juba olemas ja see mõõt sobis Fiero originaal sisepõlemismootori jahtus torude mõõduga. (vt. Joonis 6.7)



Joonis 6.7 Jahutuse liitmikud.

Eialgu oli plaanitud, et üks risti olev aku tuleb auto tagumisse otsa, aga ehitamise käigus Raketibaasis märgati, et selliselt oleks oluliselt keerulisem paigaldada polte. Need jääks kabiini seinä äärde ja kasti kaane äärde alla. (vt. Joonis 6.8) Sellepärast tõsteti risti olev aku kabiini poolse seinä äärde, nii liikusid akud taha poole tekitades ruumi poltide kinnitamiseks.

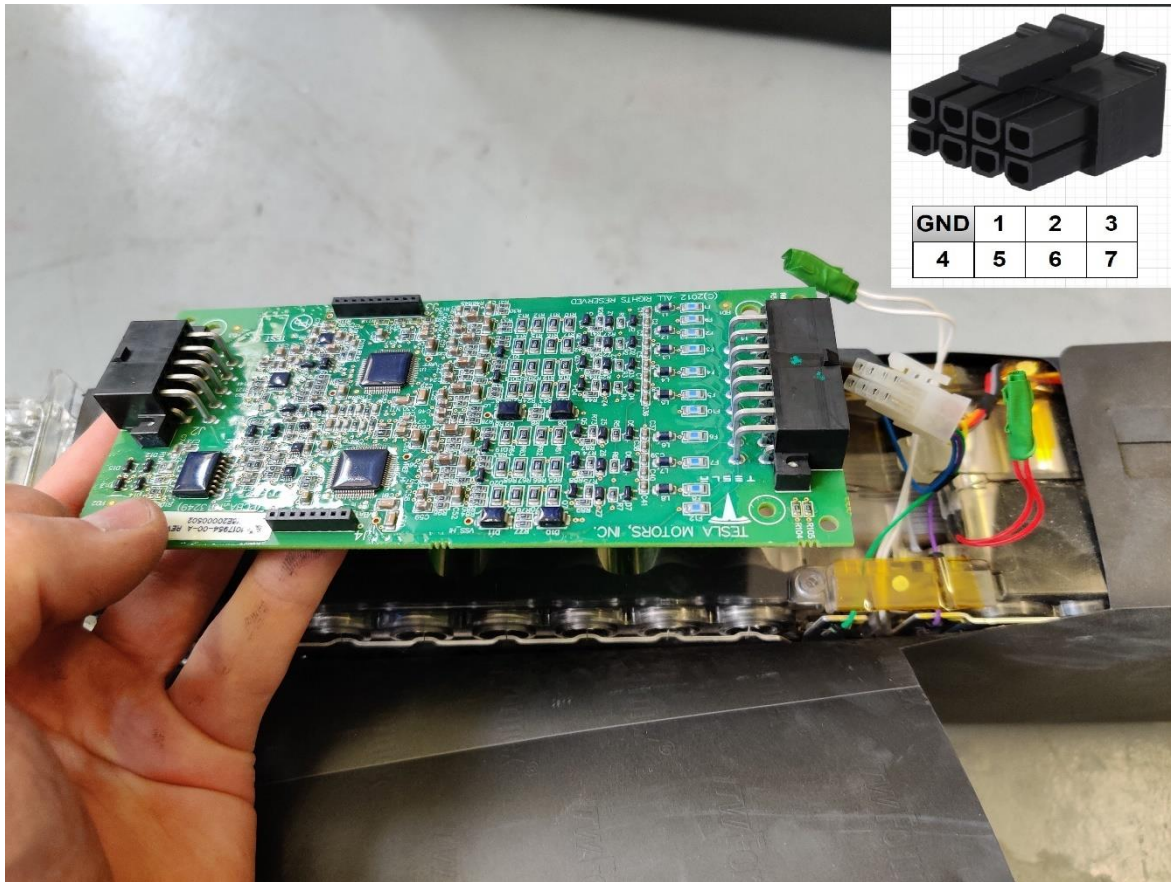


Joonis 6.8 Akude halb paigutus.

Kasti peale tehti äärik, mille peale saab paigutada läbipaistva polükarbonaat katte. Kate liimitakse hermeetikuga hiljem, kui kõik tööd aku juures valmis saavad ning on veendunud, et kõik süsteemid töötavad stabiilselt.

### **6.3 B250e moodulite modifitseerimine**

Peale auto Raketibaasist tagasi saamist alustati akude paigaldamist autosse. B250e moodulitelt eemaldati originaal BMSid ja mõõtepunktide juhtmed paigutati ümber väiksemasse valgesse Molex micro fit pistikusse. (vt Joonis 6.9)

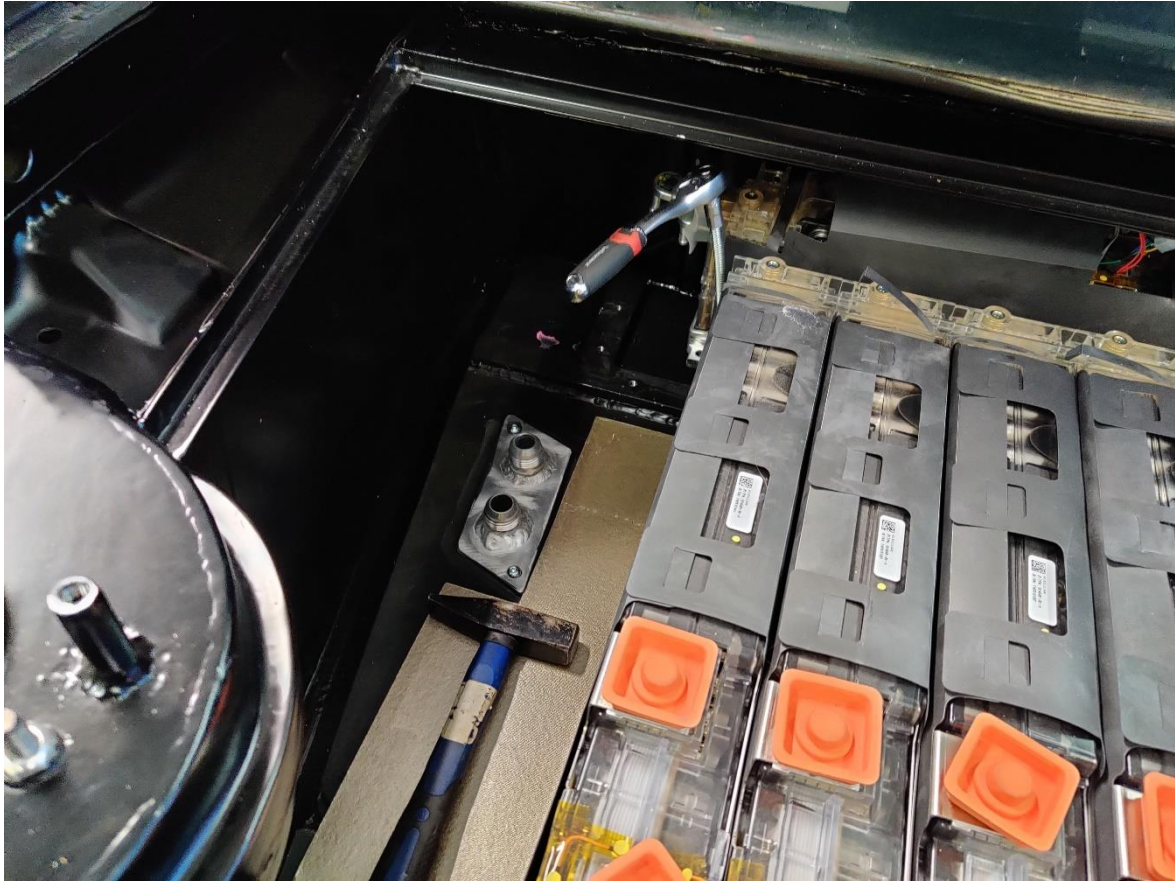


Joonis 6.9 Originaal BMSi eemaldamine ja uus pistik.

## 6.4 Akude paigaldamine kasti

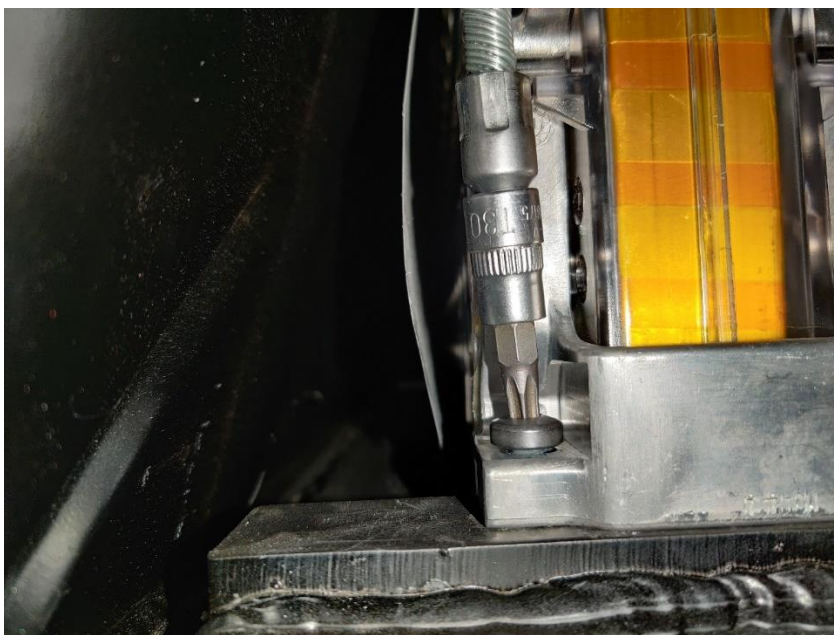
Aku moodulite kasti paigaldamiseks on ainult üks kindel järjekord kuna ruumi on selles väga napilt. Risti olev aku paigutati esimesena ja lükati kasti kabiini seina paremasse nurka. See tekitas ruumi et 11 ülejäänud aku moodulit kasti tuua. Võrreldes Joonisel 6.8 nähtuga on Jooniselt 6.10 näha, et tagumisi polte sai edukalt keerata, kuna need ei paiknenud enam ääriku all ja seina vastas.





Joonis 6.10 Akude kinnitamine.

Kui kõik muu läks lihtsamaks, siis risti oleva aku kinnitamine muutus palju keerulisemaks. Selle tagumised poldid olid täielikult peidus ääriku all ja seina vastas. Nende poltide kinnitamiseks oli vaja kasutada painduvat narre pikendust. (vt. Joonis 6.11)



Joonis 6.11 Akumooduli kinnitamine kabiini seina ääres.

Aku moodulite jahutuse voolikute otsad asuvad akukasti tagumise seina ääres, ning neid oli lihtne ühendada järjest akusid sisse tõstes. Paigutus võimaldab head ligipääsu, kui peaks juhtuma, et on näha lekkimist. (vt Joonis 6.12) Akude kasti paigaldamiseks kulus kokku 2 päeva.



Joonis 6.12 B250e akumoodulite jahutus.

## 6.5 Orion 2 ühendamine

BMS mõõtepunktide juhtmestik tehti järgides täpselt Orion 2 juhendit ja ka juhtmestiku generaatorit nende kodulehel. Orion 2 juhend lubab aku pakki poolitada kaitsmetega. Orioni sisse on ohutuse tagamiseks tehtud 2.5 kV isolatsioon iga mõõtepunkti kaabli pistiku vahel. Iga pistik kannab 36 mõõtepunkti signaali, seega isolatsiooni barjäärid on iga 36 elemendi järel. See on tehtud selleks, et peale aku poolitamist kaitsme eemaldamisega ei saaks vool liikuda läbi mõõtepunktide juhtmestiku [48].

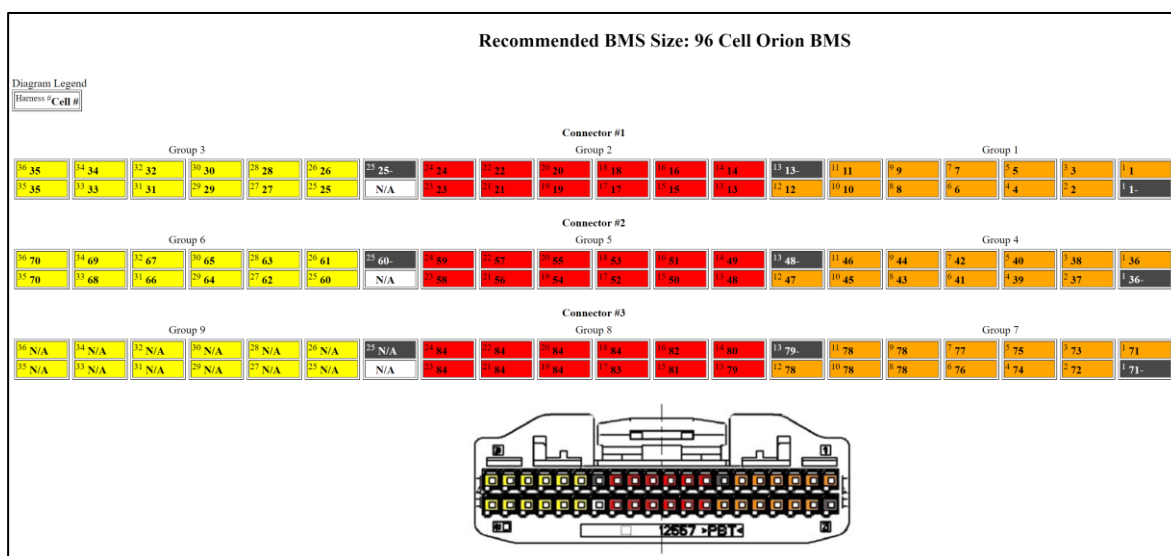
Igas B250e akumoodulis on 7 jadamisi aku elemendigruppi. Peale viiendat mooduli saab kaitsme panna füüsiliselt 35 ja 36 elemendi grupi vahele, juhend aga nõuab, et kaitse jääks mõõtepunktide 36 ja 37 vahele [48]. Seega ühendati 35. elemendi grupi külge kaks mõõtepunkti, 35 ja 36. See on lubatud juhendi järgi (vt. Joonis 6.13)

### Rules for fewer than 12 cells

- If fewer than 12 cells are populated in a group, unused cell taps must all be connected to the highest potential cell in that group. For example, if 6 cells are populated in a group, taps 6 – 12 all must be connected to the positive tap on cell 6.\*

Joonis 6.13 Väljavõte Orion 2 juhendist: reegliid alla 12 elemendi jaoks [48].

Sama tehti ka peale kümnendat moodulit, elemendi grupi 70 külge ühendati uue kaabli mõõtepunktid 35 ja 36. Kolmanda mõõtepunkti kaabli jaoks jäi järgi ainult 2 aku moodulit. Selle puhul ühendati 84. elemendi grupi külge kuus mõõtepunkti juhett, mõõtepunktid 18-24. Kogu BMS aku mõõtepunktide ühenduse pistiku skeem on näha jooniselt 6.14. BMS mõõtepunktide juhtmete krimpimiseks kulus kokku kaks päeva.



Joonis 6.14 Orion 2 mõõtepunktide pistiku skeem [46].

### 6.5.1 Orion 2 test

Peale juhtmestiku valmimist ühendati aku moodulid jadamisi kokku ning käivitati BMS esimest korda. See oli autori jaoks pingeline hetk kuna, kui eelnevalt peaks mõõtepunktide juhtmestikus olema viga tehtud võib pistiku ühendamisel Orion 2 kahjustada saada [48]. Õnneks kõik toimis ja BMS näitas, et aku 84 elemendi gruppi on tuvastatud. Terve aku peale oli elementi gruppide vaheline pingete erinevus ainult 0,008 V. Lisaks on näha, et kogu paki pinge oli testimise hetkel 314 V. (vt. Joonis 6.15)

Live Cell Data

<b>Highest Resistance:</b> 0.43 [001]	<b>Highest Cell Volt:</b> 3.744 [073]	<b>Pack SOC:</b> 50.0% <input type="radio"/> Internal Resistances
<b>Lowest Resistance:</b> 0.43 [001]	<b>Lowest Cell Volt:</b> 3.736 [063]	<b>Pack Amps:</b> <input type="text" value="0.0A"/> <input checked="" type="radio"/> Live Cell Voltages
<b>Avg Cell Resistance:</b> 0.43	<b>Avg Cell Voltage:</b> 3.739	<b>Pack Voltage:</b> 314.0V <input type="radio"/> Open Cell Voltage
<b>Delta Cell Resistance:</b> 0.00	<b>Delta Cell Voltage:</b> 0.008	<b>Current Limits:</b> +352A / -132A
	<b>Temperature:</b> 20°C / 20°C	<b>Relay Status:</b> Discharge:OFF, Charge:OFF, Safety:OFF

Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Cell 5	Cell 6	Cell 7	Cell 8	Cell 9	Cell 10
3.740	3.738	3.737	3.739	3.739	3.738	3.739	3.741	3.739	3.739
3.741	3.739	3.738	3.738	3.741	3.740	3.740	3.742	3.742	3.740
3.740	3.740	3.739	3.739	3.740	3.740	3.739	3.739	3.740	3.739
3.738	3.740	3.739	3.738	3.738	3.738	3.740	3.738	3.737	3.739
3.738	3.738	3.738	3.741	3.738	3.738	3.739	3.738	3.738	3.739
3.739	3.737	3.737	3.738	3.738	3.737	3.738	3.739	3.736	3.737
3.738	3.737	3.736	3.737	3.740	3.737	3.736	3.739	3.738	3.737
3.738		3.744	3.741	3.741	3.743	3.742	3.741	3.742	
				3.742	3.741	3.740	3.742	3.741	
3.739									

\*Red cell background indicates a cell is balancing

**Balancing Status:** Not Active

Export Live Cell Values (CSV)    Record Data    Stop Record

84 (96 Max)    CAN#: 1    Trouble Codes Detected: 0    Profile Checksum: 5CE6

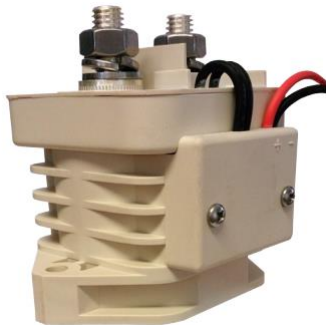
Joonis 6.15 Orion 2 BMS esimese testi tarkvara ekraanitõmmis

## 7. KONTAKTORID

Kõrgepinge kontaktor on elektromehhaaniline lülitusseade, mis magnetjõu abil lülitab elektrikontakte [49]. Kontaktor kujutab endast suurt releed. Need leiavad laialdast kasutust elektri- ja ka hübriidsõidukites peamise turvaseadmena. Releed terminina kasutatakse laialdaselt erinevates tööstusharudes väikese ja keskmise võimsusega seadmete jaoks. Termin kontaktor on levinum suure võimsusega seadmetes. [49] Teades, et B250e-I oli 132 kW võimsust, siis saab arvutada, et selle saavutamiseks tarbiti täis laetud akust 374 A voolu [25]. Arvestades vajaliku pinget ja voolu hulka ning komponentide saadavust valiti kõrgepinge kontaktoriteks Durakool DEVR40 seeria kontaktorid. (vt Joonis 7.1)

DEVR40 tehnilised andmed [52]:

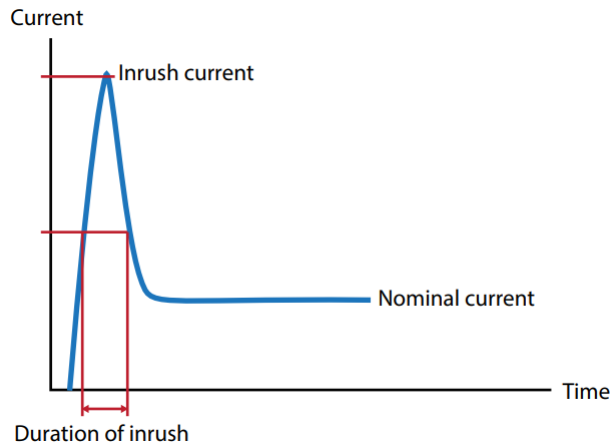
- Nimipinge 450 V
- Vool 400 A
- Hetkeline vool (90 s): 1000 A
- 1 s vool 2000A – 350 V
- Lülitus signaalipinge 9-36 V
- Signaali vool 100 mA (max 2A)



Joonis 7.1 Durakool DEVR40 [52].

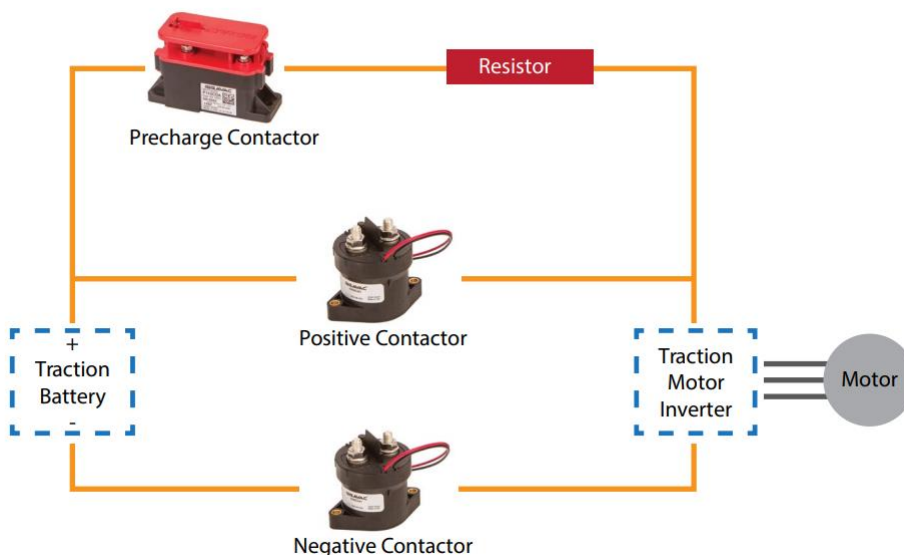
### 7.1 Eel-laadimine

Eel-laadimise vajadus tuleneb sellest, et vooluringi ahelas esinevad tarbijate ja laadijate sees kondensaatorid, mis akupaki vooluringi ühendamisel hakkavad ennast laadima, tekitades ühenduse hetkel väga kõrge voolu (ing.k *Inrush current*). (vt. Joonis 7.3) Hetkeline vool võib ulatuda tuhandetesse ampritesse kahjustades pistikuid või põhjustades kontaktorite kinni keevitumise [49].

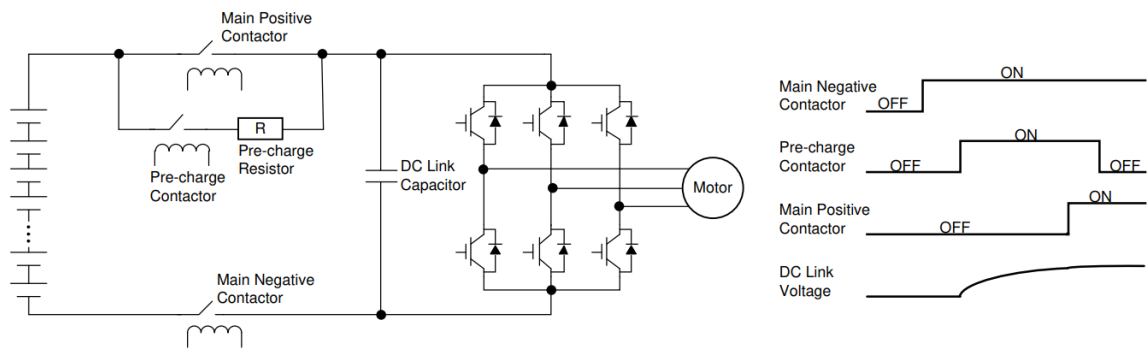


Joonis 7.2 Vool ilma eel-laadimiseta [51].

Voolu maandamiseks kasutatakse eelpingestust. Eelpingestuse lahendus koosneb eraldi suurest takistist ja väiksemast kontaktorist kõrgepinge kontaktorite kõrval. (vt Joonis 7.3). Takisti ja vooluahelas eksisteerivad kondensaatorid moodustavad sagedusfiltri (Ing.k RC-filtri) [51]. Kui eelpingestus kontaktor suletakse laevad inverteeri kondensaatorid end tasapisi täis läbi takisti kuni pinge ühtlustub. (vt. Joonis 7.4) Eel-laadimise süsteem töötamiseks on vaja kontrolleri, mis suudab kontakteid juhtida. Selleks tavaliselt võib olla BMS, käesolevad projektis aga kasutatakse kontaktorite juhtimiseks Openinverteeri, millel on spetsiaalsed väljundid eel-laadimise juhtimiseks. Iga kord kui süüde sisse lülitatakse, teostab see automaatselt eel-laadimis tsükli. Kui ühendada akulaadija ja DC/DC muundur ka samade kontaktorite järgi, siis on võimalik hakkama saada ainult ühe kõrgepinge kontaktori paariga.



Joonis 7.3 Eel-laadimis süsteemi skeem [51].



Joonis 7.4 Eel-laadimis tsükkel [49].

Eel-laadimiseks kasutatakse väiksemat Durakool DEVR05 seeria kontaktorit (vt. Joonis 7.5) ning alumiinium korpuses 30  $\Omega$  takistit, Arcol HS100 30R F. (vt. Joonis 7.6)



Joonis 7.5 Eel-laadimise kontaktor [54].



Joonis 7.6 Eel-laadimise takisti [55].

## 8. AKUPAKI PISTIKUD

Kõrgepinge pistikuid on vaja, et akukastist kaablid välja saada. Pistikud võimaldavad ohutuse tagamiseks auto hooldustööde ajaks kõrgepinge kaablid kasti küljest lahti ühendada.

### 8.1 Kõrgevoolu pistik

Originaal B250e akupaki küljest leitud kõrgepinge pistik on TE 9-2141220-1. (vt. Joonis 8.1) See on ilmselt spekulatsioonide originaalseadme tootjatele müüdav toode, kuna TE koduleht ütleb, et selle pistikuga ühilduvaid tooteid ei eksisteeri [56]. Ei leitud ka võimalust neid juurde soetada. Samuti ei leitud täpset infot selle kohta, kui suure voolu ning pingega jaoks TE 9-2141220-1 mõeldud on.



Joonis 8.1 TE 9-2141220-1 pistik.

TE pistiku asenduseks leiti Amphenol UPCP012ALS2 ja vastus UPCR012ALS1. (vt. Joonis 8.2)

Amphenol pistiku tehnilised andmed [57]:

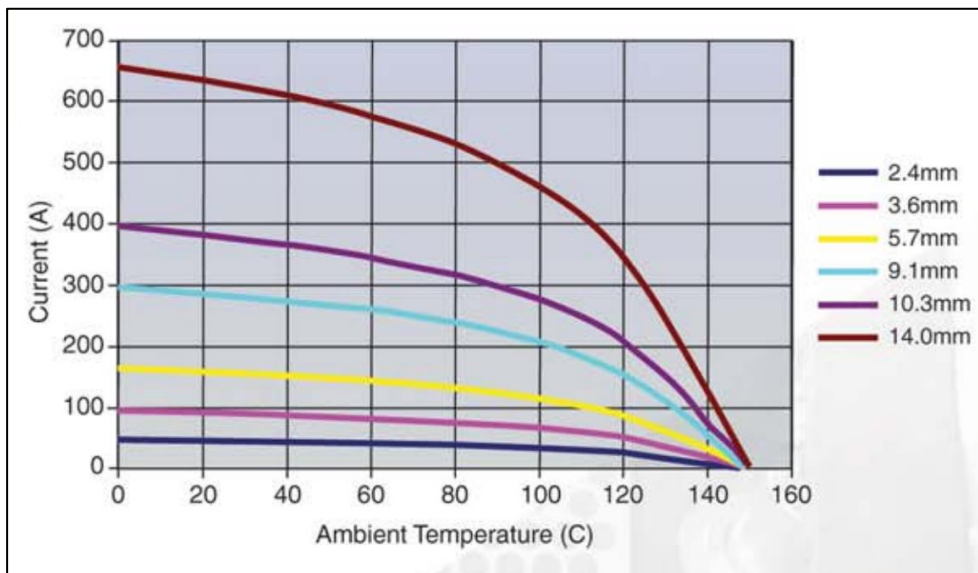
- Vastupidavus - kuni 100 ühendamise tsüklit;
- Elektromagnetilise müra varjestus;
- IP67 ja IP69k kui ühendatud;
- Kõrgepinge blokeerimissilmus;
- Tulekindlus UL 94 V-0;
- Kontaktid 9,1 mm.



Amphenoli pistik on väga sarnane TE pistikule, õieti Amphenoli vastus sobitub ideaalselt TE pistikuga kokku, kuid neid ei saa koos kasutada, kuna Amphenoli kontaktid on suuremad. TE kontaktid on 8,0 mm, Amphenolil on 9,1 mm. Uue pistiku andmelehest leiab, et uus pistik sobib kuni 250 A voolule, mis klapi 9,1 mm kontaktide temperatuurist sõltuva lubatud voolu graafikuga. (vt. Joonis 8.3)



Joonis 8.2 UPCR012ALS1 vasakul, UPCR012ALS1 paremal [57]



Joonis 8.3 Kontakti temperatuur (C) vs lubatud vool (A). [58]

## 8.2 Aku andmeside pistik

Mercedes B250e akukastis oli andmeside vahetuseks kasutusel TE 776163-5 pistik. (vt. Joonis 8.4) Seda sama pistikut kasutati uuesti. Andmeside pistiku kaudu jõuab akuhaldussüsteemi:

- BMS toide;
- CAN-siin 1 ja 2;
- Kontaktorite toide;
- CHAdeMO kontaktorite signaalid;
- Väljub jahutussüsteemi pumba signaal.



Joonis 8.4 TE 776163-5 pistik.

### **8.3 Kõrgepinge blokeerimissilmus**

Kõrgepinge blokeerimissilmus, inglise keeles high-voltage interlock loop, edaspidi kasutatud lühendina kui HVIL on hübriid- ja täiselektrisõidukite turvaelement, mis kaitseb inimesi sõiduki kokkupaneku, remondi, hoolduse ja kasutamise ajal. HVIL-süsteem on loodud kaitsma kõiki, kes võivad auto elutsükli, mis tahes etapis kokku puutuda elektrisõiduki kõrgepingekomponentidega [61].

HVIL kasutab pidevat madalpingeaahelat, mis jälgib kõiki elektrisõiduki (EV) kõrgepinge pistikuid ja komponente. Kui madalpinge HVIL-signaal mingil põhjusel katkeb, näitab see, et kõrgepingesüsteemis on probleem, millega tuleks tegeleda [61].

Kui HVIL-i ahel katkeb, käivitub diagnostiline veakood ja sõiduki juhtpaneelile ilmub hoiatus, mis annab juhtidele teada, et nad peaksid sõiduki hooldusesse viima. Veakood annab ka hooldustehnikutele teavet probleemi olemuse kohta, et tehnikud saaksid vältida ohutusega seotud probleeme [61].

Projektis kasutatavatel pistikutel on kõigil HVIL valmidus olemas, aga kuna isehitajatele ei leidu vabalt kasutatavaid HVIL kontrollereid, siis selle turvaelemendi kasutamine jäeti töö mahu poolest kõrvale. Seda on võimalik tulevikus ohutuse nimel edasi uurida ja lahendada.

## 9. KAABLID

Elektriautodes peab kasutama varjestatud kaableid, kuna nende elektrisüsteemis on palju kiiresti lülituvaid vooluahelaid, mis tekitavad elektromagnetilist müra. [64] See sama müra võib häirida veojõu- ja muude mehaanilisi süsteeme juhtivaid signaale. Sõidukid muutuvad targemaks, üha rohkem andureid, protsessoreid, ja ühendusi on paigaldatud nende arhitektuuridesse – seetõttu muutub varjestuse vajadus ohutuse seisukohast kriitiliseks [62].

Kõrgepinge kaablid said valitud hinnates B250e originaal akupaki kaableid ja ka kaableid Tesla mootori küljes. Aku pakki sai valitud varjestatud 50 mm<sup>2</sup> kaablid. 50 mm<sup>2</sup> kaabli lubatud pidev vool on 210 A [63].

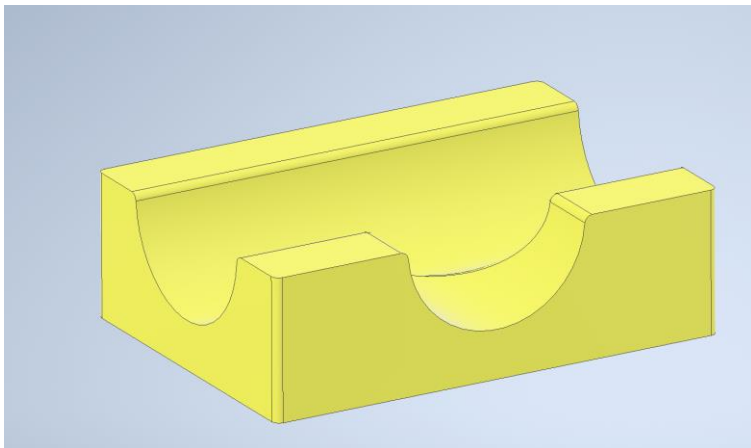
Teades aku pinget ja läbi kaabli lubatud voolu saab 50 mm<sup>2</sup> kaabel edastada 73.5 kW energiat. See on võrdne Fiero originaal mootori võimsusega. Autorile aga pakkus natuke üllatust fakt, et Mercedes aladimensioneeris B250e akupaki pistiku ja kaablid. Kuid edasi uurides meenus, et kuigi Tesla mootori maksimaalne võimsus on 220 kW. Mootori pidev hinnanguline võimsus on ainult 30 kW ning 15 minutit suudab toota 75 kW [26]. Järelikult on kaablid ja pistikud on dimensioneeritud mõistlikkuse piires.

## 10. KÕRGEPINGE HARUKARP

Harukarpi on vaja selleks, et akust tulev kõrgepinge kaablid jagada ära mootori, laadija, kliimapumba või salongisoojendi ning muude tuleviku lisade vahel. Igal elektriautol on oma harukarbid ja neid on ka võimaik varuosadena soetada, kuid et neid uuesti kasutada, on neile vaja vastavaid pisikuid, mida on raske hankida. Sellepärast otsustati teha harukarp ise.

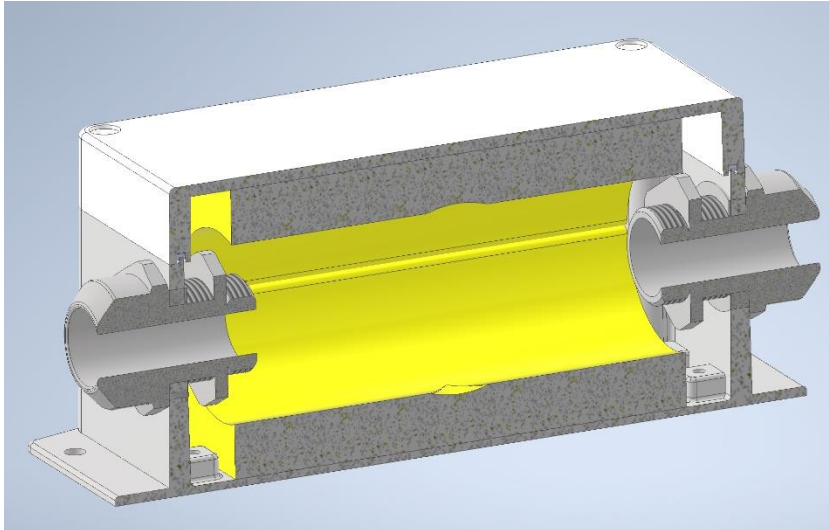
### 10.1 Harukarbi projekteerimine

Elektriauto kaablid on varjestatud ning sellega peab arvestama karbi projekteerimisel. Veekindluse ja elektromagnetilise ühilduvuse tagamiseks valiti varjestatud kaabliläbiviigud. Varjestatud läbiviikude tõttu pidi valima metallist kaitsekarbi, kus tehakse ühendused. Karbi sisestele juhtme otsadele krimbitakse kaablikingad, mis omavahel karbi sees kokku polditakse. Karbi sisse 3D prinditakse UL 94 V-0 tulekindlusele vastava polükarbonaat materjaliga juhtmete hoidjad. (vt. Joonis 10.1).



Joonis 10.1 Karbi insolatsiooni detaili 3D mudel.

Nende printimiseks sobib näiteks Nanovia PC V0 materjal [74]. Hoidjad tagavad, et ühendused ei saa vastu metallist karbi korpusest lühistuda. Karbi külgedel tehti sobivad avad kaabli läbiviikude jaoks. Joonisel 10.2 on näha harukarbi läbilõige.

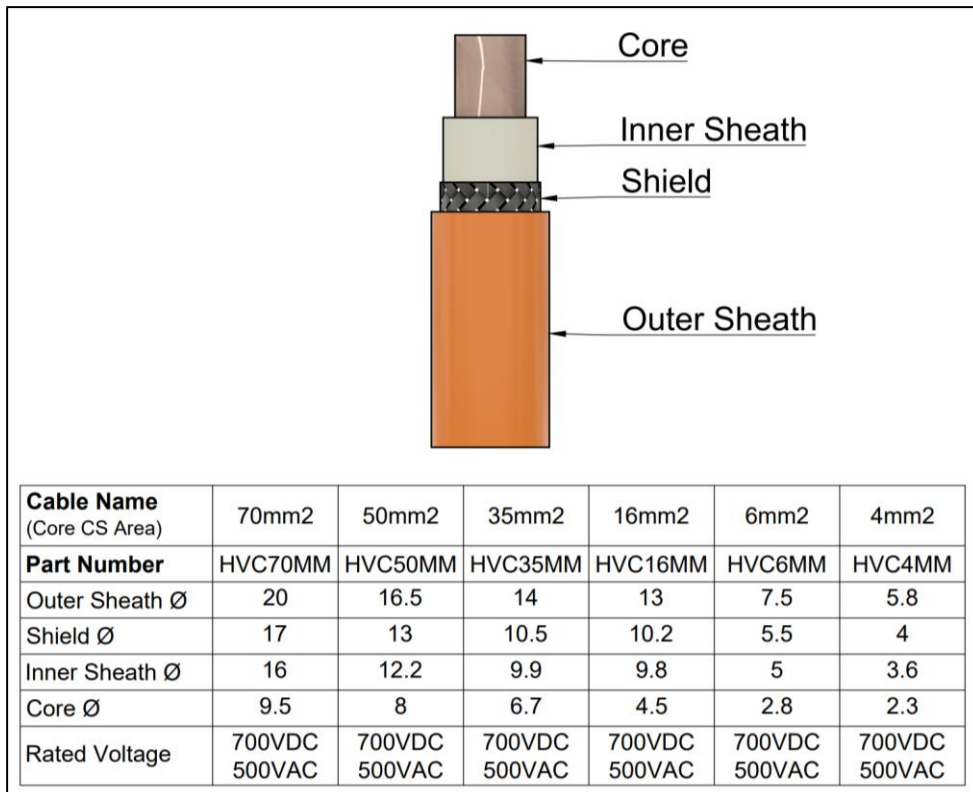


Joonis 10.2 Projekteeritud kõrgepinge harukarbi läbilõige

Projekteeritud lahendust on võimalik lihtsalt skaleerida suuremaks või väiksemaks vastavalt kaablite arvule või mõõdule. Näiteks auto ninasse võib luua väiksema harukarbi, kuna seal pole vajadust nii suurtele kaablitele. Harukarbi koostu, karbi isolatsiooni detaili ja RND kaitsekarbi joonis on lisatud tööle. (vt. Lisa 1, Lisa 2, Lisa 3)

## 10.2 Harukarbi komponendid

Jooniselt 10.3 on näha et 50 mm<sup>2</sup> kaabli diameeter on 16.5 mm ning selle mõõdu järgi valiti kaabli läbiviik. Harukarbiks valiti metallist kaitsekarp RND 455-00426 ning kaabli läbiviikudeks WISKA EMSKV 25. Toodete 3D mudelit leiti vastavate komponentide tootjate kodulehtedelt [75], [76].



Joonis 10.3 Varjestatud kaablite mõõdud [65].

## 11. LAADIMINE

Orion 2 toetab vahelduvvoolu laadijaid järgnevatelt tootjatelt [77]:

- Brusa;
- Eltek Valere;
- Elcon / TC Charger;
- Current Ways;
- ZiVan.

Nende laadijate saadavust ja sobivust uurides leiti, et Current Ways ja Eltek Valere saadavus on kehv. Zivan toote valikust ei leitud laadijat, mis suudaks projekteeritud akut laadida. Elcon / TC valikus on kaks 440 V laadijat, mis suudavad projekteeritud akut laadida. Brusa laadijad on 4-5x kallimad kui Elcon / TC tooted [66]. Valiti Elcon HK-J-H440-20 laadija, kuna selle saadavus Euroopas oli hea. (vt. Joonis 11.1)



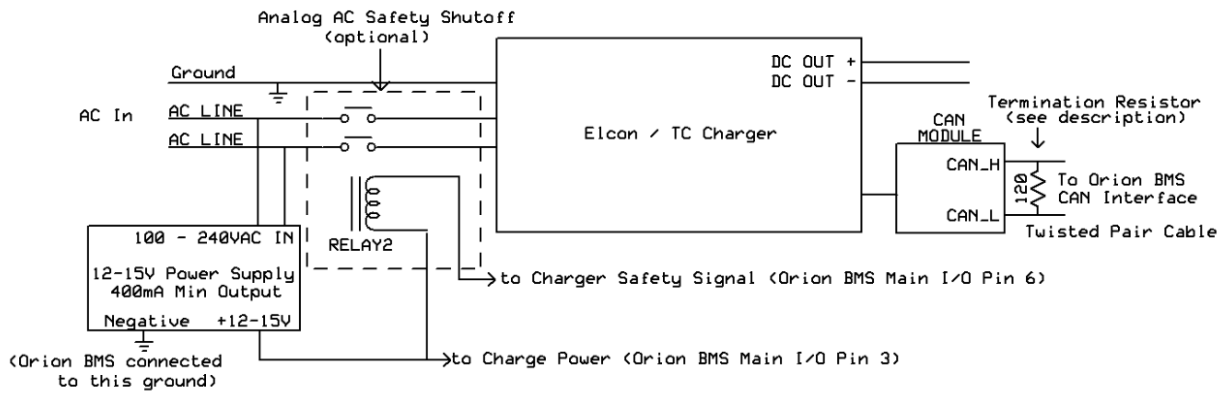
Joonis 11.1 Elcon HK-J-H440-20 laadija [67].

Elcon HK-J-H440-20 tehnilised andmed [67]:

- Võimsus kuni: 6.6 kW;
- Väljund pinge: 110-440 V;
- Maksimum vool: 20 A;
- Sisendid: CAN-siin;
- Efektiivsus:  $\geq 93\%$  täiskoormusel.

Laadija ühendatakse vastavalt skeemile, mis on näha Joonisel 11.2.



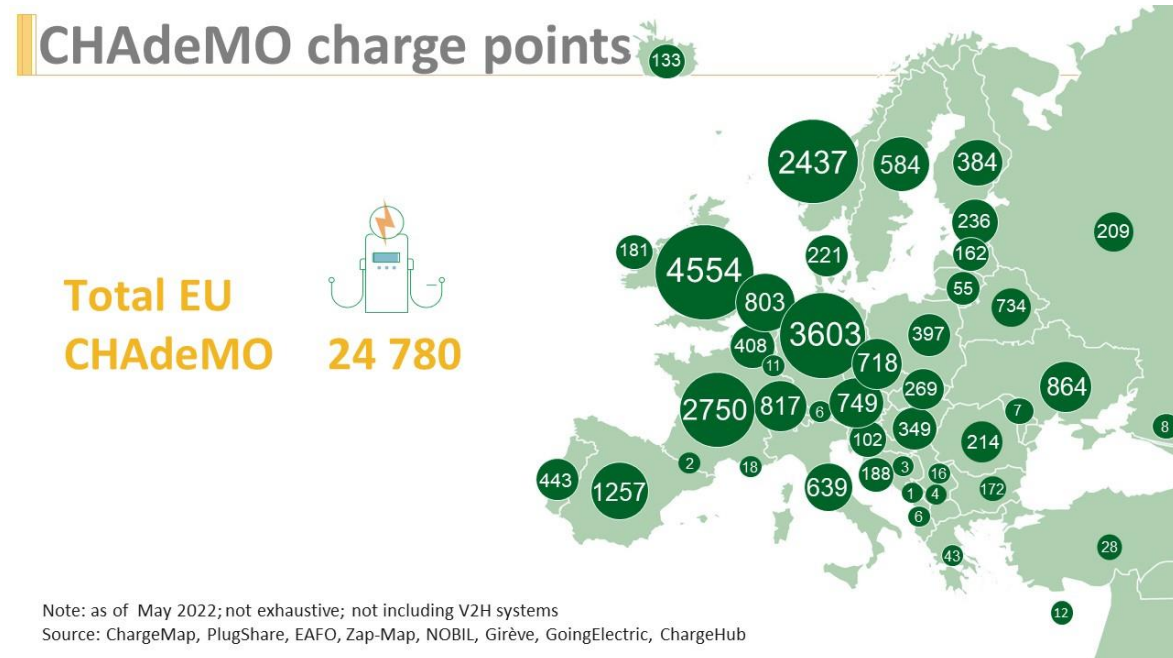


Joonis 11.2 Laadija ühenduskeem [78].

## 11.1 CHAdeMO kiirlaadimine

CHAdeMO on kiirlaadimise standard, millele panid aluse Mitsubishi, Subaru, Nissan ja Toyota [68]. CHAdeMo maksimaalne laadimisvõimsus on 62.5 kW [70]. See on üks kõige levinum globaalne kiirlaadimisvõrgustik. Maailmas on umbes 49100 laadimispunkti, nendest 24780 on Euroopas [69]. (vt. Joonis 11.3)

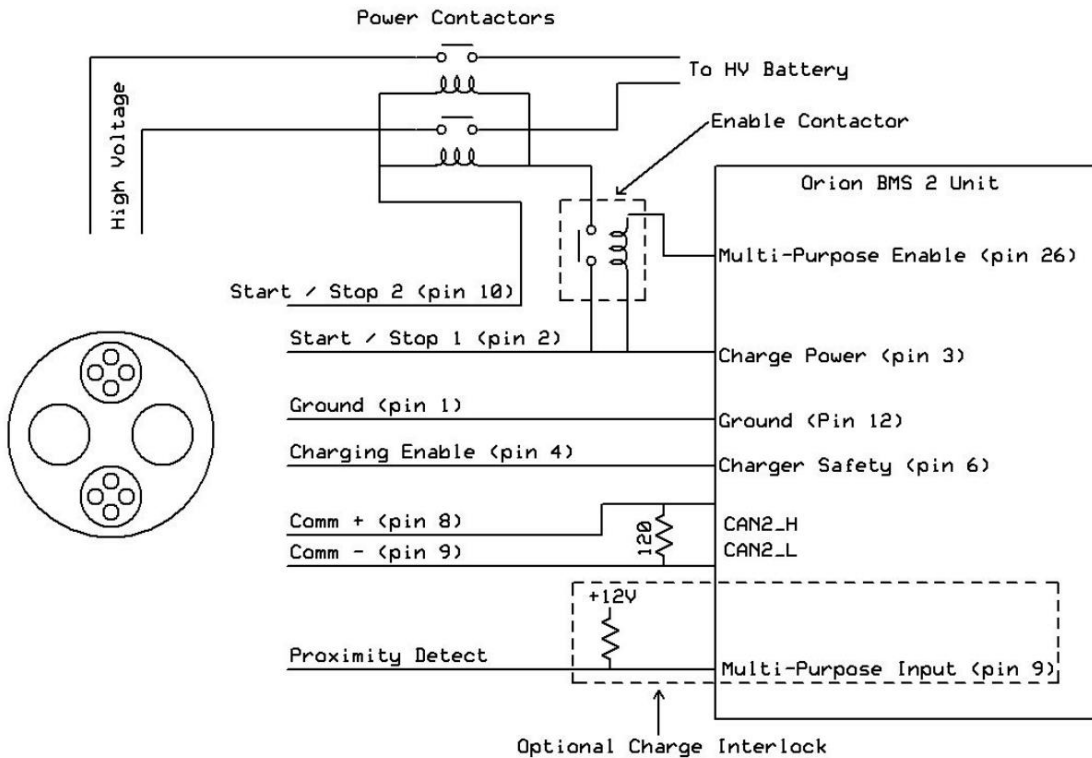
CHAdeMO on saadaval Eestis Enefit Volt, Circel-K ja Eleport laadimisvõrgustikes. Selle laialdase leviku pärast oli kiirlaadimise võimekuse saavutamine Elektri autoprojektile oluline eesmärk. Tänu sellele on võimalik sõita üle Eesti ja ka Euroopa, tehes ainult lühikesi peatusi.



Joonis 11.3 CHAdeMO laadimispunktide arv Euroopas [69].

### 11.1.1 Orion 2 CHAdeMO laadimine

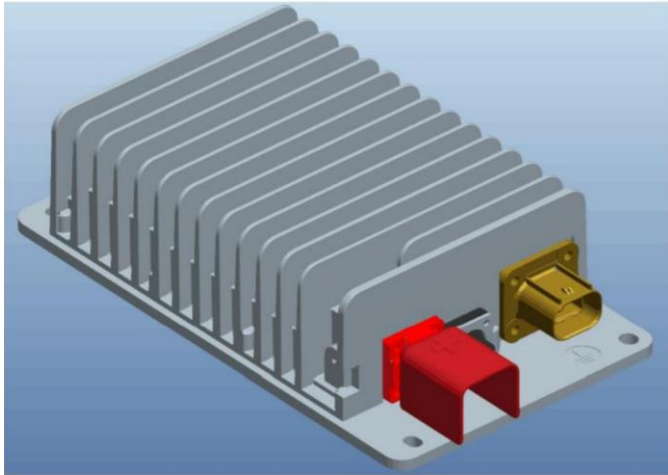
Orioni 2 Chademo integratsiooni juhendis on selgitatud, kuidas peab ühendama CHAdeMO laadimispistiku akuga [70]. Selleks on vaja eraldi kontaktoreid aku ja välise laadimispistiku vahel ning eraldi CAN-siini mille kaudu toimub info vahetus BMSiga. (vt. Joonis 11.4)



Joonis 11.4 Orion 2 CHAdeMO ühenduste skeem [70].

## 11.2 Alalispingemuundur

Alalispingemuundurit ehk DC/DC muundurit on vaja, et kõrgepingeakust tulev pinget muuta 12 V süsteemidele kasutatavaks. Pingemuundur ühtlasi laeb sõiduki 12 V akut. Muunduriks valiti Elcon DCDC206-454, mis on ühe tarnija andmetel kõige levinum pingemuundur järelturul [72]. See sobib hästi projekteeritud aku pingevahemikus kasutamiseks ja selle saadavus oli hea. (vt. Joonis 11.5)

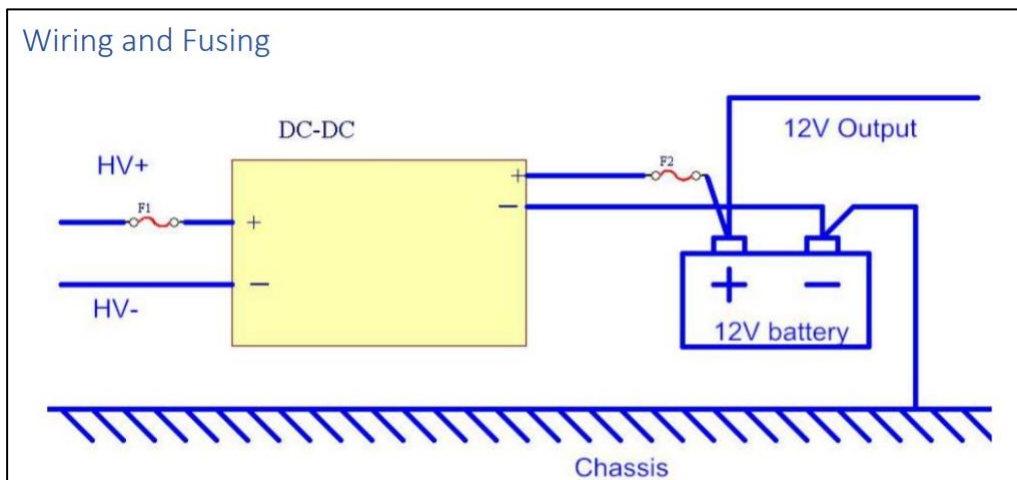


Joonis 11.5 Alalispingemuundur DCDC206-454 [71].

Tehnilised andmed [71]:

- Sisendpinge 206-454 V
- Väljundpinge 14 V
- Väljund vool 72 A (85 A maksimum)
- Soovituslikud kaitsmed kõrgepinge poolel 40-50 A ja 12 V väljundis 100A

DC/DC muundur ühendatakse vastavalt Joonisel 11.6 näidatud skeemile.



Joonis 11.6 DC/DC muunduri ühenduskeem [71].

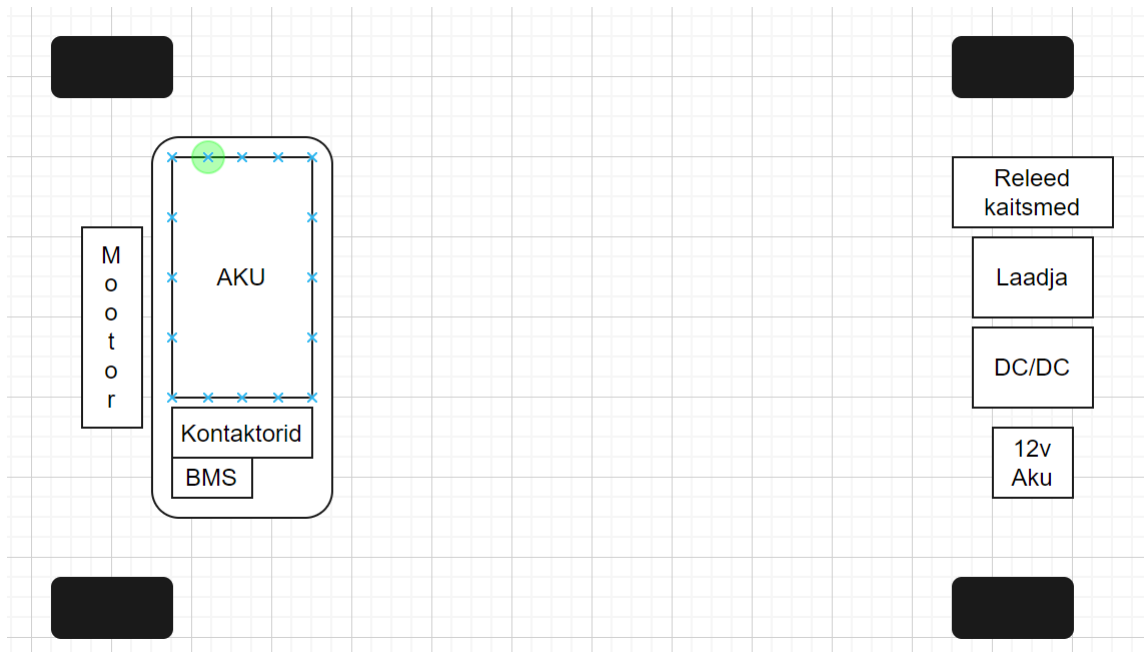
## 12. ELEKTRISKEEM

Elektriskeemi tegemisel oli eesmärkideks:

- Kasutada võimalikult vähe pistikuid – elektrisõidukite pistikud on kallid ning suured, mis teeb nende paigutamise keeruliseks.
- Lihtsasti arusaadav – kui keegi peaks tulevikus soovima midagi muuta või lisada, siis see on teostatav. Probleemide tekkimisel lihtsustab tõrkeotsingut.

### 12.1 Üldplaan ja paigutus

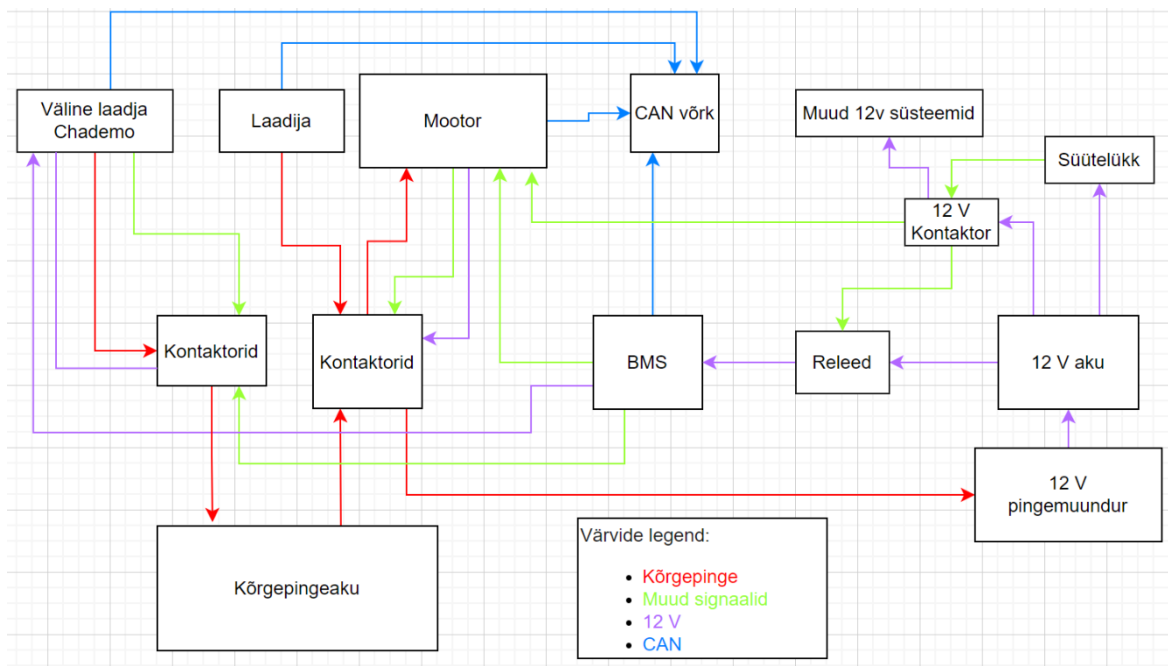
Joonisel 12.1 on näha lihtsustatud skeem, kuidas autos elektriskeemi komponendi üldiselt paiknevad.



Joonis 12.1 Kõrgepingesüsteemi üldplaan

### 12.2 Elektrisüsteemi skeem ja töökirjeldus

Fiero elektrisüsteemis on peale kõrgepinge akule ka 12 V aku. Auto originaalsuse säilitamiseks jäeti autol alles võti ja süütelukk, läbi selle lülitatakse sisse 12 V kontaktor. 12 V süsteemi ja skeemi autor selle tööga ei kavandanud, kuna see ülesanne jäi teisele meeskonnale.



Joonis 12.2 Kõrgepinge süsteemi skeem.

Joonisel 12.2 nähtava kõrgepinge süsteemi töö on järgnev:

Peale 12 V toite saamist ärkab üles BMS. Kui kõrgepingeaku olek on lubatud parameetrite piires aktiveerib BMS Openinverteri. Kui inverter on saanud signaali käivituda, teostab see eel-laadimise, ja selle järgselt ühendatakse kõrgepinge kontaktorid. Peale kontaktorite sulgumist on kõrgepinge liinil mootor, DC/DC muundur ja ka A/C laadija. DC/DC muundur on oluline selleks, et see toidab 12 V süsteeme ja laeb 12 V akut. BMS suhtleb laadija, mootori ning ka kiirlaadimisega üle CAN-siini. Süüde peab sees olema, kui kasutaja soovib kodus autot laadida. BMS nõuab et laadimise katkestamiseks oleks alati kaks valikut [48]. A/C laadija ees on vahelduvvoolu releed (lisaks vt. Joonis 11.2), nendel puudub sulgumiseks toide ilma süüteta. Süüte välja keeramisel katkeb kõrgepinge kuna BMSi toide katkeb, mis omakorda katkestab signaali inverteriga ning selle tulemusel kontaktorid ühendatakse lahti. Muude vigade või probleemide tekkimisel saab BMS alati kõrgepinge kontaktorid välja lülitada läbi inverteeri. Kiirlaadiga saab laadida olenemata süüte asendist. CHAdeMO süsteem on täiesti eraldiseisev. Laadimispistik annab ise oma 12V toite, mis äratav üles BMSi. CHAdeMO pistiku ühendamisel toimub laadimine vastavalt CHAdeMO protokollile, mis on täpsemalt kirjeldatud peatükis 11.1.1.

## KOKKUVÕTE

Magistritöö tulemusena valiti Pontiac Fierole elektriajam ning projekteeriti kõrgepingeaku lahendus. Auto elektrifitseerimisel kasutati lahendusi teistest sõidukitest, mis aitas säästa kulusid ning lisaks on sellel väike panus jätkusuutliku tuleviku nimel läbi jäätmete taaskasutamise. Uuriti akuhaldussüsteeme ja võimalusi, kuidas juhtida autole paigaldatud Tesla Model S elektriajamat. Uuriti kiirlaadimislahendusi ja tehti kõik vajalik selle võimekuse saavutamiseks. Valiti välja akuhaldussüsteem ning selle juurde kuuluvad kontaktorid, kõrgepinge pistikud ning kaablid. Akukasti projekteerimise käigus tehti valmis 3D mudel aku moodulite paigutusest akukastis ning lisaks projekteeriti kõrgepinge harukarp, millest valmis mudel ja joonised. Kõrgepingesüsteemist tehti elektriskeem ning lisati täpsustav seletus. Töö käigus ehitati sõidukisse akukast, kuhu paigaldati 36-kWh aku koos väljavalitud akuhaldussüsteemiga, mis võimaldab kiirlaadida sõidukit üle maailma kasutades CHAdeMO standardit. Tavatingimustes laadimiseks varustati auto 6.6 kWh A/C laadijaga ning DC/DC pingemuunduriga, mis toidab auto 12 V süsteeme. Valminud akupakki lahendus paigaldati füüsiliselt autosse ning teostati esimesed akuhaldussüsteemi testpingestamised, mis olid edukad. Samuti oli edukas Tesla Model S mootori tööle saamine.

Töö käigus said rahuldatud kõik ette seatud eesmärgid:

- Akupaaki lahendus koos akuhaldus süsteemiga;
- Aku laadimise ja kiirlaadimise võimekus;
- Elektrimootori juhtimine;
- Kõrgepinge skeem.

Seatud eesmärgid said täidetud jäi autor tulemusega rahule. Töökäigus toodi välja, kuidas selle auto kõrgepinge süsteemi oleks võimalik teha veel ohutumaks ja töökindlamaks, aga mille uurimiseks ei piisanud aega või ei suudetud leida head lahendust. Neid ettepanekuid võib kasutada järgnevate projektide või uurimistööde tegemiseks.

## SUMMARY

As a result of the master's thesis, an electric drive unit was selected for the Pontiac Fiero and a high-voltage battery solution was designed. The electrification of the car used solutions from other vehicles, which helped to save costs and additionally made a small contribution for a sustainable future through recycling. Battery management systems and control solutions for the car's Tesla Model S electric drive unit were researched. Fast charging solutions were studied and everything necessary was done to achieve that capability. The battery management system and its associated contactors, high voltage connectors and cables were selected. During the design of the battery box, a 3D model of the arrangement of the battery modules in the battery box was made. In addition, a high-voltage junction box was designed for which the model and drawings were prepared. An electrical diagram was made of the high voltage system and an explanation was added. During the work, a battery enclosure was designed and built for the vehicle, where a 36-kWh battery with the selected battery management system was installed, which allows to quickly charge the vehicle worldwide using the CHAdeMO standard. For normal charging, the car was fitted with a 6.6 kWh A/C charger and a DC/DC voltage converter to power the car's 12 V systems. The completed battery solution was physically installed in the car and the first battery management system operation checks were performed, which were successful. Control over the Tesla Model S drive unit was also achieved successfully.

In the course of the work, all the set goals were met:

- Battery solution with battery management system;
- Battery charging with fast charging capability;
- Control over the electric drive unit was achieved;
- High voltage circuit diagram was created.

The author was satisfied with the result, as the set goals were met. In the course of the work, it was pointed out how the high-voltage system of this car could be made even safer and more reliable, but for which there was not enough time to reach a good solution. These proposals can be used for subsequent projects or research.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] M. Keegan, "The History of the Pontiac Fiero," *Auto Trends Magazine*, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://autotrends.org/2019/07/10/the-history-of-the-pontiac-fiero/> (Kasutatud 13.05.2022).
- [2] S. Dyson, "This Is The Story Behind The Pontiac Fiero Catching Fire," *HotCars*, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.hotcars.com/this-is-the-story-behind-the-pontiac-fiero-catching-fire/> (Kasutatud 13.05.2022).
- [3] A. Sergeev, "Worst Sports Cars: Pontiac Fiero," *Motor1*, 2016. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.motor1.com/news/132346/worst-sports-cars-pontiac-fiero/> [Online]. Loetud aadressil: <https://www.hotcars.com/this-is-the-story-behind-the-pontiac-fiero-catching-fire/> (Kasutatud 13.05.2022).
- [4] M. Kane, "This Tesla Model S P85 Just Surpassed 1,500,000 Kilometers," *InsideEVs*, 2022. [Online]. Loetud aadressil: <https://insideevs.com/news/559261/tesla-models-p85-1500000-kilometers/> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [5] "Tesla Model S vordere Antriebseinheit Motor 1035000-00-f," *eBay.de* [Online]. Loetud aadressil: <https://www.ebay.de/itm/125125948050> (Kasutatud: 14.05.2022)
- [6] "HEC-80-55 kW AC motor 144 VDC water cooled," *europe.eu* [Online]. Loetud aadressil: <https://europe.eu/product/hec-80-55-ac-motor-144vdc/> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [7] "Tesla Model S Hinterrad Antrieb Elektro Motor Antriebseinheit 382 HP 1025276-00-q," *eBay.de* [Online]. Loetud aadressil: <https://www.ebay.de/itm/124947482252> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [8] "NetGain Hyper 9 Motor & SME AC-X1 Controller Kit," *zero-ev.co.uk* [Online]. Loetud aadressil: <https://zero-ev.co.uk/product/netgain-hyper-9-motor-sme-ac-x1-controller-kit/?v=a57b8491d1d8> (Kasutatud:14.05.2022).
- [9] "Hyper 9 or 9D 130V 88kW Motor," *evshop.eu* [Online]. Loetud aadressil: [https://evshop.eu/en/electric-motors/367-8137-hyper-9-hv-or-9dhv-180v-88kw.html#/57-type\\_single\\_or\\_dual\\_shaft-single\\_shaft\\_motor\\_1125\\_keyed\\_drive\\_end\\_shaft\\_no\\_encoder\\_end\\_shaft](https://evshop.eu/en/electric-motors/367-8137-hyper-9-hv-or-9dhv-180v-88kw.html#/57-type_single_or_dual_shaft-single_shaft_motor_1125_keyed_drive_end_shaft_no_encoder_end_shaft) (Kasutatud: 14.05.2022).



- [10] J. Ehrlich, „Test Drive Of A Petrol Car,” *Jake’s Tesla World*, 2015. [Online].  
Loetud aadressil: <https://www.teslamagazine.org/2015/05/test-drive-of-petrol-car.html> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [11] „Car Maintenance,” *www.tesla.com* [Online]. Loetud aadressil:  
<https://www.tesla.com/support/car-maintenance> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [12] „Fluids.” [Online]. Loetud aadressil: <https://satheesh.net/tesla/s/guid-34cf7b53-7a0e-4bf6-a9a7-05c05b34fab.html> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [13] „Fluid Capacities.” [Online]. Loetud aadressil:  
<https://satheesh.net/tesla/s/guid-a4d1b83a-926f-43ed-bc0f-a29553d98585.html> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [14] „Tesla CAN Bus - Tinkla: Tinkering with Tesla,” *Tinkla* [Online]. Loetud aadressil: [https://tinkla.us/index.php/Tesla\\_CAN\\_Bus](https://tinkla.us/index.php/Tesla_CAN_Bus) (Kasutatud: 14.05.2022).
- [15] J. Hughes, „Tesla Model S CAN Bus Deciphering,” 2016 [Online]. Loetud aadressil:  
<https://skie.net/uploads/TeslaCAN/Tesla%20Model%20S%20CAN%20Deciphering%20-%20v0.1%20-%20by%20wk057.pdf> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [16] „057 Technology's Hardware Controller,” *057 Technology* [Online]. Loetud aadressil: [Loetud aadressil: https://057tech.com/057controller](https://057tech.com/057controller) (Kasutatud: 14.05.2022).
- [17] „EV Controls T-2C | EV Controls,” *EV-controls*, 2020. <https://www.ev-controls.com/product/ev-controls-t2c/> [Online]. Loetud aadressil:  
<https://www.ev-controls.com/product/ev-controls-t2c/> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [18] J. Hübner, „Home - openinverter.org - Open Source AC motor inverter,” *Openinverter*, 2019. [Online]. Loetud aadressil: <https://openinverter.org/> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [19] „Tesla SDU drop-in logic board,” *openinverter.org*. [Online]. Loetud aadressil:  
[https://openinverter.org/shop/index.php?route=product/product&product\\_id=62](https://openinverter.org/shop/index.php?route=product/product&product_id=62) (Kasutatud: 14.05.2022).
- [20] „Tesla Model S/X Small Front Drive Unit ('SDU') - openinverter.org wiki,” *Openinverter*, 2022. [Online]. Loetud aadressil:  
[https://openinverter.org/wiki/Tesla\\_Model\\_S/X\\_Small\\_Front\\_Drive\\_Unit\\_\(%22SDU%22\)](https://openinverter.org/wiki/Tesla_Model_S/X_Small_Front_Drive_Unit_(%22SDU%22)) (Kasutatud: 14.05.2022).
- [21] D. Maguire, „The Tesla Project : Small DU PCB Installation,” *Youtube*, Jan. 13, 2018. [Online Video]. Vaadatud aadressil:

- <https://www.youtube.com/watch?v=VVSZmP-fRw> (Kasutatud 14.05.2022).  
(Kasutatud: 14.05.2022).
- [22] „Tesla Setup FAQ – openinverter.org wiki,” *Openinverter*, [Online]. Loetud aadressil: [https://openinverter.org/wiki/Tesla\\_Setup\\_FAQ](https://openinverter.org/wiki/Tesla_Setup_FAQ) (Kasutatud: 14.05.2022).
- [23] „Strategic partnership: Daimler acquires stake in Tesla,” *tesla.com*, 2010 [Online]. Loetud aadressil: <https://www.tesla.com/blog/strategic-partnership-daimler-acquires-stake-tesla> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [24] T. Harrison, „Forgotten electric cars: the Mercedes B-Class Electric Drive,” *Top Gear*, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.topgear.com/car-news/electric/forgotten-electric-cars-mercedes-b-class-electric-drive> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [25] Mercedes-Benz B-Class Electric Drive Under The Skin – Photos [Online]. Loetud aadressil: <https://insideevs.com/news/323452/mercedes-benz-b-class-electric-drive-under-the-skin-photos/> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [26] „Small Rear Drive Unit Package | Tesla Drive Units | Products | 057 Technology,” *057 Technology* [Online]. Loetud aadressil: <https://057tech.com/products/driveunits/small/rear> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [27] N. Maluf, „Qnovo | A PEEK INSIDE THE BATTERY OF A TESLA MODEL S,” *www.qnovo.com*, 2014. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.qnovo.com/blogs/peek-inside-the-battery-of-a-tesla-model-s> (Kasutatud: 14.05.2022).
- [28] „2015 Mercedes B-Class Electric Drive - Idaho National Laboratory.” [Online]. Loetud aadressil: <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/fact2015mercedesbclass.pdf>. (Kasutatud: 14.05.2022).
- [29] „EPA’s Certification Summary Information Report,” 2016. [Online]. Loetud aadressil: [https://dis.epa.gov/otaqpub/display\\_file.jsp?docid=37939&flag=1](https://dis.epa.gov/otaqpub/display_file.jsp?docid=37939&flag=1) (Kasutatud: 14.05.2022).
- [30] G. Bower, „Tesla Model 3 battery cooling much-improved ... track mode?,” *InsideEVs*, 2018. [Online]. Loetud aadressil: <https://insideevs.com/news/338711/tesla-model-3-battery-cooling-much-improved-track-mode/>. (Kasutatud: 14.05.2022).
- [31] „Tesla 24V 3kWh Battery Lithium Ion Module 18650 cells,” *Zero EV*. [Online]. Loetud aadressil: <https://zero-ev.co.uk/product/tesla-24v-3kwh->

- battery-lithium-ion-module-18650-cells/?v=04c19fa1e772. (Kasutatud: 14.05.2022).
- [32] „Battery Management System,” *EVEXPERT*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.evexpert.eu/eshop1/knowledge-center/bms1>. (Kasutatud: 14.05.2022).
- [33] „Why cell balancing is necessary in lithium battery packs?,” *Polinovel*, 2022. [Online]. Loetud aadressil: <https://polinovel.com/why-cell-balancing-is-necessary-in-lithium-battery-packs/>. (Kasutatud: 14.05.2022).
- [34] „Orion BMS 2 | Orion Li-Ion Battery Management System,” *Ewert Energy Systems*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.orionbms.com/products/orion-bms-standard/>. (Kasutatud: 15.05.2022).
- [35] „Orion 2 BMS Operation Manual.” [Online]. Loetud aadressil: (Kasutatud: 15.05.2022).
- [36] „G1 Battery Management System User Manual 2.9.” [Online]. Loetud aadressil: <https://emusbms.com/wp-content/uploads/2022/02/EMUS-G1-User-Manual-v2.9-1.pdf>. (Kasutatud: 15.05.2022).
- [37] „SimpBMS (Battery Management System),” *Second Life EV Batteries Ltd*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.secondlife-evbatteries.com/products/simp-bms>. (Kasutatud: 15.05.2022).
- [38] Sawruk, J., „Pontiac's New 2.5 Litre 4 Cylinder Engine,” *SAE Technical Paper 770819*, 1977, <https://doi.org/10.4271/770819>.
- [39] M. Garside, „Cost gap between aluminum and carbon fiber 2030,” *Statista*, 2012. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.statista.com/statistics/619080/cost-gab-carbon-fiber-aluminum/>. (Kasutatud: 15.05.2022).
- [40] „Developments in fire standards for Emobility,” *Pinfa*, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.pinfa.eu/mediaroom/developments-in-fire-standards-for-emobility/>. (Kasutatud: 15.05.2022).
- [41] *UL94: Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*. USA: Underwriters Laboratories, 2013
- [42] „Makrolon GP Solid polycarbonate sheet.” [Online]. Loetud aadressil: <http://proplastik.ee/wp-content/uploads/2015/07/Makrolon-GP.pdf> (Kasutatud: 15.05.2022).
- [43] „ELASTOSIL N9111 BLACK.” [Online]. Loetud aadressil: <https://www.wacker.com/h/en-us/medias/ELASTOSIL-N-2034-en-2021.09.08.pdf> (Kasutatud: 15.05.2022).

- [44] F. S. Hwang et al., „MODELLING OF HEAT GENERATION IN AN 18650 LITHIUM-ION BATTERY CELL UNDER VARYING DISCHARGE RATES,“ *Proceeding of 5th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC)*, pp. 333–341, 2020, doi: 10.1615/tfec2020.fue.032096.
- [45] „Pressure Compensating Element.“ [Online]. Loetud aadressil: [https://www.elfadistrelec.ee/Web/Downloads/\\_t/ds/RND%20455-01112\\_eng\\_tds.pdf](https://www.elfadistrelec.ee/Web/Downloads/_t/ds/RND%20455-01112_eng_tds.pdf) (15.05.2022).
- [46] „Orion BMS Wiring Diagram Generator,“ *Ewert Energy Systems*. [Online]. Loetud aadressil: [https://www.orionbms.com/tools/wiring.php?cell\\_count=84&fuse\\_position%5B%5D=36&busbar\\_position%5B%5D=71](https://www.orionbms.com/tools/wiring.php?cell_count=84&fuse_position%5B%5D=36&busbar_position%5B%5D=71) (Kasutatud: 15.05.2022).
- [47] W. Sas, „Charles' Law Calculator,“ *Omni Calculator*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.omnicalculator.com/physics/charles-law> (Kasutatud: 15.05.2022).
- [48] „Wiring & Installation Manual,“ *Ewert Energy Systems*. [Online]. Loetud aadressil: [https://www.orionbms.com/manuals/pdf/orionbms2\\_wiring\\_manual.pdf](https://www.orionbms.com/manuals/pdf/orionbms2_wiring_manual.pdf). (Kasutatud: 15.05.2022).
- [49] „Driving High-Voltage Contactors in EV and HEVs.“ *Texas Instruments* [Online]. Loetud aadressil: <https://www.ti.com/lit/pdf/slvaf35> (Kasutatud: 15.05.2022)
- [50] „Automotive Contactors for High-Voltage Requirements.“ [Online]. Loetud aadressil: <https://www.te.com/usa-en/products/relays-contactors-switches/contactors/automotive-contactors.html?tab=pgp-story> (Kasutatud: 15.05.2022).
- [51] B. Munari and A. Schneer, „How to Design a Precharge Circuit for Hybrid and Electric Vehicle Applications“, Sensata, 2020. [Online] Loetud aadressil: <https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-how-to-design-precharge-circuits-evs-whitepaper.pdf>. (Kasutatud: 15.05.2022).
- [52] „DEVR40 series HVDC contactor 400A / 900VDC.“ [Online]. Loetud aadressil: <https://zero-ev.co.uk/DEVR40-Durakool-Electric-Vehicle-HVDC-400AMP-Contactor.pdf?v=a57b8491d1d8> (Kasutatud: 15.05.2022).
- [53] R. Jackson, „Cables,“ *E-Mobility Engineering*, 2021. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.emobility-engineering.com/high-voltage-cables/> (Kasutatud: 16.05.2022).
- [54] „DEVR05 series HVDC contactor 55A / 900VDC.“ [Online]. Loetud aadressil: [https://www.durakoolrelays.com/media/yjkkmmrh/devr05-durakool-hvdc-contactor-55a\\_900vdc-datasheet.pdf](https://www.durakoolrelays.com/media/yjkkmmrh/devr05-durakool-hvdc-contactor-55a_900vdc-datasheet.pdf) (Kasutatud: 18.05.2022).

- [55] „HS100 30R F Precharge Resistor.“ [Online]. Loetud addressil:  
<https://zero-ev.co.uk/product/hs100-30r-f-precharge-resistor/?v=a57b8491d1d8> (Kasutatud: 18.05.2022).
- [56] „9-2141220-1,“ *TE Connectivity*. [Online]. Loetud addressil:  
<https://www.te.com/usa-en/product-9-2141220-1.html> (Kasutatud: 18.05.2022).
- [57] „UPC Series,“ Amphenol. [Online]. Loetud addressil:  
<https://www.amphenol-industrial.com/images/catalogs/UPC%20Brochure.pdf> (Kasutatud: 18.05.2022).
- [58] „Amphe-Power Connectors with RADSOK Technology.“ [Online]. Loetud addressil: (Kasutatud: 18.05.2022).
- [59] „Venting,“ *Gore*. [Online]. Loetud addressil:  
<https://www.gore.com/products/categories/venting> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [60] „A Guide to Understanding Battery Specifications,“ 2008. [Online]. Loetud addressil: [http://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf) (Kasutatud: 19.05.2022).
- [61] „What Is HVIL?,“ *Aptiv* [Online]. Loetud addressil:  
<https://www.aprive.com/en/insights/article/what-is-hvil> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [62] „Measuring Shield Current of High-Voltage Cables in Electric Vehicles.“ [Online]. Loetud addressil: <https://www.csm.de/us/downloads/send/82-applicationexamples/635-measuring-shield-current-of-high-voltage-cables-in-electric-vehicles> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [63] „EV High-Voltage Cable.“ [Online]. Loetud addressil:  
<https://www.omgevcable.com/ev-cables/ev-high-voltage-cables.html> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [64] M. Zhang, „EMC Design Techniques for Electric Vehicle Powertrain Modules,“ *In Compliance Magazine*, 2021. [Online]. Loetud addressil:  
<https://incompliancemag.com/article/emc-design-techniques-for-electric-vehicle-powertrain-modules/> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [65] „Shielded HV Cable LayerOuter Diameters.“ [Online]. Loetud addressil:  
<https://zero-ev.co.uk/HV-Cable-Diameters.pdf?v=a57b8491d1d8> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [66] „Brusa Products – Renugen.“ [Online]. Loetud addressil:  
<https://www.renugen.co.uk/brands/Brusa.html> (Kasutatud: 19.05.2022).

- [67] „HK-J Series 6.6KW IP 67 Sealed UHF CAN Bus Charger.“ [Online]. Loetud aadressil: <https://zero-ev.co.uk/6.6KwChargerElcon.pdf> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [68] „What to Expect in New Connectors.“ [Online]. Loetud aadressil: [http://www.fveaa.org/fb/Level3Charging\\_279.pdf](http://www.fveaa.org/fb/Level3Charging_279.pdf) (Kasutatud: 19.05.2022).
- [69] „CHAdEMO continues its network expansion getting close to 50k charge points.“ [Online]. Loetud aadressil: [https://www.chademo.com/globalcounts2022\\_h1](https://www.chademo.com/globalcounts2022_h1) (Kasutatud: 19.05.2022).
- [70] „CHAdEMO Integration With Orion BMS 2.“ [Online]. Loetud aadressil: [https://www.orionbms.com/manuals/pdf/chademo\\_integration.pdf](https://www.orionbms.com/manuals/pdf/chademo_integration.pdf) (Kasutatud: 19.05.2022).
- [71] „1.0 KW DCDC.“ [Online]. Loetud aadressil: <https://zero-ev.co.uk/DCDC.pdf?v=a57b8491d1d8> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [72] „DC/DC TCC 1000W 220-450V to 12V.“ [Online]. Loetud aadressil: <https://evshop.eu/en/dcdc-converters/354-dcdc-tcc-1500w-220-450v-to-12v.html> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [73] Y. Moreno, „TESLA Battery,“ *GrabCAD*, 2015. [Online]. Loetud aadressil: <https://grabcad.com/library/tesla-battery-1> (Kasutatud: 09.10.2021).
- [74] „Nanovia PC V0 : Non-flammable UL94 VO,“ *nanovia.tech*. [Online]. Loetud aadressil: <https://nanovia.tech/en/ref/pc-v0-non-flammable-ul94-vo/> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [75] „RND 455-00426 - Metal Enclosure 160x99.5x81mm Aluminium Alloy IP65, RND Components,“ *Elfadistrec.ee*, 2022. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.elfadistrec.ee/et/metal-enclosure-160x99-5x81mm-aluminium-alloy-ip65-rnd-components-rnd-455-00426/p/30064647> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [76] „EMSKV 25 - Cable entries - WISKA,“ *www.wiska.com*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.wiska.com/en/30/pde/10065003/emskv-25.html> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [77] „Integration with Other Devices,“ *www.orionbms.com*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.orionbms.com/features/integration-with-other-devices/> (Kasutatud: 19.05.2022).
- [78] „Interfacing with Elcon & TC Chargers,“ *www.orionbms.com*. [Online]. Loetud aadressil: <https://www.orionbms.com/charger-integration/interfacing-elcon/> (Kasutatud: 19.05.2022).

**LISAD**

Lisa 1. Joonis - Harukarbi koost

Lisa 2. Joonis - RND kaitsekarp

Lisa 3. Joonis - Isolatsioon