

# Formula Student -ajoneuvon hybridivoimansiirron akunhal- lintajärjestelmä

Petri Lampela

OPINNÄYTETYÖ  
Kesäkuu 2022

Tieto- ja viestintäteknikka  
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tieto- ja viestintäteknikka  
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

Lampela Petri:  
Formula Student -ajoneuvon hybridivoimansiirron akunhallintajärjestelmä

Opinnäytetyö 59 sivua, joista liitteitä 7 sivua  
Kesäkuu 2022

---

Opinnäytetyö tehtiin Tampereen korkeakoulujen Formula Student -tiimille nimeltään Tampere Formula Student. Työn tavoitteena oli toteuttaa akunhallintajärjestelmä, joka on osa Tampere Formula Student -tiimin vuoden 2022 kilpa-auton hybridivoimansiirtojärjestelmää. Toteutettu akunhallintajärjestelmä on yhden piirilevyn sulautettu järjestelmä, jonka suunnittelu, toteutus ja testaus esitellään tässä opinnäytetyössä.

Suunnitteluosuus sisältää työn lähtökohtien ja vaatimusten esittelyn, jonka jälkeen esitellään järjestelmän piirikaaviosuunnittelu. Lisäksi suunnitteluosuudessa esitellään lyhyemmin piirilevyn sekä ohjelmiston suunnittelun pääkohdat.

Toteutusosuudessa esitellään piirilevyn valmistusprosessi, ohjelmiston luonti ja sen toiminta korkealla tasolla sekä akunhallintajärjestelmän integrointi osaksi hybridivoimansiirtojärjestelmää.

Testausosuudessa esitellään järjestelmän testaus luodun testaussuunnitelman mukaisesti ja testauksesta saadut tulokset. Hybridijärjestelmän muiden osien valmistuksen viivästymisen seurauksena akunhallintajärjestelmän testauksessa esitellään ainoastaan järjestelmän elektroniikan perustestaukset.

Lopputuloksena työssä syntyi ensimmäinen kehitysversio kyseiseen hybridivoimansiirtoon toteutetusta akunhallintajärjestelmästä. Akunhallintajärjestelmä toimii lähtökohtana tulevien versioiden kehityksessä.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
ICT engineering  
Embedded systems and electronics

Petri Lampela:  
Formula Student -vehicle's hybrid powertrain battery management system

Bachelor's thesis 59 pages, appendices 7 pages  
June 2022

---

This thesis is made for Tampere universities' Formula Student team called Tampere Formula Student. The purpose of the thesis is to implement a battery management system that is part of the Tampere Formula Student team's year 2022 vehicle's hybrid powertrain. The battery management system is a one PCB embedded system which design, implementation and testing are presented in the thesis.

The design part of the thesis declares baselines and restrictions for the system followed by explaining the schematics design. The design part also includes some highlights of the PCB and software design.

The implementation part of the thesis explains the manufacturing process of the PCB and a high-level implementation of the software. Integration, of the battery management system to the hybrid powertrain, is also shown in the implementation part.

The battery management system is tested according to test plan. Test procedures and results are presented in test part of the thesis. Due to delays in manufacturing the hybrid system, only basic tests for electronics of the battery management system are presented in the test procedures.

The results of the thesis represent the first evaluation version of the concerned hybrid system's battery management system. The battery management system works as a starting point for new development versions.

---

Key words: battery management programming electronics embedded systems  
formula student

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄT .....	8
2.1	Akunhallintajärjestelmien kehitys .....	9
2.2	Akun mitattavat parametrit .....	9
2.3	Akunhallintajärjestelmän muut toiminnot.....	10
2.4	Akunhallintajärjestelmien tarve nyt ja tulevaisuudessa .....	10
3	SUUNNITTELU.....	12
3.1	Lähtökohdat ja vaatimukset .....	14
3.2	Lohkokaavio .....	16
3.3	Kytkentäkaavio.....	18
3.4	Piirilevy.....	27
3.5	Ohjelmisto .....	33
4	TOTEUTUS .....	35
4.1	Piirilevy.....	35
4.2	Ohjelmisto .....	39
4.3	Integrointi hybridijärjestelmään .....	45
5	TESTAUS .....	47
5.1	Testaustoimet.....	48
5.2	Testitulokset.....	49
6	POHDINTA .....	50
	LÄHTEET.....	51
	LIITTEET .....	53
	Liite 1. Piirikaavio .....	53
	Liite 2. Kuparikerrokset .....	56

**ERITYISSANASTO tai LYHENTEET**

BMS	Akunhallintajärjestelmä (Battery management system)
Ah	Ampeeritunti
FS	Formula Student
CV	Combustion vehicle
N-mos	N-kanavainen MOS-transistori
I/O	Input output -kanava
CAN	Controller area network
I2C	Inter-Integrated circuit
A/D	Analogi-digitaali
DMA	Direct Memory Access
HAL	Hardware abstraction layer
PCB	Printed circuit board

## 1 JOHDANTO

Formula Student -sarjassa otettiin vuodelle 2022 käyttöön mahdollisuus valmistaa hybridijärjestelmä polttomoottorin tueksi parantamaan kilpa-ajoneuvon suorituskykyä, sekä kehittämään insinööriopiskelijoiden tietotaitoa nykypäivän sähköisistä kehityskohteista. Kyseisen mahdollisuuden ottivat käyttöön seuraavat Euroopassa järjestettävät kilpailut: FSA (Itävalta), FSEast (Unkari), FSN (Hollanti) sekä FSCzech (Tšekki).

Formula Studentilla on jo yli 40-vuotinen historia. Vuonna 1981 Teksasin yliopisto aloitti Formula Student -ohjelman Yhdysvalloissa. Ensimmäisessä järjestetyssä kilpailussa oli kokonaisuudessaan neljä autoa ja noin 100 ihmistä. Kuusitoista vuotta myöhemmin autojen määrä nousi 76:een ja osallistujien määrä yli 2000:een. (Case 1996.)

Formula Student -kilpailussa korkeakouluopiskelijoista muodostuvat tiimit haastavat toisensa suunnittelemallaan ja rakentamallaan yksipaikkaisella formulatyylisellä kilpa-ajoneuvolla. Kilpailua ei kuitenkaan voita yksinomaan nopein auto, mutta se tiimi, jolla on paras kokonaispaketti. (Concept n.d.) Euroopan kilpailuissa käytettävien Formula Student Germany sääntöjen (Formula Student Rules 2022, 11) mukaisesti kilpailussa pisteitä on mahdollista saada seuraavista suorituksista (pois lukien autonomiset autot):

- Staattiset suoritukset
  - Liiketoimintasuunnitelma (Business Plan Presentation), 75 pistettä
  - Kustannuslaskelma (Cost and Manufacturing), 100 pistettä
  - Suunnittelu (Engineering Design), 150 pistettä
- Dynaamiset suoritukset
  - Kitkaympyrä (Skid Pad), 50 pistettä
  - Kiihdytys (Acceleration), 75 pistettä
  - Aika-ajo (Autocross), 100 pistettä
  - Kestävyysajo (Endurance), 250 pistettä
  - Hyötysuhde (Efficiency), 75 pistettä

Formula Student -ohjelman tarkoitus on kehittää eri alojen opiskelijoiden osaamista sekä näkemystä laaja-alaisista projekteista. Myös useat eri yhtiöt tukevat Formula Student -tiimejä, joiden kautta opiskelijat voivat verkostoitua ja parantaa huomattavasti työllistymismahdollisuuksiaan.

Tampere Formula Student on aloittanut toimintansa vuonna 2007 ja ensimmäinen auto valmistui vuonna 2008. Tämän jälkeen tiimi on valmistanut joka vuosi uuden auton pois lukien vuonna 2020, jolloin maailmantilanteen seurauksena kilpailuja ei järjestetty. 2020 vuonna tehtyjen suunnitelmien pohjalta kehitettiin vuoden 2021 auto, jolla kilpailtiin kesällä 2021 Itävallassa ja Unkarissa. Kuvassa 1 ovat vuosien 2008 ja 2021 autot.

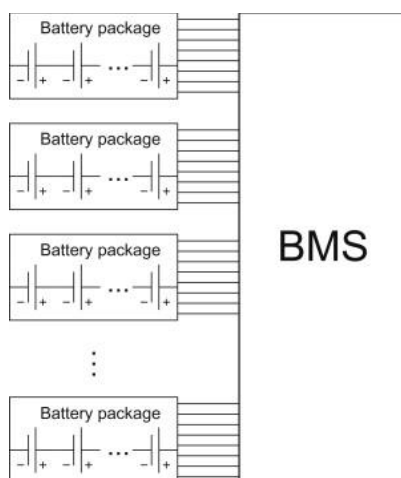


KUVA 1. Tampere Formula Student, vuosien 2008 ja 2021 autot.

## 2 AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄT

Akunhallintajärjestelmä (eng. battery management system eli BMS) nimensä mukaisesti hallitsee akun tai akkupaketin toimintaa, mutta myös valvoo ja ohjaa sitä. Sen pääasiallinen tavoite on suojata käyttäjää, käyttölaitetta sekä itse akkua mahdollisilta vikatilanteilta. Lisäksi akunhallintajärjestelmällä voidaan pidentää akun elinikää huomattavasti (Battery Management System 2009).

Yleisesti ottaen useimmat akunhallintajärjestelmät ovat yhden piirilevyn sulautettuja järjestelmiä. Niitä myydään kaupallisesti yleiseen käyttöön esimerkiksi harrastelijoille, jotka rakentavat itse kevyitä sähköajoneuvoja tai vastaavia akkukäyttöisiä laitteita. Mutta tarkempiin käyttökohteisiin, kuten esimerkiksi teollisuuden tai ajoneuvotekniikan sovellukset, suunnitellaan usein räätälöity akunhallintajärjestelmä, jotta vaaditut parametrit täyttyvät. Kuviossa on 1 yksinkertaistettu lohkokaavio akunhallintajärjestelmän toiminnasta.



KUVIO 1. Lohkokaavio (Battery Management System 2009).

Kuviosta 1 nähdään, kuinka akunhallintajärjestelmä (BMS) kytkeytyy akkukennoihin (Battery package). Kuviossa 1 piirrettyjen kytkentöjen määrä ei ole absoluuttinen, vaan niiden tarkoitus on kuvata sitä, kuinka akunhallintajärjestelmä mittaa ja ohjaa akkukennoja.

## 2.1 Akunhallintajärjestelmien kehitys

Akku on yleisnimitys kemialliselle sähköistä potentiaalia sisältävälle energiavara-  
rastolle. Aikaisemmin suuressa suosiossa olleet lyijyhappoakut ovat toiminnal-  
taan melko stabiileja, eivätkä ne välttämättä oikein toimiakseen tarvitse akunhal-  
lintajärjestelmää. Kuitenkin lyijyhappoakkujen heikkous, verrattuna nykyisiin ak-  
kuteknikoihin, on energiatiheys, jota mitataan yksiköllä wattituntia litraa kohti  
(Wh/l). Esimerkiksi verrattuna litiumioni akkuun, voi lyijyhappoakun energiatiheys  
olla jopa yli kuusi kertaa pienempi (Spot The Difference 2019).

Litium-ioni akkuteknikka on nykyään erittäin suosittu sen erinomaisen energiatih-  
eyden seurauksena, joka on mahdollistanut entistä pienempien ja kevyempien  
mobiililaitteiden kehityksen. Mutta litiumioni akut ovat huomattavasti epävakaam-  
pia verrattuna lyijyhappoakkuihin, joten ne tarvitsevat turvalliseen ja tehokkaaseen  
toimintaan akunhallintajärjestelmän. Suojaamaton litiumioni akku ei yksinään ky-  
kene rajoittamaan omaa latausta tai purkuaan, jolloin se voi vaurioitua ja aiheut-  
taa vaaratilanteen, jopa tulipalon. Näin ollen, litiumioni akkujen yleistyessä, myös  
akunhallintajärjestelmien kehitys vauhdittui.

## 2.2 Akun mitattavat parametrit

Akunhallintajärjestelmät mittaavat aktiivisesti akun sähköisiä suureita, jotta sen  
tilasta saadaan mahdollisimman hyvä käsitys. Litiumioni akun tapauksessa on  
yksittäisestä akkukennosta mitattava useita eri parametreja:

- Jännite
- Lämpötila
- Virta

Näiden parametrien pohjalta akunhallintajärjestelmä, tai jokin muu parametreja  
vastaanottava laite, voi päätellä akun kuntoa (eng. state of health SoH), latauk-  
sen tasoa (eng. state of charge SoC) sekä suojata sitä vikaantumiselta. (In-  
noBlog: Why do we need Battery Management Systems? 2020.) Lisäksi akun-

hallintajärjestelmä voi, virtaa mittaamalla, laskennallisesti arvioida akun läpi kulkenutta kokonaisenergiämäärää. Tämän parametrin avulla akun latauksen tason päättely on tarkempaa, kuin esimerkiksi pelkkää jännitemittausta käyttämällä.

### **2.3 Akunhallintajärjestelmän muut toiminnot**

Yleisesti ottaen akunhallintajärjestelmälle ei ole yhtä oikeaa toteutusta, vaan toiminnot määräytyvät akun ja muiden ulkopuolisten vaatimusten pohjalta.

Yleisiä aktiivisia ja passiivisia toimintoja ovat:

- Tiedonsiirtoprotokolla
  - Lähettää mitattuja parametreja
  - Vastaa esim. toiminnallisia käskyjä
- Kennojännitteiden tasapainotus
- Yli-/alilämpösuojaus
- Yli-/alijännitesuojaus
- Ylivirtasuojaus
- Oikosulkusuojaus

(InnoBlog: Why do we need Battery Management Systems? 2020.)

Edellä mainituilla ominaisuuksilla mahdollistetaan turvallinen, tehokas ja pitkäikäinen toiminta akulle.

### **2.4 Akunhallintajärjestelmien tarve nyt ja tulevaisuudessa**

Tulevaisuuden teknologian sähköistyessä, nousevat akkuteknologiaa koskevat vaatimukset yhä korkeammalle. Yksi suurin vaatimus on parantaa akkujen energiatiheyttä, joka on erittäin tärkeä ominaisuus etenkin ajoneuvokäytössä, jossa tila ja paino rajoittavat akun kokoa. Akkujen energiatheyden kasvaessa, kasvaa niiden teho ja teetti, mutta koko pysyy samana. Toisaalta tehon ja kennomäärän kasvaessa, nousee akunhallintajärjestelmältä vaadittava tehonkesto ja komponenttien määrä. Painon ja tilan ollessa rajallisia, luo tämä kehitys uusia haasteita akunhallintajärjestelmien suunnitteluun.

Esimerkiksi ajoneuvokäytössä tai kuluttajalaitteissa on jo huomattu, kuinka akut kuluvat eli menettävät kapasiteettiaan jopa odotettua nopeammin, mikä puolestaan aiheuttaa suuria lisäkuluja ja ympäristöhaittoja. Tämän ongelman ratkaisuun yksi tärkeä avain on hyvin toimiva akunhallintajärjestelmä, mutta myös itse akkujen suunnittelu siten, että niitä voi purkaa ja ladata mahdollisimman monta kertaa. Tämä voi tavalliselle kuluttajalle olla yllätys, sillä eihän auton ”polttoainetankin” eli akun tulisi kulua, kun sitä ”tankkaa” eli lataa.

## **2.5 Työn akunhallintajärjestelmä**

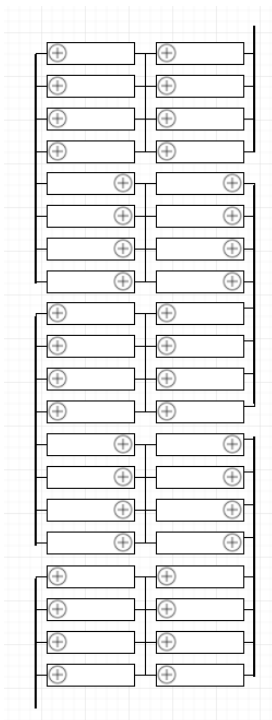
Tampereen korkeakoulujen Formula Student -tiimi eli Tampere Formula Student suunnittelee ja toteuttaa vuoden 2022 kilpa-ajoneuvoonsa sähkömoottoroidun etuvedon, polttomoottorilla toteutetun takavedon tueksi.

Opinnäytetyössä esitellään kyseisen hybridijärjestelmän akunhallintajärjestelmä. Työ sisältää akunhallintajärjestelmän suunnittelun, toteutuksen, testauksen sekä integroinnin hybridijärjestelmään. Tarve sekä vaatimukset kyseiselle akunhallintajärjestelmälle tulevat hybridijärjestelmää koskevista säännöistä, jonka ensimmäinen versio julkaistiin syyskuussa 2021 sekä Tampere Formula Student -tiimin sisäisistä tavoitteista parantaa kilpa-ajoneuvonsa suorituskykyä.

Työn päällimmäinen tavoite on toteuttaa toimiva lähtökohta akunhallintajärjestelmälle, jota kyseisen Formula Student -tiimin tulevaisuuden jäsenet voivat jatkokehittää. Lisäksi työn toteutus tai sen osat voivat toimia pohjana toisiin samankaltaisiin käyttökohteisiin.

### 3 SUUNNITTELU

Hybridijärjestelmässä on itse valmistettu litiumioniakkupaketti, jonka nimellisjännite on 37 V ja -kapasiteetti on 12 Ah. Akkupaketti koostuu neljästäkymmenestä 18650-kennosta, jotka ovat 10s4p konfiguraatiossa. Tämä tarkoittaa sitä, että akkupaketissa on neljän kennon rinnankytkentöjä kymmenen sarjassa (kuvio 2).



KUVIO 2. 10s4p kennokonfiguraatio (10s4p wiring help 2017).

Kuviosta 2 nähdään, kuinka 10s4p akkupaketti kytkeytyy sähköisesti. Akkupaketin yksittäisen kennon läpi kulkema virta on kirchhoffin virtalain mukaan tässä tapauksessa koko akkupaketin virran neljännes. Hybridijärjestelmässä käytetyt akkukennot ovat Sony VTC6 18650 -kennoja. Niiden datalehden mukaisesti (taulukko 1) suurin jatkuva purkuvirta on 30 A, jolloin koko akkupaketista voidaan purkaa 120 A virtaa.

## TAULUKKO 1. Sony VTC6 -akkukennon tiedot (Sony Energy Devices Corporation 2015, 4)

### 2. Cell Rating セル定格

Item 項目	Rating 定格	Note 備考
2.1 Rated Capacity 定格容量	3000mAh	Discharge at 0.2ItA, 2.0V cutoff after Standard Charge 0.2ItA, 2.0V 終止放電での容量規格値、充電は標準充電
2.2 Maximum Charge Voltage 最大充電電圧	4.25V	
2.3 Cut Off Voltage 放電終止下限電圧	2.0V	
2.4 Continuous Maximum Charge Current 連続最大充電電流	5.0A	Continuous 連続
	6.0A	Pulse パルス
2.5 Continuous Maximum Discharge Current 連続最大放電電流	30A	(With 80 deg temperature cut) (温度カット 80°Cあり)
	15A	(Without 80 deg temperature cut) (温度カット 80°Cなし)
2.6 Allowable Environment Temperature 使用雰囲気温度	Charge 充電	Refer to the cell temperature spec of 2.8 for cell surface temperature. セル表面温度に関しては 2.8 のセル温度規格を参照のこと。
	Discharge 放電	
2.7 Weight 質量	46.6±1.5 g	

※ Cell condition at shipment SOC (State Of Charge ) not exceed 30% of rated capacity.

セルの出荷状態は 定格容量の SOC(State Of Charge 充電状態)30%を超えない。

Hybridijärjestelmässä akkujännite pidetään 25 voltin ja 42 voltin välissä ja purkuvirta pidetään koko jännitealueella 120 A:ssa. Akkupaketin minimi- ja maksimipurkuteho voidaan laskea tasavirran tehon  $P$  kaavalla seuraavasti,

$$P = U \cdot I, \quad 1$$

jossa  $U$  on jännite ja  $I$  on virta.

Sijoitetaan akkupaketin minimi- ja maksimijännitteet sekä purkuvirta kaavaan 1.

$$P = 42 \text{ V} \cdot 120 \text{ A} = 5040 \text{ W}$$

$$P = 25 \text{ V} \cdot 120 \text{ A} = 3000 \text{ W}$$

Suuren purkutehonsa vuoksi akunhallintajärjestelmältä vaaditaan tarkkaa suunnittelua, jotta sen komponentit kestävät ylikuumentumatta.

### 3.1 Lähtökohdat ja vaatimukset

Sääntövaatimukset akunhallintajärjestelmälle tulivat FS CV Hybrid Rules 2022 v0.9 -dokumentista, jossa määritellään hybridijärjestelmältä vaadittavat ominaisuudet (Hybrid Rules 2022). Dokumentissa määritellään hybridijärjestelmää koskevat turvallisuusvaatimukset sekä sähköiset että mekaaniset rajoitteet.

Akunhallintajärjestelmää koskevat rajoitukset ovat dokumentin mukaan seuraavanlaiset:

- Akun tulee olla matalajännitteinen (alle 60 V).
- Suurin sallittu purkuteho on 5000 W
- Akkupaketilla tulee olla akunhallintajärjestelmä
  - Akunhallintajärjestelmässä tulee olla ylivirtasuoja.
- Akkupaketti saa painaa enintään 3 kg, johon akunhallintajärjestelmä sisältyy.

(Hybrid Rules 2022.)

Lisäksi Tampere Formula Student -tiimin hybridijärjestelmän sisäiset vaatimukset akunhallintajärjestelmälle ovat seuraavanlaiset:

- Akunhallintajärjestelmän tulee kestää lyhytkestoisesti 120 A:n purkuvirta.
- Akunhallintajärjestelmässä tulee olla virran sekä jännitteen mittaus.
- Akunhallintajärjestelmässä tulee olla kennojännitteiden tasapainotus
- Akunhallintajärjestelmässä tulee olla ylivirta-, ylijännite, alijännite- sekä yliämpösuoja.
  - Kennojen lämpötila ei saa ylittää 60 °C
- Akunhallintajärjestelmän tulee olla yhteydessä kyseisen ajoneuvon tietoliikenneväylään (CAN-väylä).
  - Akunhallintajärjestelmä lähettää mitattuja sekä laskelmoituja parametreja kyseiseen väylään.
    - Kennojännitteet (mitattu)
    - Akkupaketin kokonaisjännite (mitattu)
    - Kennolämpötilat (mitattu)
    - Akkupaketin sähkövirran suunta, lataus/purku (laskettu)

- Akkupaketin varaustila (laskettu, %)
  - Ylivirtatila (laskettu)
  - Ylikuumenemistila (laskettu)
  - Ylijännitetila (laskettu)
  - Alijännitetila (laskettu)
  - Tilaviesti, onko akkupaketti purkuvalmiudessa (mitattu)
- Akunhallintajärjestelmän tulee olla mahdollisimman kompakti ja kevyt.

Tarkkojen vaatimusten seurauksena Tampere Formula Student -tiimin hybridijärjestelmää suunnitteleva ryhmä tuli johtopäätökseen, että akunhallintajärjestelmä suunnitellaan ja toteutetaan itse.

Lähtökohdat akunhallintajärjestelmän suunnitteluun määräytyivät akkupaketin kennokonfiguraation mukaan. Kyseisen järjestelmän akkupaketin ollessa 10s4p konfiguraatiolla, valittiin keskeinen komponentti, eli kennomonitori-piiri, sarjassa olevien kennojen määrän mukaisesti. Kennomonitoriksi valittiin Texas Instrument BQ76930 -piiri. Kyseinen piiri on tarkoitettu akkupaketeille, joissa on 6–10 kennoa sarjassa. (Texas Instruments 2022, 3.)

Suuren vaaditun purkuvirran seurauksena lataus- ja purkutransistorien valintakriteerit olivat tiukat. Transistoreiksi valittiin NVBLS0D7N06C (N-mos), joiden ylimenovastus on riittävän pieni (0,75 m $\Omega$ ) sekä suurin sallittu virta riittävän suuri (470 A). Suurimpaan sallittuun virtaan vaikuttaa se, kuinka lämpö saadaan siirrettyä transistorista ympäröivään ilmaan. (Onsemi 2019, 1.) Koska lämpötilan siirtymistä on vaikea hahmottaa tai laskea, valittiin transistoreille mekaanisesti sopivan kokoiset jäähdytys-elementit parantamaan lämmön siirtymistä. Akunhallintajärjestelmään on mahdollista kytkeä ylimääräisiä lämpötila-antureita, joilla voidaan aktiivisesti mitata transistorien lämpötilaa käytössä ja täten rajoittaa ylikuumenemista.

Transistorien ohjatessa akkupaketin positiivista ulostuloa, tarvitsee ne toimiakseen transistoriajurin, jotta hila-lähde-jännite ylittää vaaditun tason. Transistoriajuriksi valittiin Texas Instruments BQ76200 -piiri. Kyseinen piiri valittiin, koska

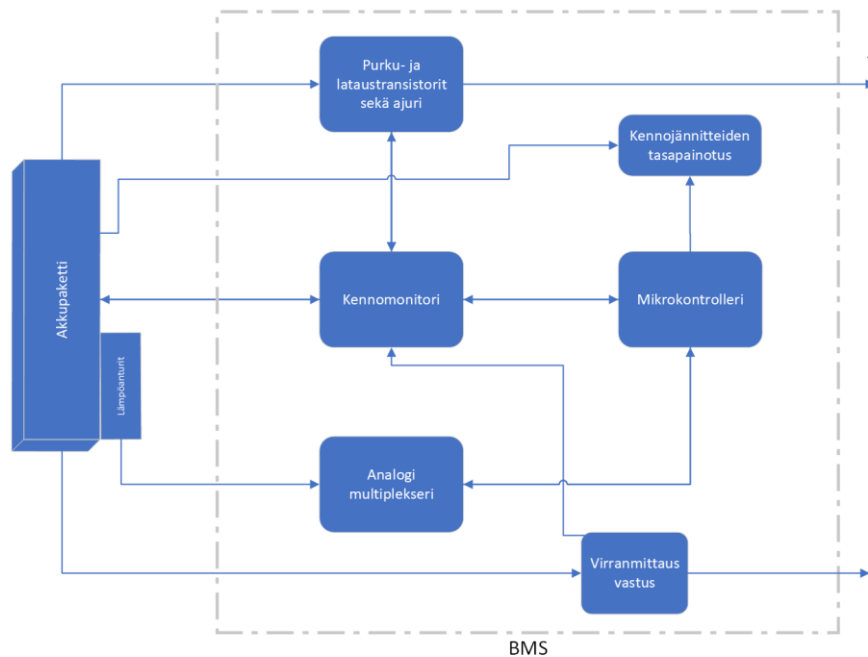
se on datalehden mukaan suoraan yhteensopiva BQ76930-kennomonitorin kanssa. (Texas Instruments 2019, 1.)

Akunhallintajärjestelmää ohjataan mikrokontrollerilla, joka kommunikoi I2C-väylän kautta kennomonitorin kanssa ja CAN-väylän kautta auton muun sähköjärjestelmän kanssa. Mikrokontrolleriksi valittiin STMicroelectronics STM32F103C8T6. Kyseisestä kontrollerista löytyy valmiiksi I2C- sekä CAN-väylä tuet (STMicroelectronics 2022, 1). Kyseisestä kontrollerista on myös Tampere Formula Student -tiimillä aiempaa kokemusta, joten sen käyttöönotto oli luontevaa.

Lämpötila-antureiksi valittiin Texas Instruments LMT85:t. Kyseinen anturi on toiminnaltaan analoginen, tarkoittaen että sen ulostulojännite muuttuu suhteessa lämpötilaan. Anturin jännite on käänteinen verrattuna lämpötilaan, kun lämpötila nousee, jännite laskee. Tyypillinen jännitefunktio kyseiselle anturille on  $-8,2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ , tarkoittaen että lämpötilan muuttuessa yhden  $^{\circ}\text{C}$ , laskee anturin ulostulon jännite  $8,2 \text{ mV}$ . (Texas Instruments 2017, 1.) Lämpötila-anturien määrän ollessa 12 kappaletta, jos transistorien lämpötiloja mitataan, ja käytössä olevassa mikrokontrollerissa on vain 10 analogisisäänmenoa, joista osa on muussa käytössä. Täten päädyttiin käyttämään analogi multiplekseriä, jonka avulla kaikkia antureita voitiin mitata yhdellä analogisisäänmenolla ja multiplekserin ohjaus vaati vain neljä digitaalista ulostuloa. Valittiin multiplekseriksi Texas Instruments CD74HC4067M, jossa on 16 kanavaa (Texas Instruments 2003, 1).

### 3.2 Lohkokaavio

Akunhallintajärjestelmän toiminnallinen suunnittelu aloitettiin tekemällä lohkokaa-  
vio, jossa esiteltynä keskeiset komponentit sekä niiden väliset toiminnalliset yhteydet. Kuviossa 3 on akunhallintajärjestelmän lohkokaa-  
vio. Lohkokaavio tehtiin helpottamaan kytkentäkaaviosuunnittelua, jotta järjestelmästä sai laajemman toiminnallisen kuvan.



KUVIO 3. Akunhallintajärjestelmän lohkokaavio

Lohkokaaviossa keskeisenä komponenttina on kennomonitori, joka toimii analogisena sekä digitaalisena rajapintana akkupaketin ja muiden akunhallintajärjestelmän komponenttien välissä.

Kennomonitori kommunikoi mikrokontrollerin kanssa I2C-väylän kautta ja sen lisäksi niiden välillä on ”ALERT” signaali, jolla kennomonitori ilmoittaa mikrokontrollerille kommunikaation tarpeesta tai vikatilasta. Virranmittausvastuksen yli jäävää jännitehäviötä mitataan myös kennomonitorilla, joka muuntaa sen laskennallisesti sähkövirraksi. Kennomonitori laskee läpi kulkevaa sähkövirtaa myös ajan funktiona, jolloin tuloksena saadaan akkupaketin läpi kulkenut kokonaisenergia ja sen suunta. Kennomonitori lähettää tämän tiedon mikrokontrollerille, jossa ohjelmallisesti lasketaan akkupaketin varaustila, sekä purkaessa että ladatessa.

Purku- ja lataustransistoreita ohjataan transistoriajuriilla, jota kennomonitori ohjaa, mutta mikrokontrolleri antaa kennomonitorille käskyt ohjata transistoriajuria. Transistoriajuri mittaa akkupaketin ulostulon jännitettä ja välittää sen mikrokontrollerille. Jos purkutransistori on kytketty auki ja ulostulosta mitataan latausjännite, on laturi kytkettynä. Mikäli mikrokontrollerilla olevan ohjelmiston mukaan lataus on mahdollinen, voidaan lataustransistori kytkeä päälle.

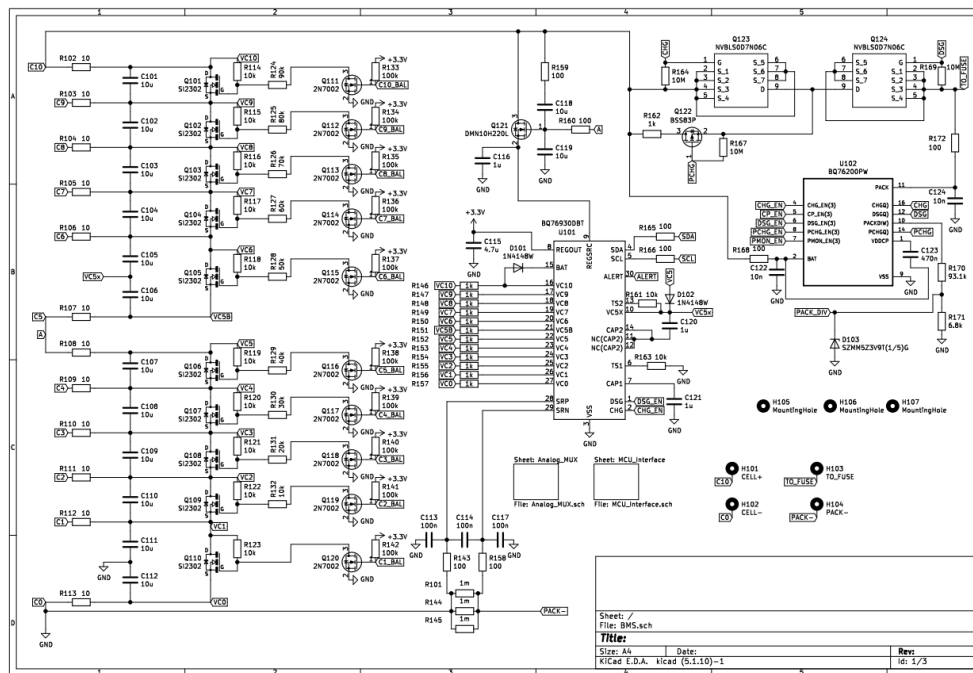
Mikrokontrolleri ohjaa analogi multiplekseriä, joka mittaa akkupaketissa olevia lämpötila-antureita. Multiplekseri vuorottelee mikrokontrollerin ohjauksen perusteella mitä lämpötila-anturia mitataan milläkin hetkellä ja ohjaa valitun anturin signaalin ulostuloonsa, joka kytkeytyy mikrokontrollerin analogisisäänmenoon.

Mikrokontrolleri ohjaa kennojännitteiden tasapainotusta kennomonitorin mittamien jännitteiden perusteella. Kennojännitteiden tasapainotus on toteutettu akkukennojen rinnalle kytketyillä transistoreilla, joita mikrokontrolleri ohjaa digitaalisilla ulostuloilla. Tasapainotuksen avulla akkupaketin kennoista voidaan hyödyntää koko potentiaali.

### **3.3 KytKentäkaavio**

Lohkokaavion perusteella suunniteltiin akunhallintajärjestelmän kytkentäkaavio. KytKentäkaavion suunnitteluun käytettiin KiCad-ohjelmistoa, joka on avoimen lähdekoodin sähköinen suunnitteluautomaatio-ohjelmisto. Suunnittelussa käytetty versio oli 5.1.10.

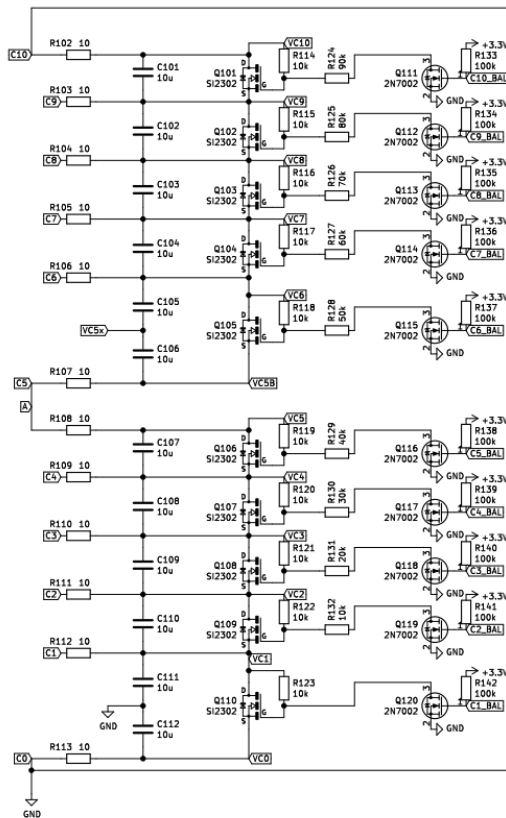
Akunhallintajärjestelmän kytkentäkaavio jaettiin kolmelle sivulle toiminnallisuuksien mukaan sekä helpottamaan sen lukemista. Ensimmäisellä sivulla on kennomonitori, transistoriajuri, purku- ja lataustransistorit, virranmittausvastus sekä kennojännitteiden balansointikytkentä. Kuviossa 4 on kytkentäkaavion ensimmäinen sivu.



KUVIO 4. KytKentäkaavion ensimmäinen sivu

Kuvion 4 vasemmassa laidassa on kennojännitteiden balansointikytkentä, keskellä kennomonitori, oikealla transistoriajuri ja sen yläpuolella transistorit. Virranmittausvastus on kuviossa 4 keskellä alareunassa. Lisäksi kuviossa on 4 symbolia piirilevyn kiinnitysrei'ille (H105 – H107) sekä akunhallintajärjestelmän tulevan ja lähtevän virran kaapeliliitosreiät (H101 – H104). Kennomonitori muodostaa akkupaketin kokonaisjännitteestä 3,3 voltin käyttöjännitteen, jota järjestelmän muut komponentit hyödyntävät (Texas Instruments 2022, 3).

Kennojännitteiden balansointi on toteutettu siten, että jokaisen akkukennon rinnalle kytkeytyy transistori (N-mos), jota ohjataan kytkimenä, joka vähentää lataustilanteessa kyseisen kennon latausvirtaa. (kuvio 5). Tämän toiminnon avulla koko akkupaketin jännitteet saadaan tasapainoon ja sen käytettävä kapasiteetti on suurimmillaan.



KUVIO 5. Kennojännitteiden balansointi

Kuviossa 5 akkukennojen ( $C_x$ ) rinnalle kytkettyjä balansointitransistoreja (Q101 – Q110) ohjataan transistoreilla Q111 – Q120 (N-mos), joita lopulta mikrokontrolleri ohjaa. Transistorit Q111 – Q120 ovat staattisesti johtavassa tilassa niiden hiloihin kytkettyjen ylösvetovastuksien (R133 – R142) avulla. Tämän seurauksena balansointitransistorien hilajännite asettuu lähdejännitteen tasolle. N-mos transistorin hilajännitteen ollessa sama, kuin lähdejännite, on transistori ei-johtavassa tilassa ja balansointi ei ole kytketty päälle. Mikäli mikrokontrolleri ohjaa jonkin transistorin (Q111 – Q120) hilan ( $C_x\_BAL$ ) maatasoon, siirtyy kenno  $x$  balansointitransistori johtavaan tilaan, sillä vastukset R114 – R123 toimivat ylösvetovastuksina niiden hiloille. Kennojen balansointivirta kulkee balansointivastusten R102 – R113, jotka ovat  $10 \Omega$ , lävitse. Balansointivirta kulkee aina kahden balansointivastuksen läpi. Näin ollen täyden akkukennon (4.2 V) balansointivirta  $I$  on enimmillään kaavan 2 mukainen

$$I = \frac{U}{R}, \quad 2$$

jossa  $U$  on jännite ja  $R$  resistanssi.

Sijoitetaan yllä mainitut balansointikytkennän arvot kaavaan 2.

$$I = \frac{4,2 \text{ V}}{20 \Omega} = 0,21 \text{ A} = 210 \text{ mA}$$

Balansointivastuksien tehohäviö laskettiin käyttämällä vaihtoehtoista tasavirran tehon  $P$  kaavaa (kaava 3)

$$P = I^2 \cdot R, \quad 3$$

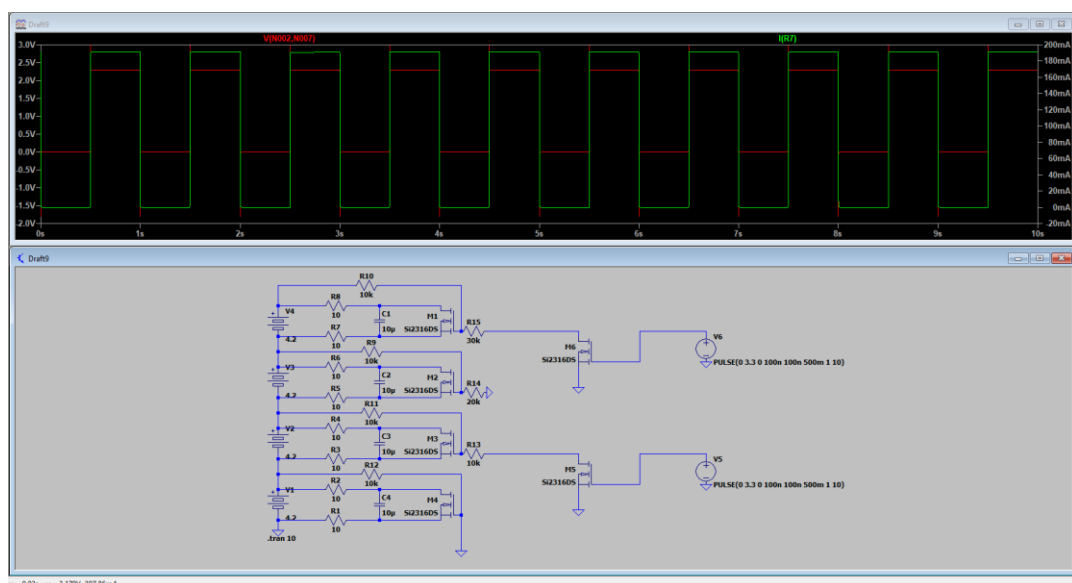
jossa  $I$  on balansointivirta ja  $R$  balansointivastuksen resistanssi.

Sijoitetaan yllä mainitut arvot kaavaan 3.

$$P = 210 \text{ mA}^2 \cdot 10 = 441 \text{ mW}$$

Tehohäviön perusteella balansointivastuksiksi valittiin Vishayn CRCW121810R0FKEK, joiden tehonkesto on 1W (Vishay 2021, 1).

Balansointipiirin toiminta todennettiin simuloimalla kyseistä kytkentää, jossa akkukennoja simuloitiin jännitelähteillä (kuvio 6). Simuloinnin päätavoite oli todentaa balansointitransistorien kytkeytyminen, joten siinä simuloitiin ainoastaan neljän akkukennon sarjakytkentää.



KUVIO 6. Balansointikytkennän simulointi

Kuviossa 6 vasemmassa laidassa olevat jännitelähteet simuloivat akkukennoja ja oikealla laidalla olevat pulssilähteet mikrokontrollerin I/O kanavia. M1 – M5 ovat balansointitransistoreita ja M5 ja M6 ohjaustransistoreita. Kuvion 6 simuloinnissa mitattiin vastuksen R7 läpi kulkevaa virtaa (vihreä) sekä balansointitransistorin M1 hila-lähde-jännitettä (punainen). Kuvaajista nähtiin, että balansointivirta oli hieman alle 200 mA, joka oli vähemmän kuin laskettu arvo. Ero ei kuitenkaan ollut merkittävä, joten siitä ei aiheutunut muutoksia suunnitteluun. Hila-lähde-jännite oli simuloinnin mukaan 0–2,2 V ja valitun transistorin (Si2302) minimi hila-lähde-kynnysjännite on 0,65 V (Vishay 1997, 2).

Virranmittausvastus mitoitettiin kennomonitorin datalehden ohjeistuksen mukaisesti, jossa suurimmaksi vastuksen yli olevaksi jännitteeksi ilmoitettiin 300 mV. Kennomonitorin ylivirtasuojan suurin mahdollinen mittaama jännite on 100 mV. (Texas Instruments 2022, 12.) Ylivirtarajaksi asetettiin 150 A ja tällöin virranmittausvastuksen yli haluttiin 50 mV jännite. Asetettujen parametrien perusteella voitiin laskea virranmittausvastuksen haluttu resistanssi  $R$  kaavan 4 avulla

$$R = \frac{U}{I}, \quad 4$$

jossa  $U$  on jännite ja  $I$  on virta.

Sijoitetaan yllä mainitut arvot kaavaan 3.

$$R = \frac{50 \text{ mV}}{150 \text{ A}} = 333 \mu\Omega$$

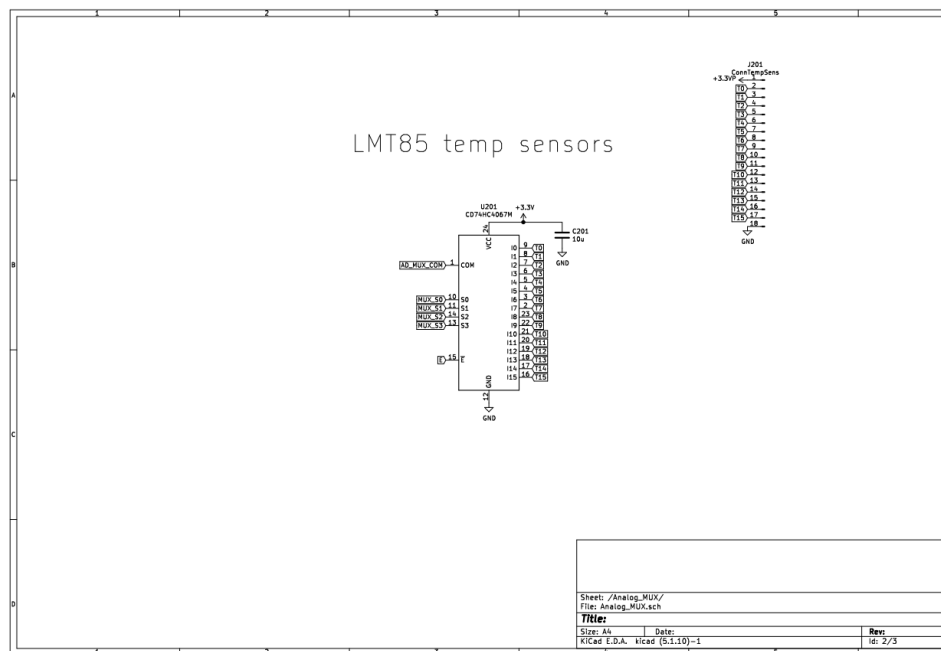
Kyseisellä vastusarvolla olevia vastuksia ei ollut olemassa, joten ratkaisuksi valittiin kytkeä kolme 1 m $\Omega$  vastusta rinnakkain, joiden yhteisresistanssi on siten 1/3 m $\Omega$  eli 333  $\mu\Omega$ . Tämän avulla myös suuren virran aiheuttama tehohäviö saatiin jaettua paremmin. Virranmittausvastuksiksi valittiin Vishayn WSHP28181L000FEA, joiden tehonkesto on 10 W (Vishay 2021, 10). Virranmittausvastusten yli jäävä tehohäviö voidaan laskea kaavan 1 avulla, johon sijoitetaan niiden läpi kulkeva virta sekä yli jäävä jännite. Yhden vastuksen yli jäävä tehohäviö on koko yli jäävä teho jaettuna kolmeen osaan.





vikatilanteessa ylittää 42 V, ei mikrokontrollerin analogisisäänmeno välittömästi vaurioitu (STMicroelectronics 2022). Mikäli akkupaketin jännite kasvaa erittäin merkittävästi esimerkiksi vastuksen vioittumisen seurauksena, on kuvion 4 vastuksen R171 rinnalle kytketty lisäsuojaksi 3,9 V zenerdiodi (SZMM5Z3V9T1G) (ON Semiconductor 2020).

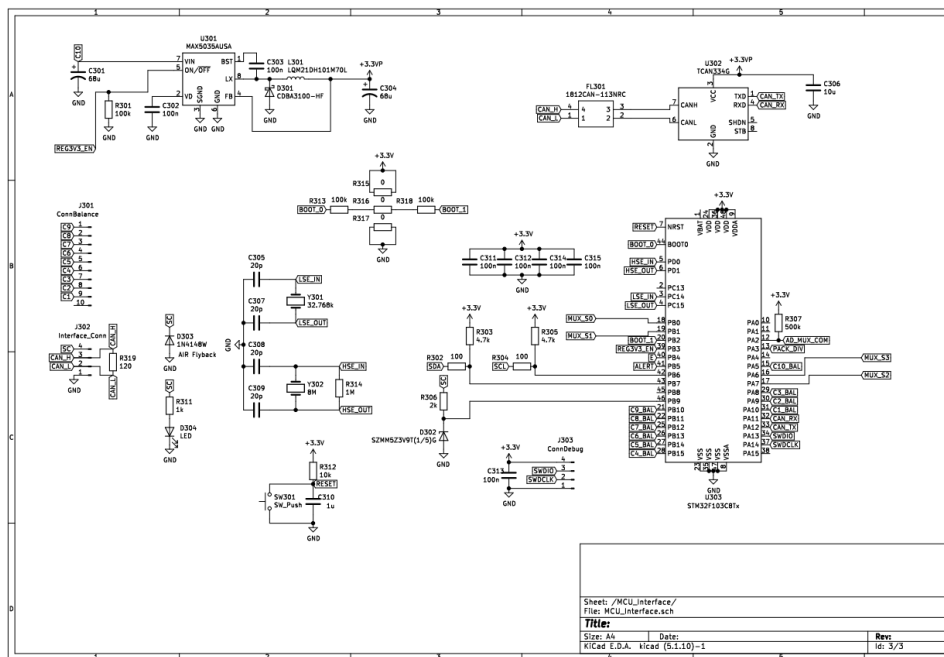
KytKentäkaavion toisella sivulla on analogi multiplekseri sekä lämpöantureiden liitin (kuvio 9).



KUVIO 9. KytKentäkaavion toinen sivu

Kuviossa 9 keskellä analogi multiplekseri ja oikealla lämpöantureiden liitin. Multiplekserin oikealla laidalla on lämpöantureiden signaalien sisäänmenot ja vasemmassa laidalla mikrokontrollerin ohjaussignaalit sekä anturisynteesin ulostulo. Multiplekseri sekä lämpöanturit käyttävät 3,3 voltin käyttöjännitettä.

KytKentäkaavion kolmannella sivulla on mikrokontrolleri, sen ulkopuoliset kytkennät, CAN-väylän lähetyvastaanotin, 3,3 voltin hakkurijännitelähde, balansointi-, ohjelmointi- ja ajoneuvon muuhun sähköjärjestelmään yhdistävän liittimen (kuvio 10). Ajoneuvon sähköjärjestelmästä järjestelmään kytkeytyy ajoneuvon sammutuspiirin jännite, maataso sekä CAN-väylä. Mikrokontrolleri mittaa sammutuspiirin jännite ja sen perusteella voi tarvittaessa siirtyä vähemmän virtaa kuluttavaan tilaan.



KUVIO 10. KytKentäkaavion kolmas sivu

Kuviossa 10 oikeassa laidassa on mikrokontrolleri (U303) ja sen yläpuolella CAN-väylä lähetinvastaanotin (U302). Vasemmassa yläkulmassa on hakkurijännitelähde (U301), joka muuntaa akkupaketin kokonaisjännitteen 3,3 voltiksi. Hakkurijännitelähteen kytkentä on tehty sen (MAX5035AUSA+) datalehden ohjeistuksen mukaisesti (Maxim Integrated 2011, 1). Hakkurijännitelähde syöttää akunhallintajärjestelmässä käyttöjännitteet lämpöantureille sekä CAN-väylä lähetinvastaanottimelle. Mikrokontrolleri voi kytkeä hakkurijännitelähteen pois päältä käyttäen yhtä I/O kanavaa. Hakkurijännitelähde kytketään pois päältä, mikäli auton sammuksiin tila on "sammutuspiirin" sekä akkupaketin jännite on alhainen. Tällä tavalla voidaan vähentää akkupaketin lepovirran kulutusta.

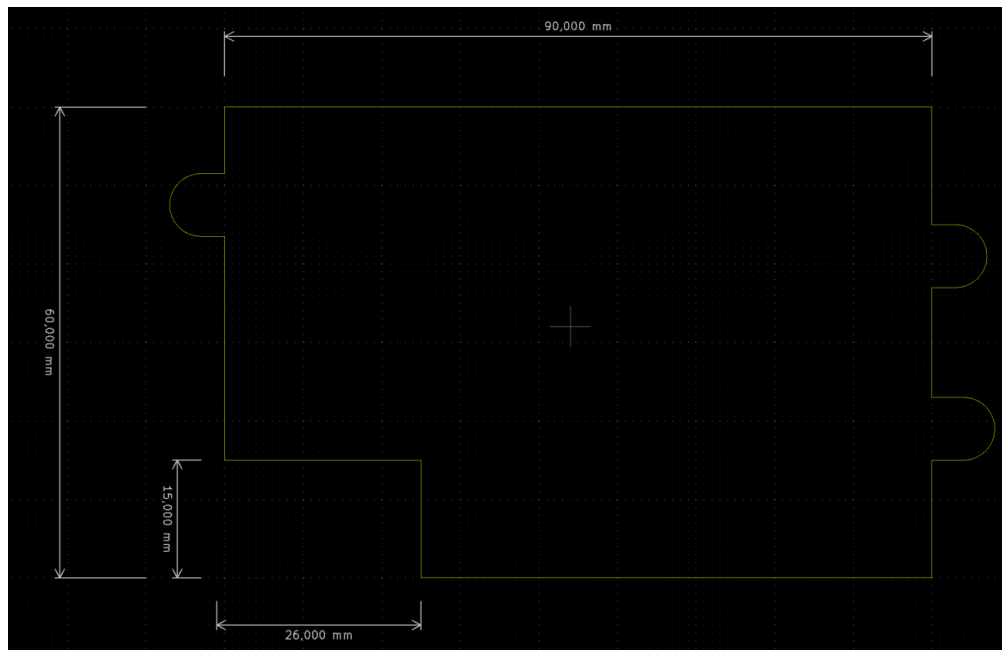
Kuvion 10 keskellä on mikrokontrollerin ulkoiset kytkennät, jotka noudattavat datalehden tyypillisten sovellusten ohjeistuksia (STMicroelectronics 2022). Mikrokontrollerin oikealla puolella oleva R307 on lämpöanturisignaalin ylösvetovastus, joka nostaa anturisignaalin 3,3 volttiin, mikäli kyseinen anturi on viallinen tai sen signaalijohdin on katkennut. Tämän avulla voidaan aktiivisesti tunnistaa lämpöantureiden mahdollinen vikatila. CAN-väylä lähetinvastaanottimen vasemmalle puolelle on yhteismuotohäiriön poistaja (FL301), joka suodattaa CAN-väylästä mahdollista häiriötä, joka voi indusoida lähellä olevista johdoista tai itse järjestelmästä (Inductors in EMC – Part 3 2020).

KytKentäkaavio liitteessä 1.

### 3.4 Piirilevy

KytKentäkaavion suunnittelun jälkeen siirryttiin piirilevysuunnitteluun. Koska KiCad-ohjelmisto sisältää myös piirilevysuunnittelutyökalun, on koko järjestelmän suunnittelu dynaamista. Jos piirikaavioon tehdään muutoksia, on niiden synkronointi nopeaa ja yksinkertaista.

Piirilevysuunnittelu aloitettiin kääntämällä kytKentäkaavio piirilevyeditoriin KiCad:lla. Tämän jälkeen Piirilevyille luotiin ulkoiset mitat ja kiinnitysreikien paikat mekaanisen suunnittelun pohjalta (kuvio 11).

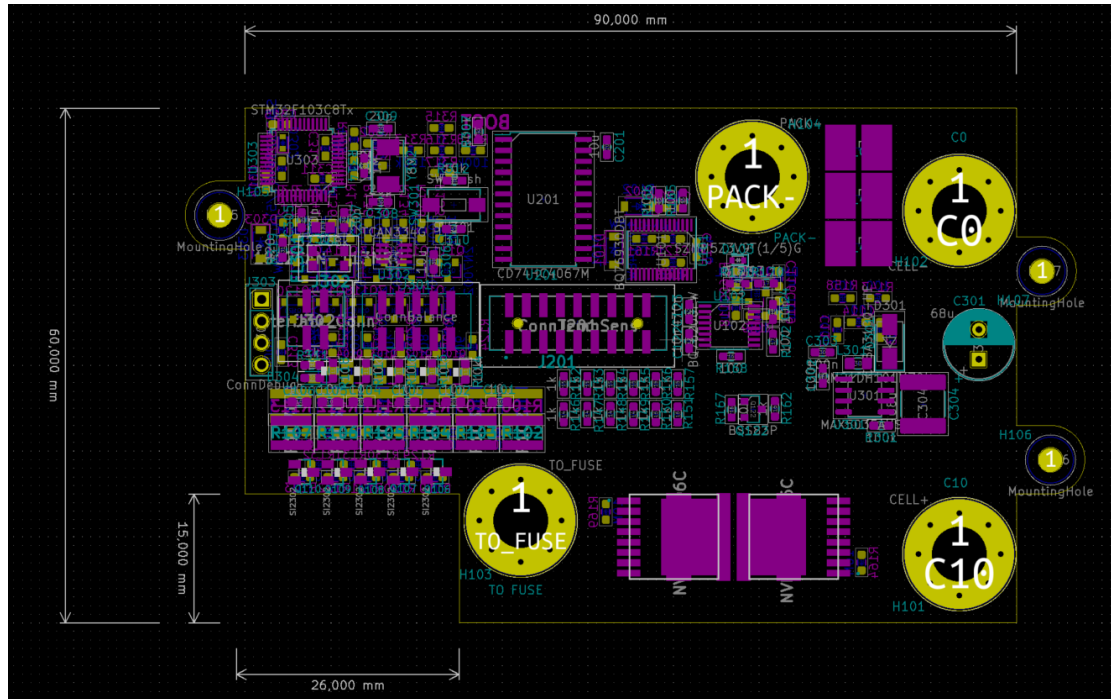


KUVIO 11. Piirilevyn ulkoiset mitat

Kuviosta 11 nähdään, että piirilevyn päämitat ovat (90 x 60) mm, ja sen vasemmassa alakulmassa on kevennyslovi, sillä vaatimusten mukaisesti järjestelmän tulee olla mahdollisimman kevyt. Myös piirilevyn oikealla ja vasemmalla olevat kiinnitysruuvien paikat ovat painoa säästään ulokemalliset.

Piirilevyn mekaanisten mittojen ollessa määriteltynä, aloitettiin komponenttien sijoittelu. Komponenttien sijoittelussa pyrittiin huomioimaan virranmittausvastusten sekä purku- ja lataustransistorien sijainti suhteessa digitaalielektronikkaan, sillä

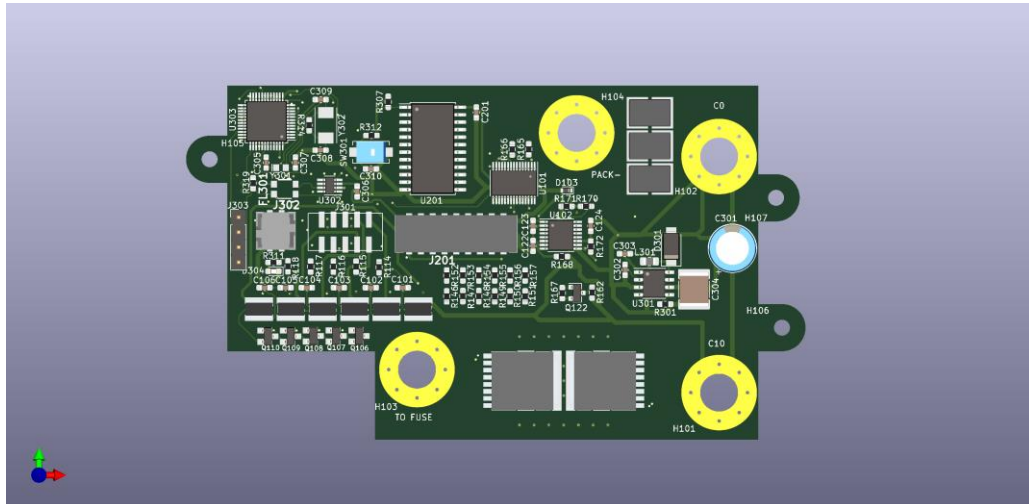
niissä kulkevat suuret sähkövirrat voivat aiheuttaa sähkömagneettista häiriötä sekä lämpöä. Lisäksi suuria sähkövirtoja kuljettavat johtimet pyrittiin pitämään mahdollisimman lyhyinä, jotta niiden impedanssi olisi mahdollisimman pieni. (High Current PCB n.d.) Kuviossa 12 on komponentit sijoiteltu piirilevyedito-  
rissa.



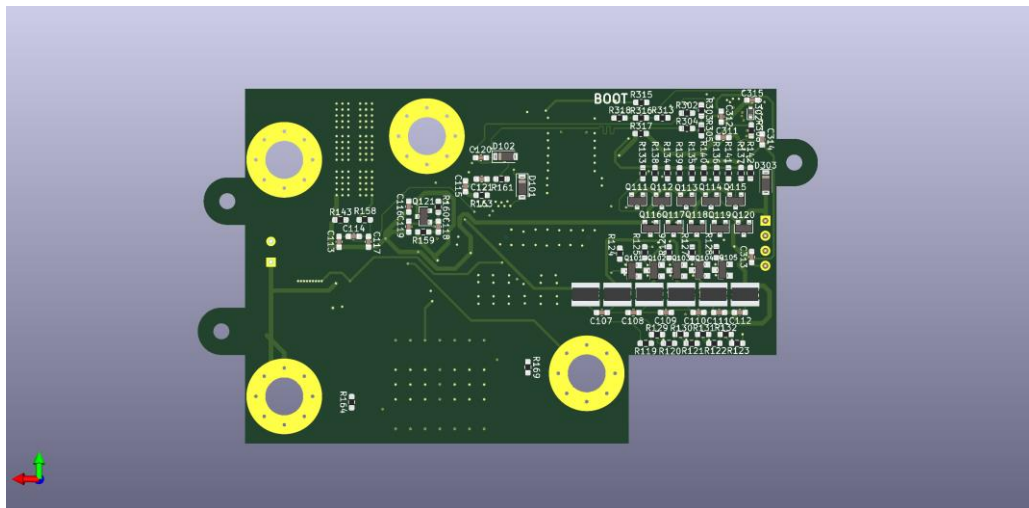
KUVIO 12. Komponenttien sijoittelu piirilevyelle

Kuvion 12 oikeassa alareunassa olevaan C10 lenkkiliitinreikään kytkeytyy akkupaketin positiivinen napa, josta virta kulkee purku- ja lataustransistorien (C10:n vasemmalla puolella) lävitse TO\_FUSE lenkkiliitinreikään. TO\_FUSE lenkkiliitinreistä purkuvirta kulkee ulkopuoliseen sulakkeeseen ja siten hybridijärjestelmään. Ladatessa virran suunta on päinvastainen. Kuvion 12 oikeassa yläkulmassa olevana C0 lenkkiliitinreikään kiinnittyy akkupaketin negatiivinen napa. C0 lenkkiliitinreiän vasemmalla puolella on virranmittausvastukset, joiden lävitse akkupaketin virta kulkee PAKC- lenkkiliitinreikään. PACK- lenkkiliitinreikä kytkeytyy hybridijärjestelmään.

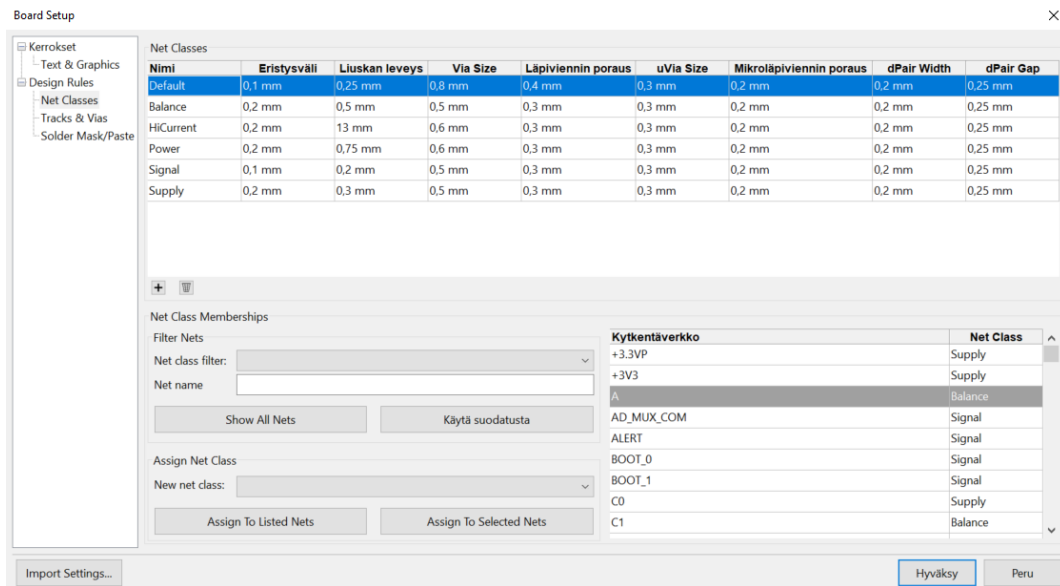
Kuviossa 12 mikrokontrolleri on sijoitettu vasempaan yläkulmaan, jotta se on mahdollisimman etäällä lämpenevistä sekä suurista virtoja kuljettavista johtimista ja komponenteista. Kuviot 13 ja 14 ovat 3D-renderöintejä piirilevyn komponenttien asettelusta, joista niiden sijainnit hahmottuvat paremmin.



KUVIO 13. Piirilevyn etupuoli



”board setup” valikossa verkkoluokat, jotka määrittelevät jokaiselle eri kytkentäverkolle johtimen leveyden, läpiviennin koon sekä eristysvälin. Kuviossa 15 on määritellyt verkkoluokat ja niiden parametrit.

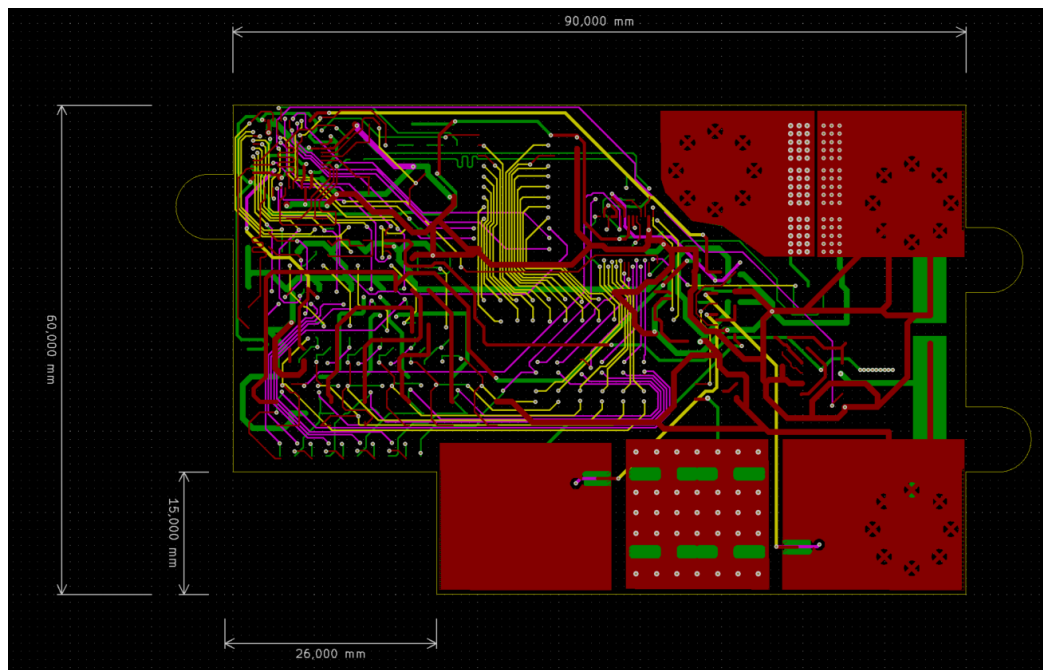


KUVIO 15. Verkkoluokat

Verkkoluokkien ollessa määriteltynä, valittiin jokaiselle kytkentäverkolle sille sopiva verkkoluokka esim. kytkentäverkolle, jossa kulkee signaali, valittiin ”Signal” verkkoluokka.

Verkkoluokkien määrittelyn jälkeen aloitettiin itse reititys. Johtimien reitityksessä pyrittiin pitämään niiden pituudet mahdollisimman lyhyinä sekä käyttää mahdollisimman vähän läpivientejä.

Kuviossa 16 on piirilevyn kaikkien kerroksien kuparijohtimet.



KUVIO 16. Piirilevyn kuparijohtimet

Piirilevyeditorissa eri kerroksien kuparit ovat värikoodattu eri väreillä. KiCad:ssa värikoodit ovat seuraavanlaiset:

- 1. kuparikerros: punainen
- 2. kuparikerros: keltainen
- 3. kuparikerros: violetti
- 4. kuparikerros vihreä

Kuviossa 16 näkyvät suurien sähkövirtojen reitit isoina täyttöinä oikeassa alakulmassa sekä oikeassa yläkulmassa. Täytöt ovat identtiset kerroksissa 1 ja 4, ja ne yhdistyvät lenkkiliitinreikien sekä läpivientien kautta toisiinsa. Täytöt ovat mahdollisimman isoja, jotta niiden lämpökapasiteetti olisi mahdollisimman suuri ja resistanssi mahdollisimman pieni.

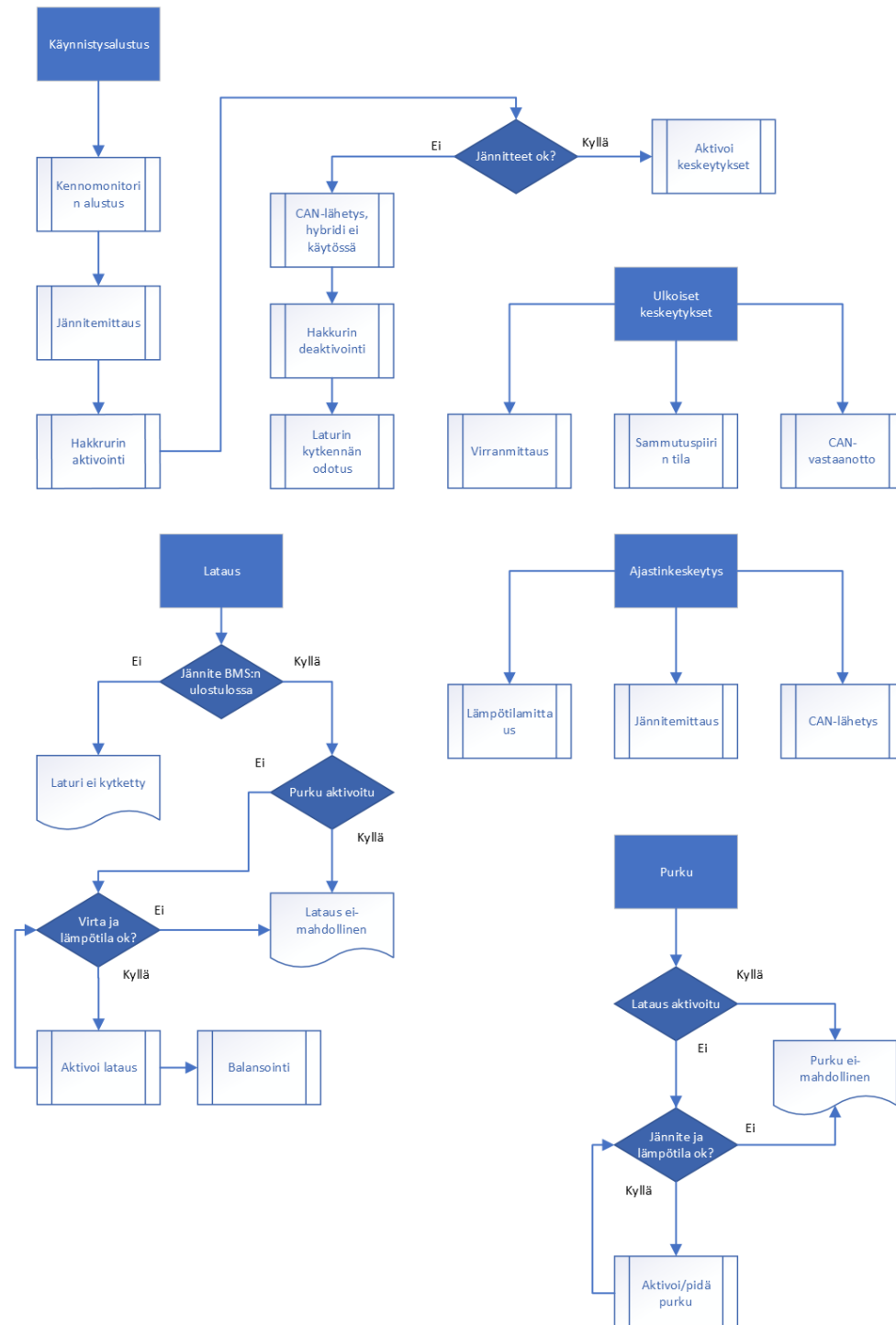
Piirilevyllä kulkevat maataso reititykset pyrittiin pitämään lyhyinä ja niitä vedettiin mahdollisimman monta C0 lenkkiliitinreiän kuparitäyttöön, jossa levyn maataso on. Maatasolle ei tehty täyttöä sillä levyllä on useassa eri paikassa melko korkea jännite (enintään 42 V), joka vaatii eristysväliä etenkin muuttuvissa olosuhteissa.

Reitityksessä huomioitiin myös nopeiden tiedonsiirtoväylien (CAN- ja I2C-väylät) johtimien keskinäiset pituudet. CAN-väylässä tiedonsiirto tapahtuu parikaapelia pitkin, jonka johtimissa kulkee identtinen data. Mikäli CAN-väylän johtimien keskinäisissä pituuksissa on merkittävästi eroa, saapuu toisessa johtimessa olevan bitin nousu- tai laskureuna vastaanottimeen eri aikaan. Mikäli aikaero on liian suuri, voi data korruptoitua. (Designing for Effective CAN Bus Communication n.d.) I2C-väylässä tiedonsiirto tapahtuu kahdella johtimella, joista toinen on datalle ja toinen kellopulssille. Vastaanotin lukee datajohtimessa olevan bitin kellopulssin laskureunalla, joten johtimien keskinäinen pituusero voi tässäkin tapauksessa aiheuttaa datan korruption.

Piirilevyn kuparikerrokset liitteessä 2.

### 3.5 Ohjelmisto

Piirilevy-suunnittelun jälkeen aloitettiin ohjelmistosuunnittelu. Ohjelmisto suunniteltiin tekemällä siitä toiminnallinen vuokaavio. Vuokaaviossa on esiteltynä ohjelmiston looginen toiminta (kuvio 17).



KUVIO 17. Ohjelmiston lohkokaavio

Jokaisessa järjestelmän uudelleenkäynnistyksessä ohjelmisto suorittaa alustuksen, jossa se määrittelee I2C-väylän kautta kennomonitorin parametrit. Parametreilla määritellään ylivirtasuojien rajat, niiden aikaviiveet sekä ali- ja ylijännitesuojien rajat. Mikrokontrolleri vastaanottaa kennomonitorilta sen mittaamien arvojen kompensatio- ja muunnoskerroinlukemat (kuvio 17).

Kennomonitorin alustuksen jälkeen ohjelmisto tarkistaa, että akkupaketin jännite on riittävällä tasolla. Jos jännite ei ole käyttöalueella, tai hyvin lähellä sen alarajaa, lähettää mikrokontrolleri CAN-väylään ilmoituksen, jonka jälkeen sammuttaa hakkurijännitelähteen ja odottaa laturin kytkeytymistä. Mikäli käynnistyksessä akkujännite on käyttöalueella, aktivoi mikrokontrolleri keskeytykset, joihin kuuluu toimintoja ajoittava ajastinkeskeytys sekä ulkoiset keskeytykset (kuvio 17).

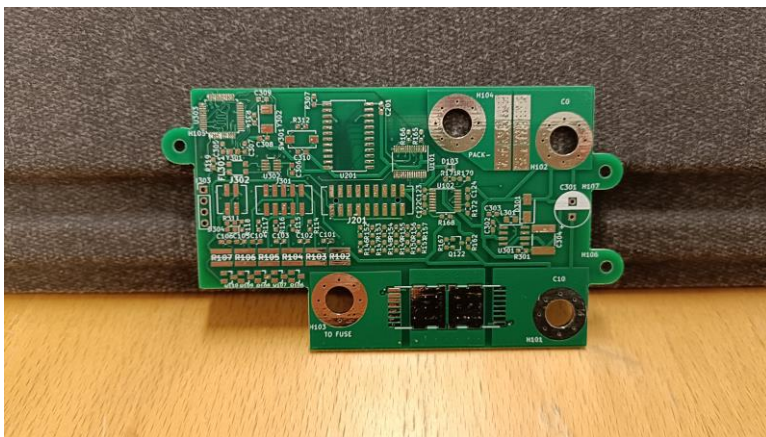
Mikrokontrolleri mittaa akunhallintajärjestelmän ulostulossa olevaa jännitettä. Mikäli ulostulossa on jännite ja purku ei ole aktivoitu, on järjestelmään kytketty laturi. Jos akkupaketin lämpötila on sallituissa rajoissa, aktivoituu lataus. Akunhallintajärjestelmän normaalitilassa purku on aktivoitu, sillä muu hybridijärjestelmä pyrittään pitämään aktiivisena mahdollisimman paljon. Mikäli purku on aktivoitu, mutta purkuvirta ei ole suuri, ohjelmisto päättää, että hybridijärjestelmän moottoreita ei ajeta. Jos edellä mainitussa tilassa ulostulon jännite nousee latausjännitteeseen, eli moottorit regeneroivat, latausehtojen täytyessä aktivoituu lataus. Mikäli jännite ulostulossa jälleen laskee, aktivoidaan purku.

## 4 TOTEUTUS

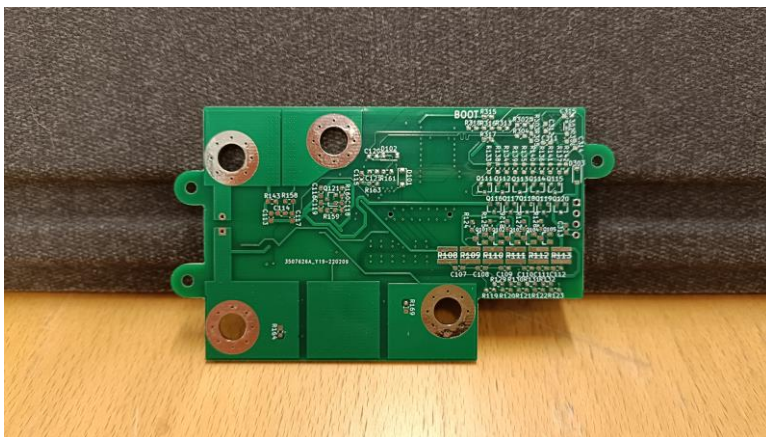
Akunhallintajärjestelmä toteutettiin ja valmistettiin prototyypinä Tampere Formula Student -tiimin vuoden 2022 kilpa-ajoneuvoon. Valmistuksessa käytettiin TAMK Formula Student ry:n työkaluja ja tarvikkeita. Lisäksi TAMK Formula Student ry kustansi valmistuksessa syntyneet kulut.

### 4.1 Piirilevy

Hyvän laadun varmistamiseksi tyhjt, eli ilman komponentteja olevat, piirilevyt tilattiin varsinaiselta piirilevyvalmistajalta (JLCPCB). Piirilevyjen uloimpien kupari-kerroksien paksuudeksi valittiin, levyllä kulkevien suurien virtojen seurauksena, 2 unssia per neliötuuma (2 oz) (2 OZ Copper PCB n.d). Kuvissa 2 ja 3 on tyhjt piirilevyt.



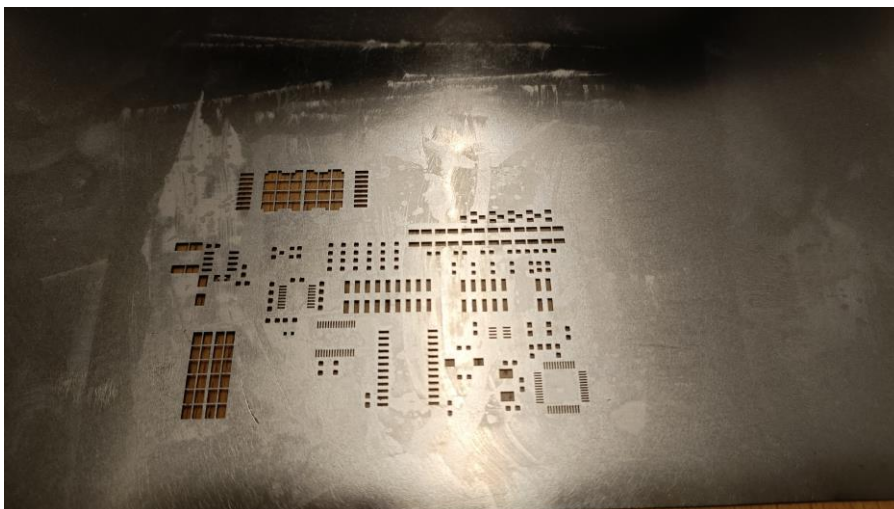
KUVA 2. Tyhjä piirilevy etupuolelta



KUVA 3. Tyhjä piirilevy takapuolelta

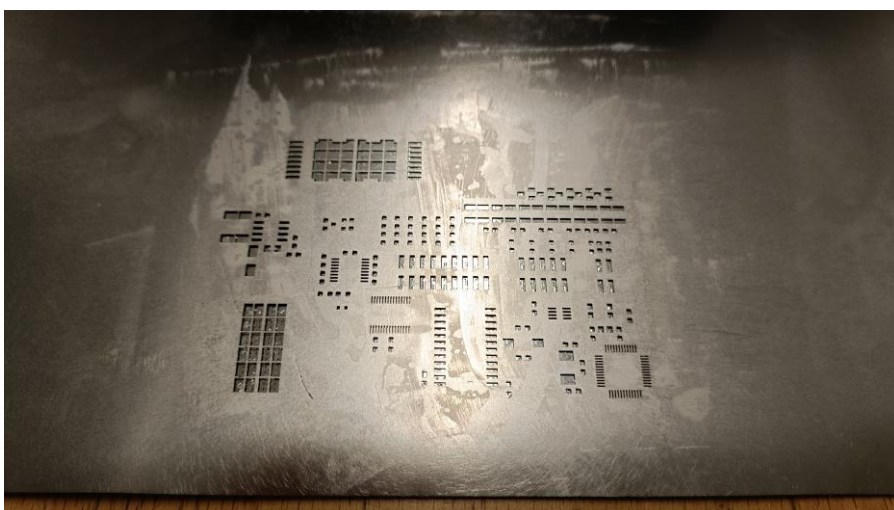
Kuvista 2 ja 3 näkyy piirilevyn valmistuksen korkealaatuisuus.

Piirilevyn etupuolelle tulevat komponentit juotettiin piirilevyjen mukana tilattujen tinasapluunoiden avulla. Tinasapluuna on ohut metallilevy, jossa on aukot piirilevyn tina-anturoiden kohdilla (kuva 4).



KUVA 4. Tinasapluuna

Piirilevy asetettiin tinasapluunan alle ja sen tina-anturat kohdistettiin sapluunan aukkoihin (kuva 5).

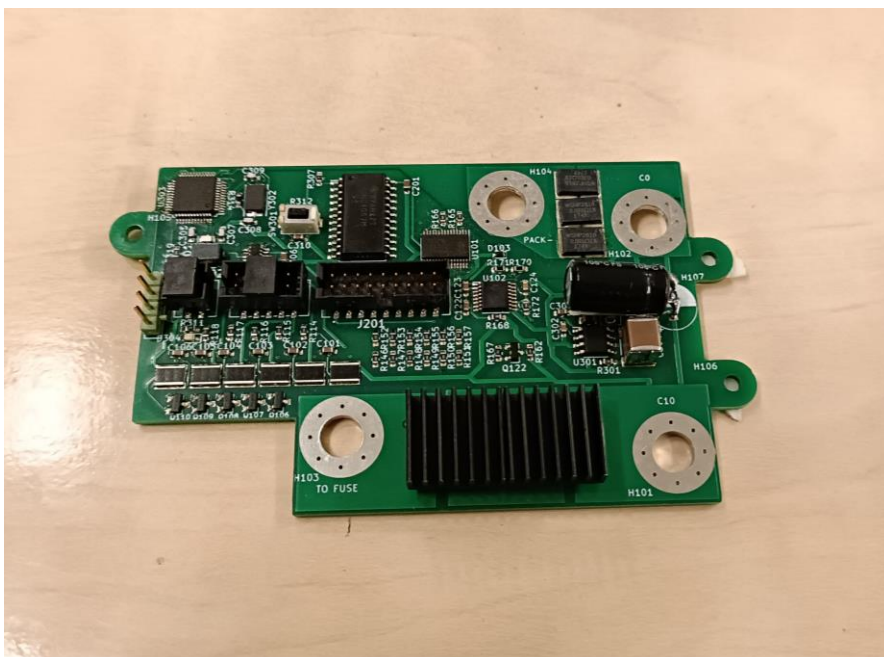


KUVA 5. Piirilevy tinasapluunan alla.

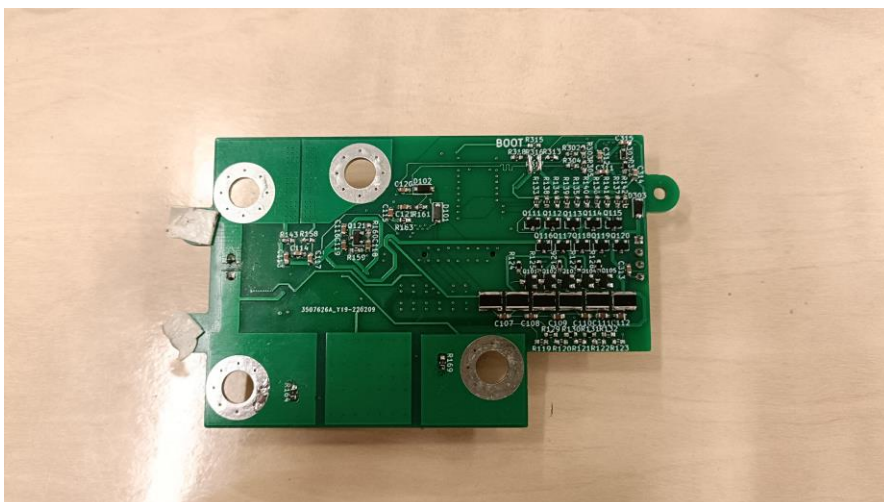
Seuraavaksi sapluunan päälle laitettiin juotospastaa, joka on pastamaista juotos-  
tinää, ja levitettiin lastalla siten, että sapluunan kaikki aukot täyttyivät. Tämän jäl-

keen sapluuna poistettiin piirilevyn päältä ja komponentit asetettiin omille paikoilleen. Komponentit tarttuivat juotospastaan helpottaen niiden paikallaan pysymistä. Piirilevy komponentteineen asetettiin lämpölevyn päälle, joka kuumensi juotospastan sulamispisteeseen juottaen komponentit paikoilleen.

Piirilevyn takapuolella olevat komponentit juotettiin käsin, sillä lämpölevyn käyttö ei ollut enää mahdollista toisen puolen ollessa jo valmis. Tämä otettiin huomioon piirilevysuunnittelussa, jossa pienempi määrä sekä helpommin käsin juotettavia komponentteja sijoiteltiin levyn takapuolelle. Valmis levy kuvissa 6 ja 7.



KUVA 6. Valmiin piirilevyn etupuoli

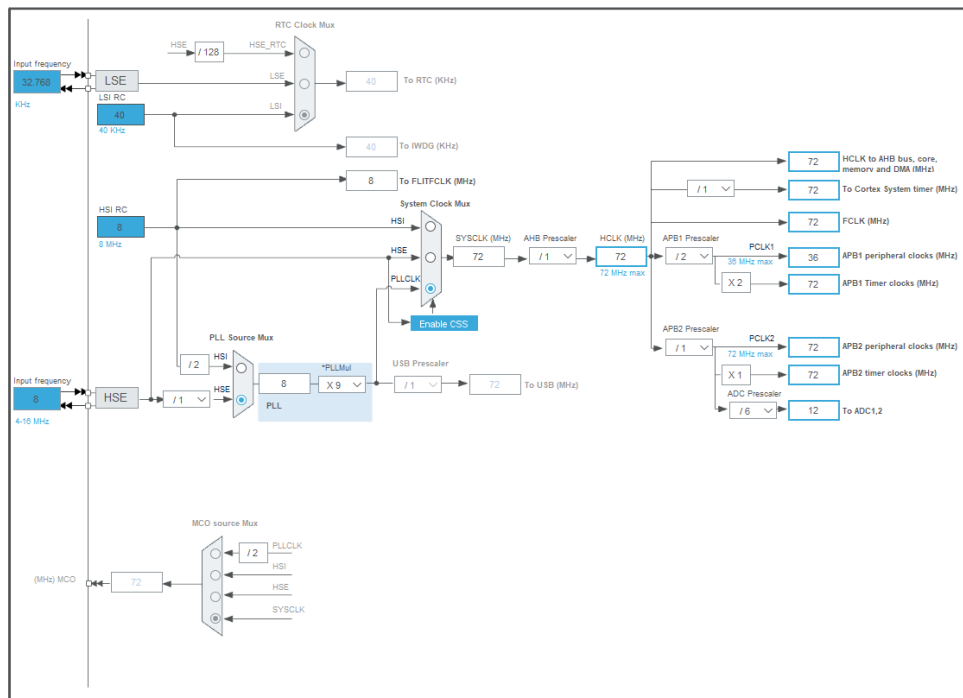


KUVA 7. Valmiin piirilevyn takapuoli

Kuvassa 6 nähdään purku- ja lataustransistoreiden päälle asennetut jäähdytys-elementit. Akunhallintajärjestelmän piirilevyjä valmistettiin 2 kappaletta, joista toinen on varaosa.

## 4.2 Ohjelmisto

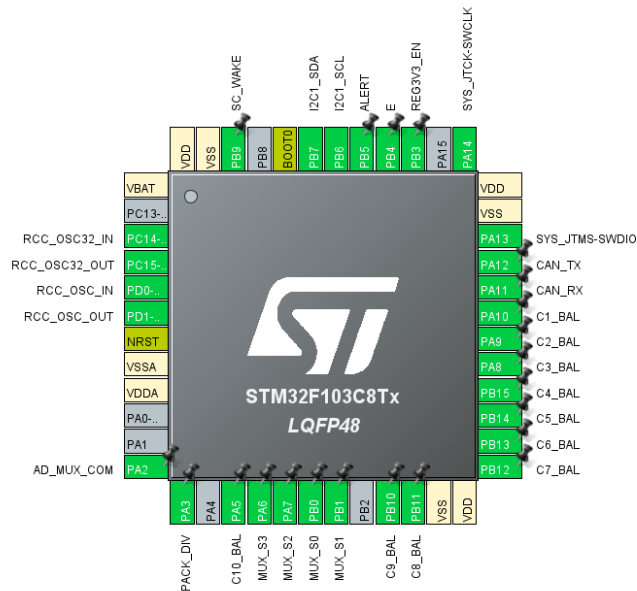
Akunhallintajärjestelmän ohjelmisto toteutettiin STM32CubeMX (versio 6.5.0) sekä uVision IDE (versio 5.37) ohjelmistoilla. Ohjelmiston luonti aloitettiin STM32CubeMX ohjelmalla, jossa määritellään mikrokontrollerin lohkojen parametrit, kommunikaatioväylät, pinnien toiminnot, keskeytykset sekä kellotaajuu- det. Kuviossa 18 mikrokontrollerin kellotaajuus konfiguraatio. STM32CubeMX luo määrittelystä koodipohjan, johon käyttäjä voi lisätä omaa lähdekoodia. Tässä lu- vussa esitellään pääasiassa ohjelmiston pohjan luonti SMT32CubeMX ohjelmis- tolla, sillä akkukennopakettin valmistuksen ollessa kesken, ei lopullista ohjelmis- toa voitu kirjoittaa.



KUVIO 18. Kellotaajuus konfiguraatio

Kuvion 18 vasemmassa laidassa olevat sinisellä täytetyt laatikot ovat piirilevyllä olevat ulkoiset kellotaajuslähteet, jotka ovat 8 MHz ja 32,768 kHz. Mikrokontrollerin kellotaajuus (SYSCLK) asetettiin suurimpaan mahdolliseen, joka on 72 MHz. Korkea kellotaajuus lisää virrankulutusta, mutta myös järjestelmän nopeutta. Akunhallintajärjestelmän mikrokontrolleri kuluttaa suurimmalla kellotaajuudella, ohjelman ollessa flash-muistissa, 50 mA virtaa (STMicroelectronics 2022, 41). Kyseinen virrankulutus ei ole, akkupaketin kapasiteetti huomioiden, kovinkaan merkittävä.

Kellotaajuus konfiguraation jälkeen määriteltiin mikrokontrollerin pinnien toiminnot. Kuviossa 19 mikrokontrollerille määritellyt pinnit ja niiden nimet.



KUVIO 19. Pinnimäärittely

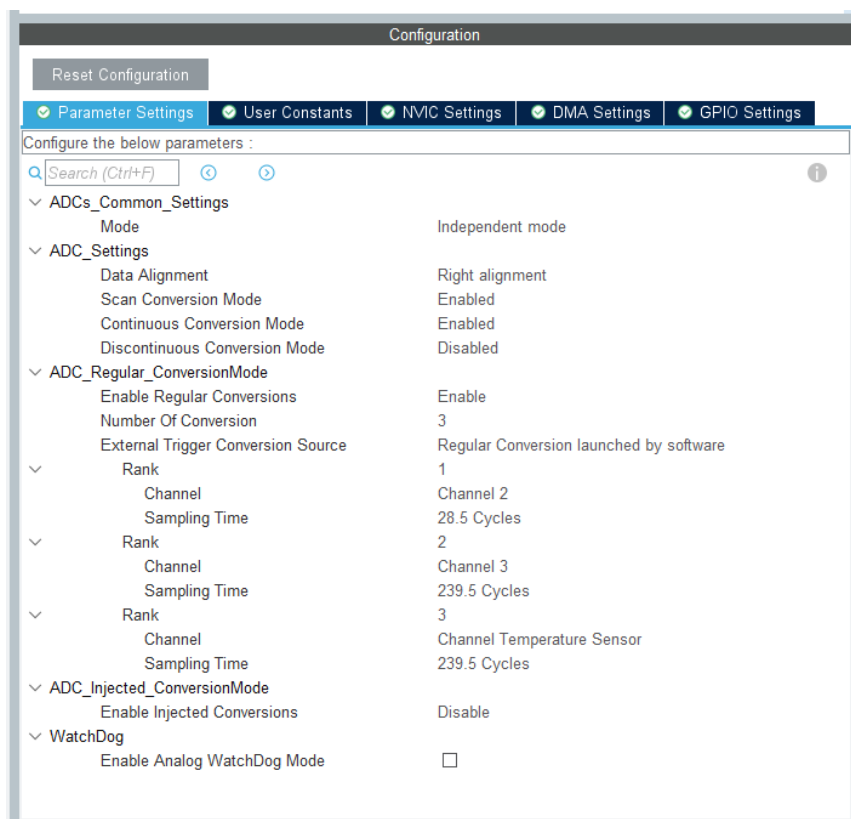
Pinnimäärittelyn jälkeen määriteltiin mikrokontrollerin lohkojen parametrit sekä keskeytykset. Kuviossa 20 keskeytysten määrittely.

Configuration			
NVIC			
Code generation			
Priority Group	4 bits for pre-emption...	<input type="checkbox"/> Sort by Preemption Priority and Sub Priority	<input type="checkbox"/> Sort by interrupts names
Search	Search (Ctrl+F)	Show available interrupts	<input checked="" type="checkbox"/> Force DMA channels Interrupts
NVIC Interrupt Table	Enabled	Preemption Priority	Sub Priority
Non maskable interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
Hard fault interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
Memory management fault	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
Prefetch fault, memory access fault	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
Undefined instruction or illegal state	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
System service call via SWI instruction	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
Debug monitor	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
Pendable request for system service	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
Time base: System tick timer	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
PVD interrupt through EXTI line 16	<input type="checkbox"/>	0	0
Flash global interrupt	<input type="checkbox"/>	0	0
RCC global interrupt	<input type="checkbox"/>	0	0
DMA1 channel1 global interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
ADC1 and ADC2 global interrupts	<input type="checkbox"/>	0	0
USB high priority or CAN TX interrupts	<input type="checkbox"/>	0	0
USB low priority or CAN RX0 interrupts	<input checked="" type="checkbox"/>	2	0
CAN RX1 interrupt	<input type="checkbox"/>	0	0
CAN SCE interrupt	<input type="checkbox"/>	0	0
EXTI line[9:5] interrupts	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
TIM4 global interrupt	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0
I2C1 event interrupt	<input type="checkbox"/>	0	0
I2C1 error interrupt	<input type="checkbox"/>	0	0

KUVIO 20. Keskeytysten määrittely

Kuviossa 20 sinisillä valintamerkeillä aktivoidut keskeytykset. Valintamerkkien oikealla puolella on määritelty keskeytysten prioriteetti, jossa pienin luku vastaa korkeinta. Korkein prioriteetti on asetettu ulkoisille keskeytysignaaleille, joista toinen on kennomonitorin ALERT-signaali. Seuraavana prioriteettijonossa on ajastinkeskeytykset, joka ajoittaa mikrokontrollerin toimintoja. Pienimmällä prioriteetilla on CAN-väylän vastaanottokeskeytykset.

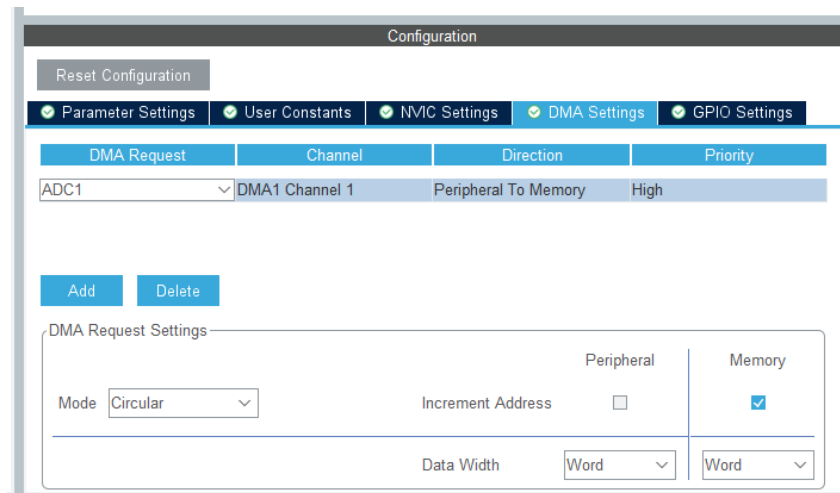
Seuraavaksi määriteltiin A/D-muunnin. Akunhallintajärjestelmässä on kaksi analogisisäänmenoa, jotka ovat järjestelmän ulostulojännite sekä lämpöantureiden analogi multiplekserin ulostulo. Lisäksi sisäisenä analogisisäänmenona mitataan mikrokontrollerin lämpötilaa. Kuviossa 21 A/D-muuntimen määrittely.



KUVIO 21. A/D muuntimen määrittely

Kuviossa 21 kanaville määritellyt "Sampling time" parametrit määrittävät kuinka monen kello syklin välein A/D-muunnos tehdään. Channel 2 mittaa lämpöantureita ja sille on määritelty nopein muunnos. Channel 3 mittaa akunhallintajärjestelmän ulostulon jännitettä.

A/D-muunnokset tallennetaan suoraan muistiin DMA:ta käyttämällä. DMA:n avulla säästetään mikrokontrollerin laskennallista kuormitusta (STM32 ADC single channel n.d). Kuviossa 22 DMA:n määrittely.



KUVIO 22. DMA määrittely

DMA otettiin koodissa käyttöön luomalla A/D-muunnoksille taulukko, johon tulokset tallennetaan (kuvio 23).

```

52
53 uint32_t ADC_Buffer[3] = {0};
54

```

KUVIO 23. DMA:n taulukko

Taulukon määrittelyn jälkeen DMA otettiin käyttöön kutsumalla kuviossa 24 olevaa HAL-ajureiden aliohjelmaa.

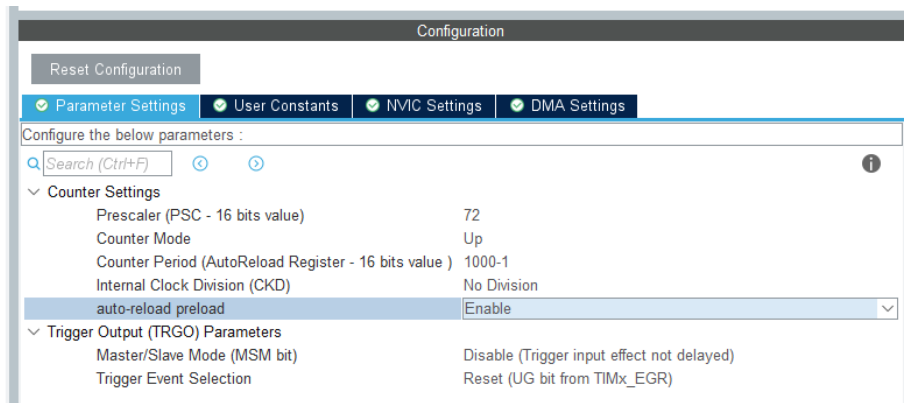
```

108
109 HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, ADC_Buffer, 3);
110

```

KUVIO 24. DMA käynnistys

Seuraavaksi määriteltiin ajastinkeskeytykset, joka suoritetaan millisekunnin välein (kuvio 25).



### KUVIO 25. Ajastinkeskeytyksen määrittely

Kuviossa 25 näkyvät parametrit "prescaler" ja "counter period" määrittävät, kuinka usein keskeytys tapahtuu. Kellotaajuuden ollessa 72 MHz ja prescalerin ollessa 72 lasketaan vaadittava counter period (CP) kaavalla 6

$$CP = \frac{f_{clk}}{PSC \cdot f_{int}} - 1, \quad 6$$

jossa  $f_{clk}$  on kellotaajuus,  $PSC$  on prescaler ja  $f_{int}$  on haluttu keskeytyksen taajuus (Timer Interrupts Explained with Examples n.d).

Sijoitetaan arvot kaavaan 6.

$$CP = \frac{72 \text{ MHz}}{72 \cdot 1000 \text{ Hz}} - 1 = 999$$

Ajastinkeskeytykset kytkettiin päälle kutsumalla kuviossa 26 olevaa HAL-ajureiden aliohjelmia.

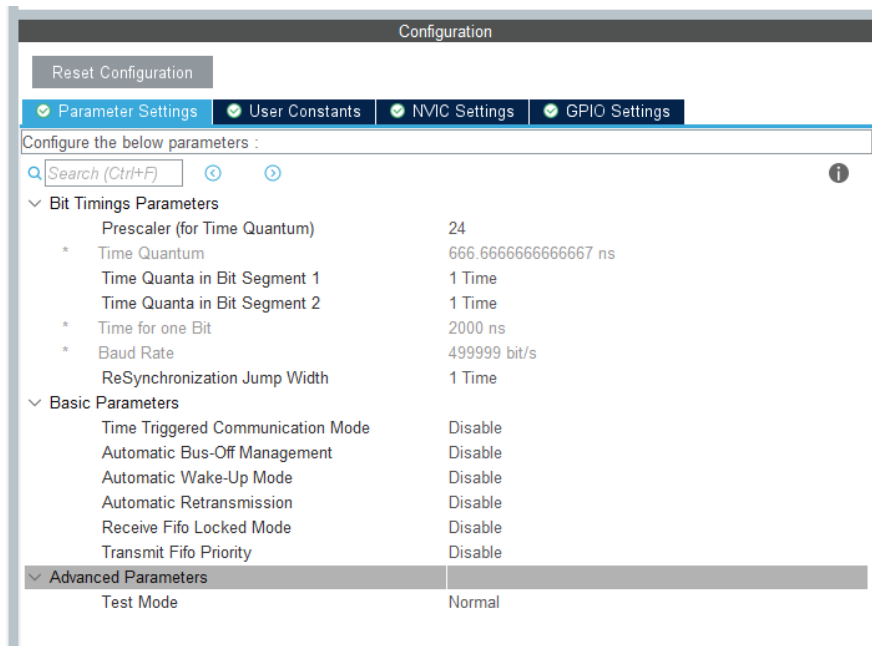
```

110 |
111 | HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim4);
112 |

```

### KUVIO 26. Ajastinkeskeytyksen käynnistys

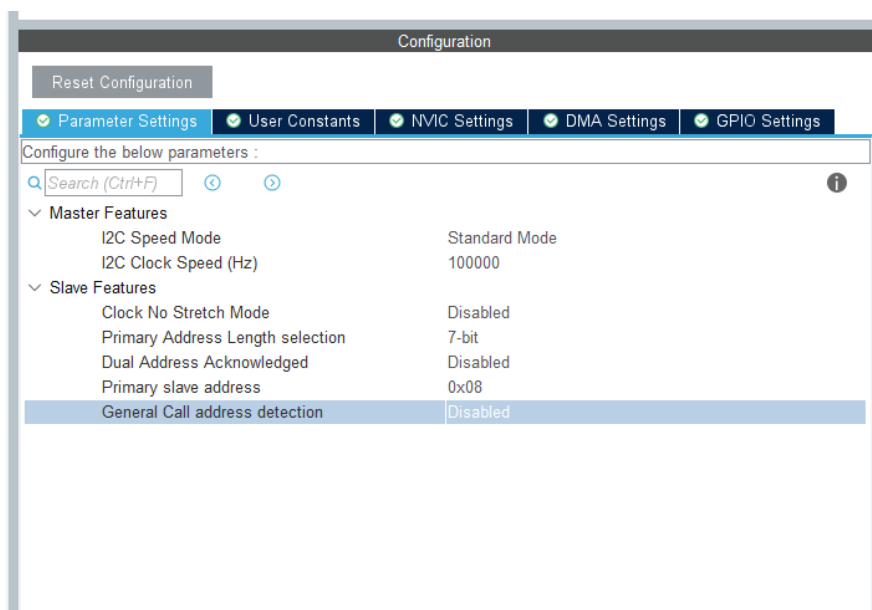
Seuraavaksi määriteltiin kommunikaatioväylät, jotka ovat I2C- sekä CAN-väylä. Kuviossa 27 CAN-väylän määrittely.



KUVIO 27. CAN-väylän määrittely

Kuviossa 27 olevalla "prescaler" parametrilla määriteltiin CAN-väylän nopeus, joka tässä tapauksessa on 500 000 bit/s.

Lopuksi määriteltiin I2C-väylä, jonka määrittely on kuviossa 28.

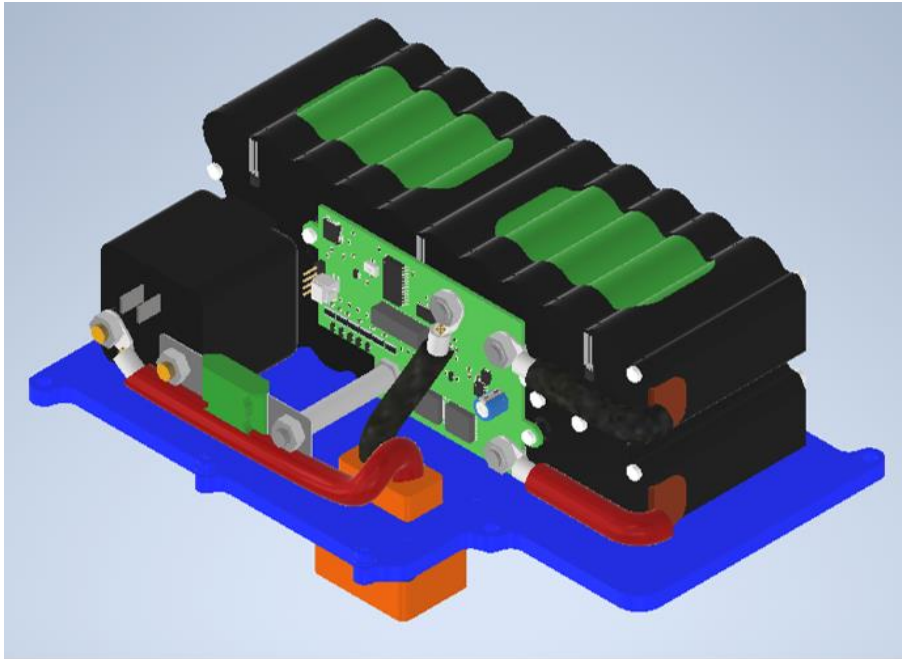


KUVIO 28. I2C-väylän määrittely

I2C-väylän nopeudeksi asetettiin kennomonitorin datalehden mukaisesti 100 kHz ja "slave address" parametriksi asetettiin kennomonitorin I2C osoite (Texas Instruments 2022, 3, 25).

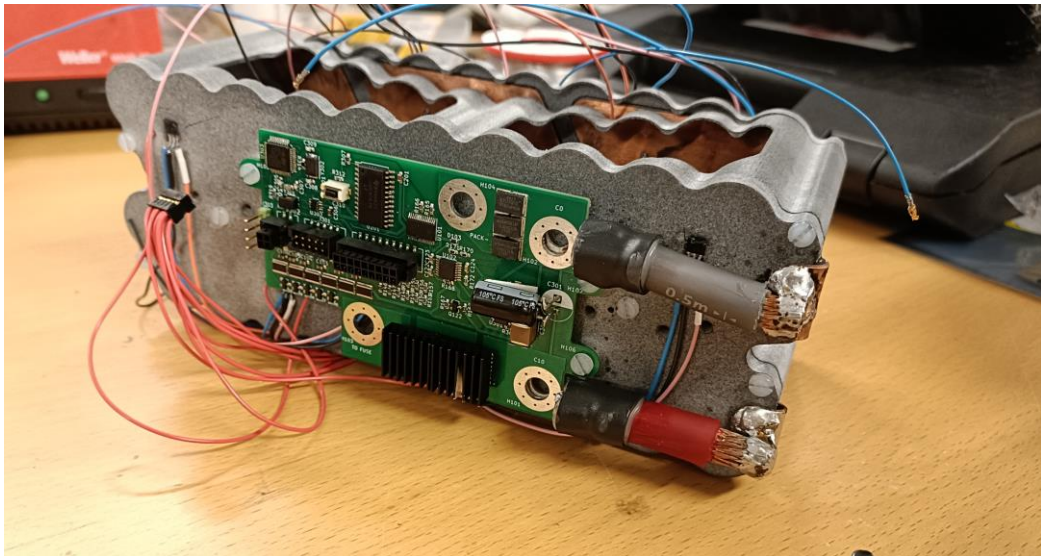
### 4.3 Integrointi hybridijärjestelmään

Akunhallintajärjestelmä integroitiin hybridijärjestelmään sääntövaatimusten mukaisesti akkupaketin kotelon sisään (Hybrid Rules 2022). Piirilevy kiinnitettiin akkupakettiin kuvion 29 mukaisesti.



KUVIO 29. Akunhallintajärjestelmä akkupaketissa

Kuviosta 29 nähdään, kuinka akunhallintajärjestelmä integroituu osaksi akkupakettia ja sen muita osia. Akkupaketin kotelo muodostuu kuviossa 29 näkyvästä sinisellä korostetusta alumiinipohjasta sekä hiilikuitukotelosta, joka ei ole näkyvässä kuviossa 29. Akkupaketin purkuvirta kulkee akkukennoilta tulevaa punaista johdinta pitkin purku- ja lataustransistorien lävitse sulakkeeseen, josta edelleen sääntöjen vaatiman releen kautta liittimeen (Hybrid Rules 2022). Paluuvirta kulkee liittimeltä mustaa kaapelia pitkin virranmittausvastusten lävitse takaisin akkukennoihin. Ladatessa sähkövirran suunta on päinvastainen. Kuvassa 8 akunhallintajärjestelmä kiinnitetty akkukennojen koteloon.



KUVA 8. Akunhallintajärjestelmä kiinnitettynä akkukennokoteloon

Kuvasta 8 nähdään, että purku- ja lataustransistorien jäähdytysalueiden rivit ovat pystysuunnassa, joka tukee jäähdytysilman luonnollista virtausta. Akkukennoilta tulevat kaapelit liitetään akunhallintajärjestelmään M6 pulteilla ja mutteilla.

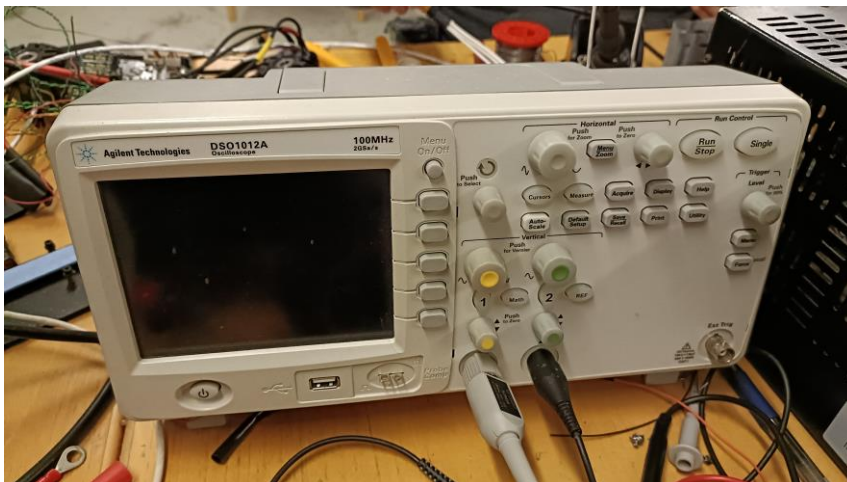
## 5 TESTAUS

Hybridijärjestelmän muiden komponenttien saatavuuksien sekä valmistuksen viivästyksien seurauksena akunhallintajärjestelmälle ei voitu suorittaa täysiä toiminnallisia testejä. Järjestelmästä voitiin testata ainoastaan elektroniikan toiminta perustoiminta.

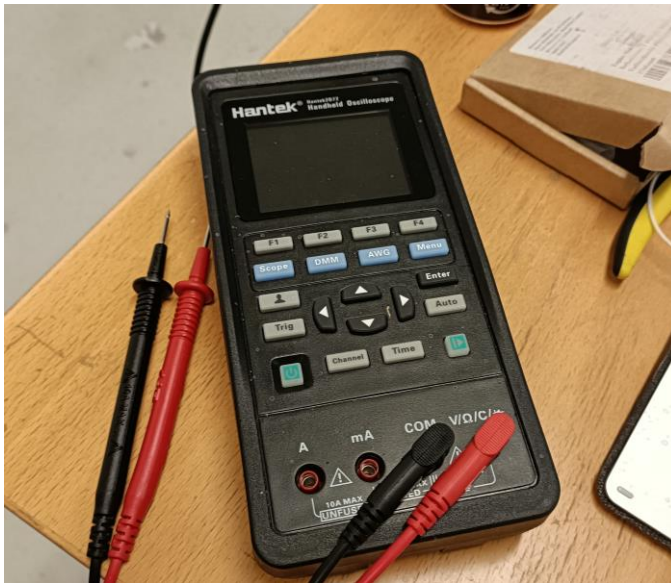
Järjestelmän testaukseen käytettävät mittalaitteet olivat RND 320-KA3005P laboratorioteholähde (kuva 9), Agilent DSO1012A oskilloskooppi (kuva 10) sekä Hantek 2D72 yleismittari (kuva 11).



KUVA 9. Laboratorioteholähde



KUVA 10. Oskilloskooppi



KUVA 11. Yleismittari

## 5.1 Testaustoimet

Akunhallintajärjestelmästä testattiin piirilevyn elektronikan perustoiminnot, jotta hybridijärjestelmän valmistuessa lopullisesti, voidaan akunhallintajärjestelmän elektronikan toimintaan luottaa.

Testaus toteutettiin testaussuunnitelman mukaisesti, jossa määritellään mitattavat kohteet sekä halutut tulokset ja niiden virhemarginaalit. Testaussuunnitelma on kuviossa 30.

	A	B	C	D	E
1	Tampere Formula Student				
2	Hybridivoimansiirto				
3					
4	Akunhallintajärjestelmän testaussuunnitelma				
5					
6	Tämä testaussuunnitelma on tarkoitettu Tampere Formula Student -tiin				
7	hybridivoimansiirron akunhallintajärjestelmän elektronikan testaukseen.				
8					
9	Testaussuunnitelma kuvailee järjestelmästä testattavat kohteet.				
10	sekä halutut mittaustulokset ja virhemarginaalit				
11					
12	Testien tekemiseen tarvittavat mittalaitteet ovat:				
13	-Laboratorioteholähde				
14	-Yleismittari				
15	-Oskilloskooppi				
16					
17	Mittauskohde	Mittaustulos	Haluttu mittaustulos	Ero	Sallittu ero
18	C0 - C10 resistanssi	> 1 MΩ	> 10 kΩ	-	-
19	3,3 V jännitetaso	3,23 V	3,3 V	0,07 V	10 mV
20	Hakkurin ulostulo	3,34 V	3,3 V	0,04 V	10 mV
21	Hakkurin rippeli	20 mV pp	> 50 mV pp	-30 mV	+50 mV
22	8 MHz kidetaajuus	8,00 MHz	8,00 MHz	0	400 Hz

KUVIO 30. Testaussuunnitelma ja tulokset

Kuviossa 30 akunhallintajärjestelmän elektroniikan testaussuunnitelma, jossa esiteltynä mittauskohteet ja tulokset. Lisäksi mittauksille on halutut mittaustulokset virhemarginaaleineen. Jännitteiden mittaamiseksi akunhallintajärjestelmän akkukennojen lenkkiliitinreikiin kiinnitettiin laboratorioteholähde, josta järjestelmään syötettiin 31 V.

## 5.2 Testitulokset

Kuviossa 30 olevassa taulukossa, sarakkeessa ”mittaustulos”, on akunhallintajärjestelmästä mitattujen kohteiden mittaustulokset. Mittaustuloksilla varmistettiin, että akunhallintajärjestelmän käyttöjännitteen syöttö ei ole oikosulussa sekä käyttöjännitetasot ovat oikeelliset. Lisäksi hakkurijännitelähteestä mitattiin rippeijännite, ja mikrokontrollerin 8 MHz:n kiteen taajuus varmistettiin, oskilloskoopilla.

Testitulosten perusteella muun järjestelmän, kuten akkukennopakedin, valmistuksessa voidaan se kytkeä turvallisesti akunhallintajärjestelmään. Lopullisen järjestelmän kokoamisen jälkeen suoritetaan mittaussuunnitelman mittaukset uudelleen.

## 6 POHDINTA

Työssä toteutettu akunhallintajärjestelmä täytti suunnittelun osalta järjestelmälle asetetut vaatimukset, mutta hybridijärjestelmän valmistuksen viivästymisen seurauksena käytännössä asiasta ei ole täyttä varmuutta. Mikäli järjestelmä toimii käytännössä osana hybridijärjestelmää, voi Tampere Formula Student -tiimi käyttää kyseistä akunhallintajärjestelmää tulevissa hybridijärjestelmän versioissa. Työssä toteutettu akunhallintajärjestelmä on ensimmäinen kehitysversio, jonka pohjalta voidaan kehittää uusia kehitysversioita.

Akunhallintajärjestelmän suunnitteluun ja komponenttivalintoihin vaikutti voimakkaasti maailmanlaajuinen komponenttien saatavuuspula. Tämä johti siihen, että järjestelmää suunnitellessa joutui useaan kertaan vaihtamaan komponentteja, mikä hidasti prosessia huomattavasti. Lisäksi suunnittelussa tuli ottaa huomioon valmistusprosessin rajalliset kyvyt. Valmistusprosessi oli kompromissi kulujen ja kykyjen välillä, jonka seurauksena järjestelmän komponentteja valitessa tuli huomioida niiden koko, jotta ne voitiin juottaa käsin. Suuremmat komponentit vaativat enemmän tilaa, joten piirilevyn koko ja paino kasvavat, mikä kyseisessä sovelluksessa oli erittäin ei-toivottua.

Akunhallintajärjestelmän piirilevysuunnittelussa pyrittiin huomioimaan sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttamat ongelmat, mutta piirilevyn ollessa ei-kauppallinen, ei järjestelmälle päätetty tehdä EMC-testejä. Mikäli järjestelmän havaitaan aiheuttavan häiriötä muihin ajoneuvossa oleviin sähkölaitteisiin, on piirilevystä suunniteltava uusi versio.

Kokonaisuutena työssä esiteltiin sulautetun järjestelmän suunnittelu ja toteutus, joka painottui elektroniikka- ja piirilevysuunnitteluun. Työn sisältöä voi lisäksi hyödyntää yleisesti sulautettujen järjestelmien suunnittelussa. Työssä käytettiin useita lähteitä, joista lukija voi halutessaan etsiä lisätietoa käsitellyistä aiheista.

## LÄHTEET

Case, D. 1996. Formula SAE - Competition History 1981 – 1996. Luettu 17.3.2022. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/962509/>

Concept n.d. Formula Student Germany. Luettu 18.3.2022 <https://www.formula-student.de/about/concept/>

Spot the difference: Lithium ion versus lead acid battery electric technology. 2019. Cummins. Luettu 21.3.2022 <https://www.cummins.com/news/2019/06/17/spot-difference-lithium-ion-versus-lead-acid-battery-electric-technology>

InnoBlog: Why do we need Battery Management Systems? 2020. InnoEnergy. Luettu 2.5.2022 <https://www.innoenergy.com/for-students-learners/news-events/innoblog-why-do-we-need-battery-management-systems/>

Battery Management System. 2009. ScienceDirect. Luettu 10.5.2022 <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/battery-management-system>

10s4p wiring help. 2017. Electric skateboard builders. Luettu 12.5.2022 <https://electric-skateboard.builders/c/esk8-news-forum/33>

Product Specifications. 2015. Sony Energy Devices Corporation. Luettu 12.5.2022 <https://enerpower.de/wp/wp-content/uploads/2016/10/Specification-US18650VTC6.pdf>

FS CV Hybrid Rules 2022. 2022. Luettu 31.5.2022 [https://fseast.eu/wp-content/uploads/2021/09/FS\\_2021\\_CV\\_Hybrid\\_Rules\\_Extension\\_A4\\_v1.pdf](https://fseast.eu/wp-content/uploads/2021/09/FS_2021_CV_Hybrid_Rules_Extension_A4_v1.pdf)

BQ769x0 3-Series to 15-Series Cell Battery Monitor Family for Li-ion and Phosphate Applications. 2022. Texas Instruments. Luettu 31.5.2022 <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76930.pdf>

MOSFET - Power, Single N-Channel, TOLL 60 V, 0.75 mΩ, 470 A. 2019. On-semi. Luettu 31.5.2022 <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nvbls0d7n06c-d.pdf>

bq76200 high-voltage battery pack front-end charge/discharge high-side NFET driver. 2019. Texas Instruments. Luettu 31.5.2022 [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76200.pdf?ts=1653945113480&ref\\_url=https%253A%252F%252Fkaimte.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76200.pdf?ts=1653945113480&ref_url=https%253A%252F%252Fkaimte.com%252F)

Medium-density performance line Arm®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces. 2022. STMicroelectronics. Luettu 31.5.2022 <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>

LMT85 1.8-V, SC70/TO-92/TO-92S, Analog Temperature Sensors. 2017. Texas Instruments. Luettu 31.5.2022 [LMT85 1.8-V, SC70/TO-92/TO-92S, Analog Temperature Sensors datasheet \(Rev. E\) \(ti.com\)](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmt85.pdf)

High-Speed CMOS Logic 16-Channel Analog Multiplexer/Demultiplexer. 2003. Texas Instruments. Luettu 31.5.2022 <https://www.ti.com/lit/ds/sym-link/cd74hc4067.pdf>

Si2302DS N-Channel 1.25-W, 2.5-V MOSFET. 1997. Vishay. Luettu 5.6.2022 <https://www.vishay.com/docs/70628/70628.pdf>

WSHP2818 Power Metal Strip® Resistors, High Power (10 W), Low Value (Down to 0.001  $\Omega$ ), Surface-Mount. 2021. Vishay. Luettu 5.6.2022 [https://www.mouser.fi/datasheet/2/427/VISH\\_S\\_A0012362811\\_1-2572568.pdf](https://www.mouser.fi/datasheet/2/427/VISH_S_A0012362811_1-2572568.pdf)

Zener Voltage Regulators 500 mW SOD-523, Standard Tolerance Series. 2020. ON Semiconductor. Luettu 5.6.2022 [https://www.mouser.fi/datasheet/2/308/1/MM5Z2V4T1\\_D-2316295.pdf](https://www.mouser.fi/datasheet/2/308/1/MM5Z2V4T1_D-2316295.pdf)

D/CRCW e3 Standard Thick Film Chip Resistors. 2021. Vishay. Luettu 6.6.2022 <https://www.mouser.fi/datasheet/2/427/dcrcwe3-1762152.pdf>

MAX5035 1A, 76V, High-Efficiency MAXPower Step-Down DC-DC Converter. 2011. Maxim Integrated. Luettu 6.6.2022 <https://www.mouser.fi/datasheet/2/256/MAX5035-1292673.pdf>

Inductors in EMC - Part 3: Common-mode noise filtering. 2020. Academy of EMC. Luettu 6.6.2022 <https://www.academyofemc.com/post/inductors-in-emc-part-3-common-mode-noise-filtering>

Designing for Effective CAN Bus Communication. n.d. Tempo Automation. Luettu 8.6.2022 <https://www.tempoautomation.com/blog/designing-for-effective-can-bus-communication/>

2 OZ Copper PCB. n.d. Rayming Pcb&Assembly. Luettu 8.6.2022 <https://www.raypcb.com/2-oz-copper-pcb/>

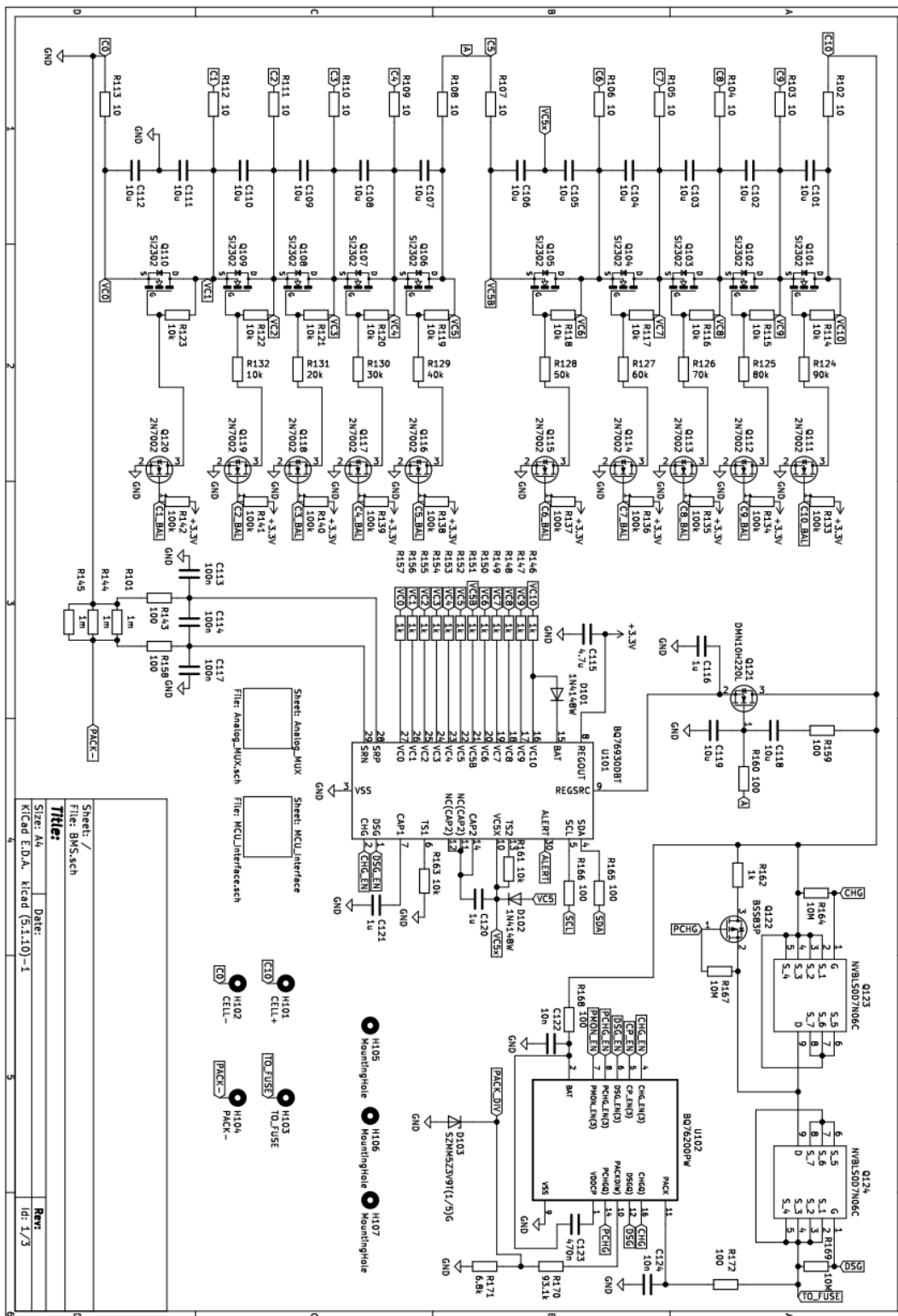
STM32 ADC single channel. n.d. Controllers Tech. Luettu 9.6.2022 <https://controllerstech.com/stm32-adc-single-channel/>

Timer Interrupts Explained with Examples. n.d. Visual Micro. Luettu 9.6.2022 <https://www.visualmicro.com/page/Timer-Interrupts-Explained.aspx>

LIITTEET

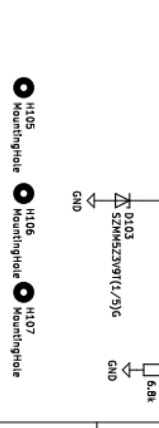
Liite 1. Piirikaavio

1(3)



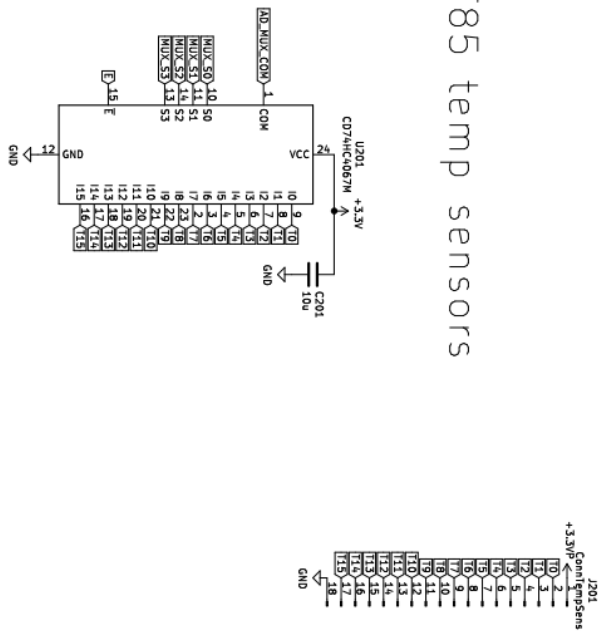
Sheet: /	File: BMS.sch
Sheet: 1A	Date:
Sheet: E.D.A. Kiead (31.10)-1	Rev:
	Id: 1/3

- Sheet: Analog\_MUX
- Sheet: MCU\_Interface
- Sheet: MCU\_Interface.sch
- Sheet: NCU\_Interface.sch



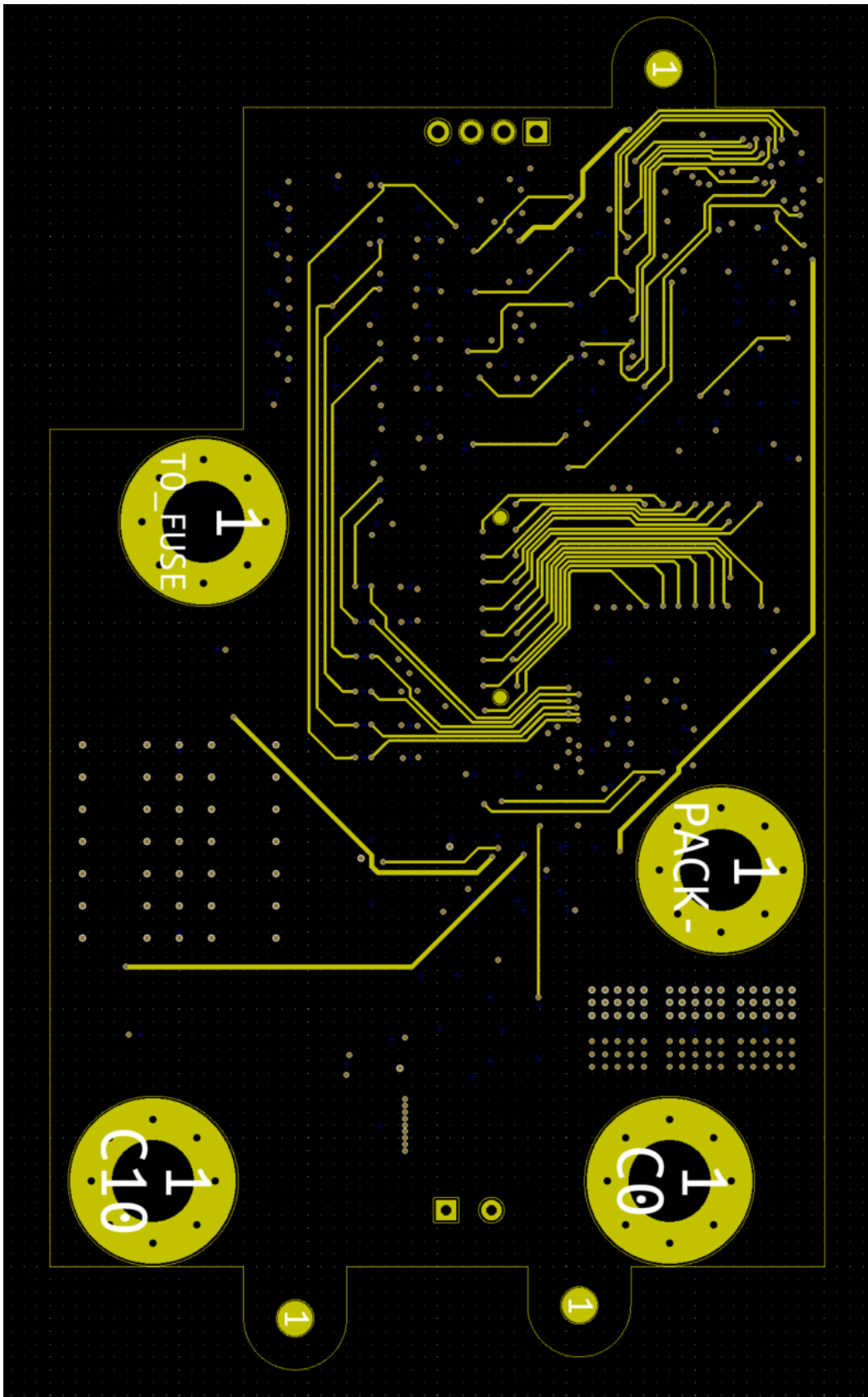


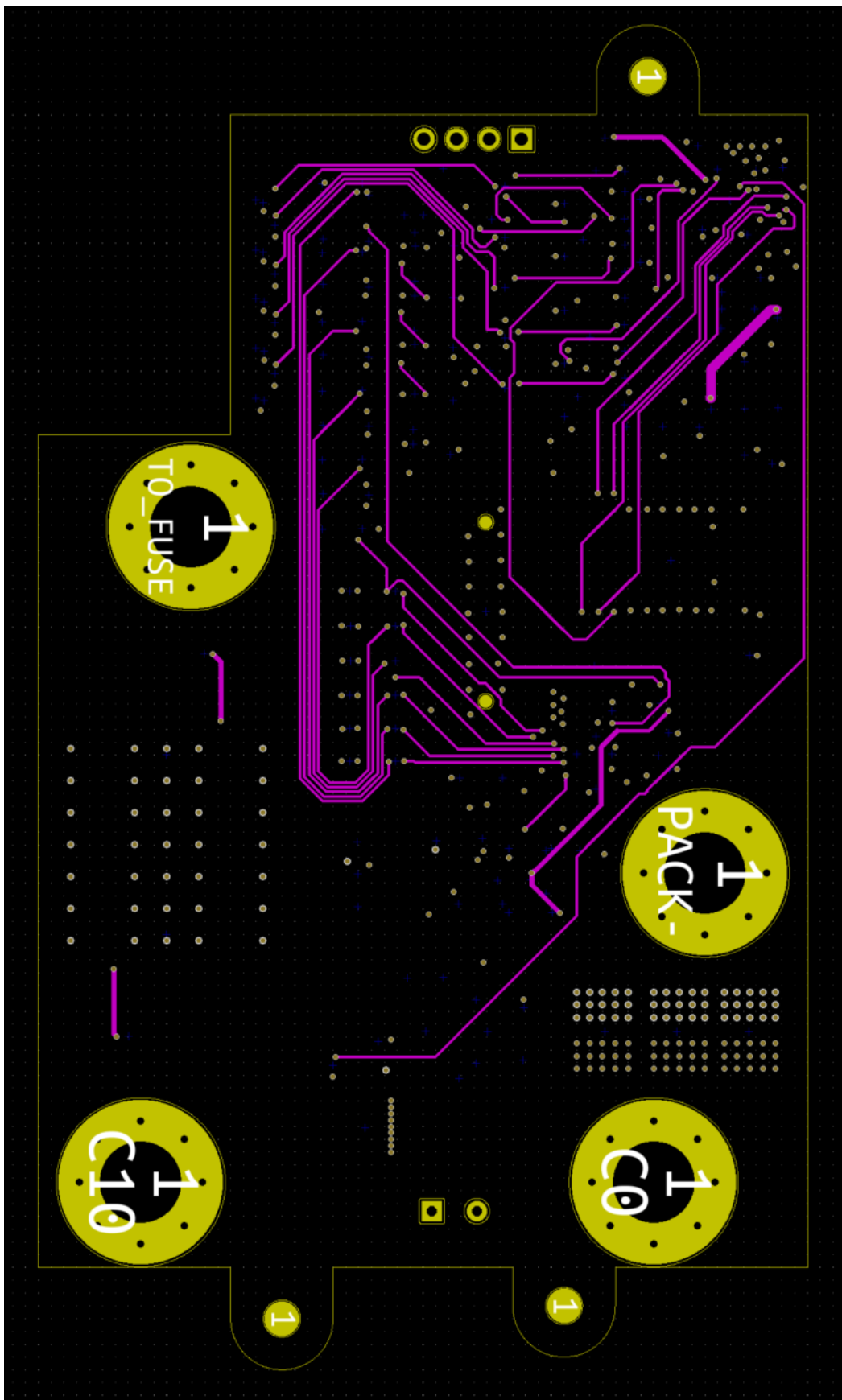
# LMT85 temp sensors



Sheet: /Analog_MUX/	
File: Analog_MUX.sch	
<b>Title:</b>	
Size: A4	Date:
Klčová E.U.A. Níklad (3.1.10) - 1	
Rev:	Rev:
Id: Z/3	







4(4)

