

Kalle Hellgren

Sähkömoottoripyörämuunnos Akku ja akunhallintajärjestelmä

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)
Sähkö- ja automaatiotekniikka

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Kalle Hellgren
Työn nimi	Sähkömoottoripyörämuunnos- Akku ja akunhallintajärjestelmä
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu
Vuosi	2022
Sivut	39+5 sivua
Työn ohjaaja(t)	Teemu Manninen

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyö on osa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun sähkömoottoripyörämuunnosprojektia, jossa polttomoottorikäyttöinen moottoripyörä muunnetaan täyssähköiseksi. Tarkoituksena oli rakentaa tieliikennekelpoinen sekä suorituskykyinen sähkömoottoripyörä. Tämä osuus keskittyy akun rakentamiseen ja akunhallintajärjestelmään. Tavoitteina oli pitää akusto mahdollisimman kevyenä sekä sähkökapasiteetiltaan ja purkuvirraltaan riittävänä. Jotta sähkömoottoripyörä pysyisi mahdollisimman kevyenä, oli akustoon saatava mahdollisimman paljon energiaa painoa kasvattamatta. Myös akuston purkuvirta tulee olla riittävä suorituskyvyn kannalta. Akuston rakentamiseen vaikuttaa moottoripyörän runko, joka toimii akuston kokoa rajoittavana raamina.

Useista markkinoilla olevista akunhallintajärjestelmistä puuttuu parametrejä, joiden säädöillä voi vaikuttaa sähkömoottoripyörän suoritustehoon, tästä syystä tavoitteena oli rakentaa akunhallintajärjestelmä alusta alkaen itse. Akunhallintajärjestelmän rakennus aloitettiin prototyypin valmistamisesta. Rakennetusta akunhallintajärjestelmästä suunniteltiin hajautettu akunhallinta, jossa jokaista valvottavaa akkua kohden on yksi mikrokontrolleriyksikkö, joka keskustelee pääyksikön kanssa. Tiedonsiirtoon käytettiin I2C-tiedonsiirtoväylää. Prototyypilevyjä valmistettiin muutamia kappaleita piirilevyjyrsimellä, ja pääyksikkönä toimi Arduino-mikrokontrolleri.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi akusto, akunhallintajärjestelmä sekä akukotelo sähkömoottoripyörään. Akunhallintajärjestelmästä tehtiin myös oma versio, josta tehtiin prototyyppi. Käyttöön omatekoista akunhallintajärjestelmää ei kuitenkaan otettu. Sähkömoottoripyörä katsastettiin, ja se on tieliikennekelpoinen.

Asiasanat: Sähkömoottoripyörä, Akku, Akunhallintajärjestelmä, litiumioniakku

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Kalle Hellgren
Thesis title	Electric motorcycle conversion- Battery and battery management system
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2022
Pages	39+5 pages,
Supervisor	Teemu Manninen

ABSTRACT

This thesis is a part of the South-Eastern Finland University of Applied Sciences' electric motorcycle conversion project, in which a motorcycle powered by a combustion engine is converted to be fully electric. The intention was to build a high-performance and road traffic approved electric motorcycle. This thesis focuses on battery construction and the battery management system (BMS). The goals were to keep the battery as light as possible with sufficient electrical capacity. In order to keep the electric motorcycle as light as possible, the battery needed to get as much energy as possible without gaining weight. Therefore, the battery had to be energy dense. The battery discharge current must also be voluminous for performance. The structure of the battery is affected by the frame of the motorcycle, which limits the size of the battery.

Many battery management systems on the market lack parameters that can be adjusted to affect the performance of an electric motorcycle. The intention was to build a battery management system from scratch. The construction of the battery management system began with the production of a PCB prototype. The battery management system was designed to be decentralized. Each battery has one microcontroller that communicates with the main unit. The I2C communication bus was used for data transmission. A few prototype boards were made with a circuit board cutter. The main unit of the battery management system was the Arduino microcontroller.

The result of the thesis was a battery, a battery management system and a battery case for an electric motorcycle. A separate prototype of the battery management system was also made. However, a decentralized battery management system was not introduced. The electric motorcycle has been inspected and approved for road use.

Keywords: electric motorcycle, battery, battery management system, lithium-ion battery

SISÄLLYS

LYHENTEET.....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 AKKU.....	8
2.1 18650 litiumioniakku	10
2.1.1 Nimellisjännite (Nominal Voltage).....	11
2.1.2 Ominaisenergia ja energiatiheys (Specific Energy and energy density)	11
2.1.3 Kapasiteetin hyötysuhde ja energiatehokkuus (Capacity Efficiency and Energy Efficiency).....	11
2.1.4 Ominaiseteho ja tehotiheys (Specific Power and Power Density).....	12
2.1.5 Itsepurkautuminen (Self-discharge).....	13
2.1.6 Käyttöikä (Cycle life).....	13
2.1.7 Käyttölämpötila (Operating temperature).....	13
2.1.8 Sisäinen resistanssi	15
2.1.9 Maksimi- ja minimijännite.....	16
2.2 Akusto.....	17
2.2.1 Akkukennoston jännitteen määrittäminen	18
2.2.2 Akkukennoston kapasiteetin määrittäminen.....	18
2.2.3 Akkukennosto	19
2.3 Akkukotelo.....	21
2.4 Sisäiset kytkennät ja rakenne	23
2.5 Akkujen hitsaus.....	25
3 AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄ	27
3.1 Orion BMS 2	28
3.1.1 Cell balancing	31
3.1.2 State of Health	32
3.1.3 Lämpötilavalvonta.....	32
3.1.4 Johdotus	32

3.1.5	Käyttöönotto.....	33
4	LATAUS.....	36
5	OMATEKOINEN AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄ.....	37
6	TULOKSET.....	39
7	POHDINTA.....	41
	LÄHTEET.....	43

LYHENTEET

BMS	Battery Management System
CC	Constant Current
CC-CV	Constant Current Constant Voltage
CAD	Computer Aided Design
CAN	Controller Area Network
DOD	Depth Of Discharge
OCV	Open Circuit Voltage
SOC	State Of Charge
SOH	State Of Health
SOP	State Of Power

1 JOHDANTO

Nykyaikana liikenneteollisuudella on suuret paineet etsiä vaihtoehtoisia energiamuotoja korvaamaan polttomoottorikäyttöiset ajoneuvot. Ilmastonmuutoksen aiheuttama tarve kehittää muita tekniikoita on kiihdyttänyt sähköajoneuvojen yleistymistä. Tämä on vaikuttanut myös Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun sähkö- ja automaatiotekniikan kiinnostukseen sähköajoneuvojen kehittämisestä. Opinnäytetyö on osa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun sähkömoottoripyörämuunnosprojektia. Projektissa muunnetaan -98 vuosimallin 600-kuutioinen Suzuki Bandit -moottoripyörä täyssähköiseksi. Projekti on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun rahoittama, ja sähkömoottoripyörä tulee jäämään korkeakoulun opetus- sekä markkinointikäyttöön. Sähkömuunnos käytännössä tarkoittaa polttomoottorin korvaamista sähkömoottorilla ja polttoainejärjestelmien vaihtamista akustoon.

Opinnäytetyö rajautuu akustoon sekä akunhallintajärjestelmään. Sähkömoottoripyörään tulevia muita laitteita ovat sähkömoottori, moottorinohjain, laturi, käyttäjäpaneeli, Raspberry pi 3 sekä Arduino Uno. Raspberry pi -mikrokontrolleri tulee toimimaan sähkömoottoripyörän keskustietokoneena. Se saa tiedot CAN-väylän välityksellä Arduinolta, moottorinohjaimelta, laturilta sekä akunhallintajärjestelmältä. Moottori on AC20 -induktiomoottori, joka operoi jännitevälillä 72–130 volttia. Moottorinohjain on Curtis 1238E-7622, joka muuttaa akustolta tulevan tasajännitteen kolmivaiheiseksi ja syöttää sen eteenpäin moottorille. Moottorin sekä moottorinohjaimen maksimivirta on 650 ampeeria.

Akuston suunnittelu alkoi akkutyypin valinnasta. Ensimmäisenä kartoitettiin akustolta vaaditut kriteerit, joita olivat paino, purkuvirta ja jännite. Akku päätettiin rakentaa litiumioniakkuja käyttäen. Litiumioniakkuja käytetään yleisesti sähköajoneuvoissa niiden suuren energiatiheyden, korkean ominaisjännitteen sekä suuren kapasiteetin vuoksi. Litiumioniakkujen kohdalla vaihtoehtoja oli kaksi, litiumpolymeeriakku tai litiumioniakku. Molemmat näistä ovat litiumioniakkuja, mutta erona on, että polymeeriakussa orgaaninen elektrolyytti on korvattu polymeerisellä. Litiumioniakut ovat myös huoltovapaita, sekä niiden

käyttöikä on pitkä. Litiumpolymeeriakkua ja litiumioniakkua verrattaessa valinta kohdistui litiumioniakkuun, sillä sen käyttöikä on jopa kaksi kertaa pidempi kuin litiumpolymeeriakuissa ja näin ollen sopii paremmin sähköajoneuvoihin. Tämän kartoituksen jälkeen akkuvalmistaja valikoitiin taulukkolaskentaa käyttämällä. Akusto koostuu viidestä eri lohkoista, joissa kaikissa on eri jännitetaso. Nämä lohkot kytkettiin sarjaan, jolloin niiden jännitteet lasketaan yhteen ja yhteenlaskettu tulo on akuston kokonaisjännite. Rinnan kytkettyjä akkuja jokaisessa lohkoissa on 28 kappaletta. Rinnankytkettäessä akkuja akuston kokonaiskapasiteetti ja maksimipurkuvirta kasvaa.

Opinnäytetyössä käydään läpi akunhallintajärjestelmän periaatteita ja syyt, miksi se on oleellinen laite litiumioniakkuja käytettäessä. Lisäksi käydään läpi pääpiirteittäin Orion BMS 2 -akunhallintajärjestelmän käyttöönotto. Käyttöönotossa konfiguroidaan käytetyt laitteet sekä akuston rinnan- ja sarjaan kytkettyjen akkusolujen määrä. Lisäksi akunhallintajärjestelmään liittyen käydään läpi tärkeimpien osa-alueiden termistöä.

Akunhallintajärjestelmästä suunniteltiin myös omavalmisteinen prototyyppi, jolla pystytään valvomaan jokaista sarjaan kytkettyä akkua erikseen. Suunnitellussa akunhallintajärjestelmässä Arduino Uno -mikrokontrolleri toimii master-laitteena ja jokaiselle sarjaan kytketylle akulle tuli oma slave-laite, jona toimi Attiny45-mikrokontrolleri. Suunniteltu akunhallintajärjestelmä ei kuitenkaan tullut käyttöön.

2 AKKU

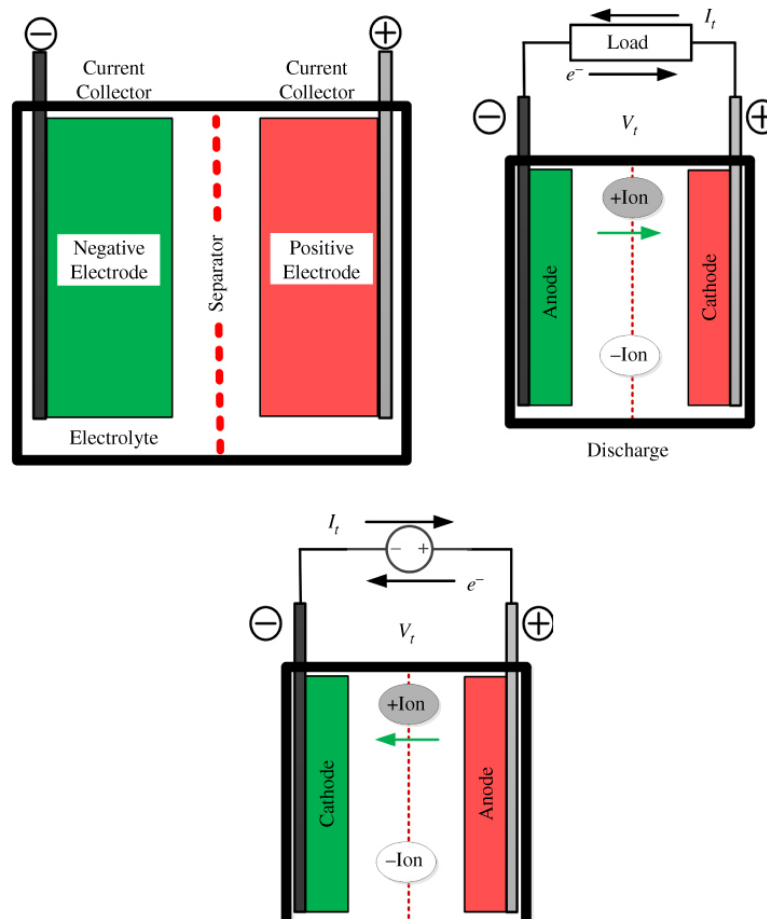
Puhuttaessa akuista puhutaan elektrokemiallisesta energiavarastosta, joihin on varastoituna kemiallista energiaa. Kemiallinen energia muuttuu sähköenergiaksi akun purkautuessa ja päinvastoin sähköenergiasta kemialliseksi energiaksi akkua ladattaessa. Akkujen toiminta perustuu yleisesti metallien sähkökemialliseen jännitteeseen, jossa epäjaloimman ja jaloimman metallin välille muodostuu sähköpari. Elektrolyytissä oleva epäjalompi metalli reagoi jalompaa metallia voimakkaammin, eli se luovuttaa enemmän elektrodeja, toisinaan toimii hapettimena. Jalompi vastaanottaa elektrodit eli toimii pelkistimenä. Akun negatiivista napaa kutsutaan anodiksi ja positiivista katodiksi.

Anodi luovuttaa elektrodeja ja katodi vastaanottaa. Reaktiivisuus vähenee koko ajan, kun liikutaan epäjaloista jaloihin metalleihin. / 19./ Taulukossa (1) on jaoteltuina epäjalot ja jalot metallit. Jakajana näiden välillä on vety, jota muodostuu esimerkiksi lyijyakkujen hapettumis- ja pelkistymisreaktioissa.

Taulukko 1 jalousjärjestys eli jännitesarja /12, s.197/

Epäjalot metallit										Jalot metallit				
Li	K	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Fe	Ni	Pb	H	Cu	Ag	Pt	Au
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+0,3	+0,8	+1,4	+1,5
3,05	2,93	2,87	2,71	2,37	1,66	0,76	0,44	0,25	0,13	0	4 v	v	6 v	v
v	v	v	v	v	v	v	v	v	v					

Kuvassa 1 on kaavio litiumioniakkukennosta. Kenno koostuu negatiivisesta sekä positiivisesta elektrodista, elektrolyytistä, erottimesta sekä akun navoista. Erotin estää elektronien virtaamisen, mutta sallii positiivisten ja negatiivisten ionien kulun kahden elektrodin välillä elektrolyytin läpi. Kenno toimii periaatteella, jossa sähköä johtavassa elektrolyyttiliuoksessa olevilla positiivisella ja negatiivisella elektrodilla on erilainen taipumus vastaanottaa ja luovuttaa elektroneja. /1, s. 119; 2, s. 86./



Kuva 1 Litiumioniakun periaatekuva /2, s.60/

2.1 18650 litiumioniakku

Litiumioniakut ovat yksi eniten kehitetyistä akkutyypeistä nykyaikana johtuen niiden suuresta kapasiteetista ja energiatihydestä. Litiumioniakkuihin on varastoituna suuri määrä energiaa, ja ne ovat herkkiä ympäristön ja käytön vaikutuksille. Näin ollen niitä pitää valvoa akkua purkaessa ja ladattaessa. /1, s. 35./ Tämän vuoksi kulutuslaitteissa, esimerkiksi taskulampuissa, olevissa akuissa on oma suojaipiiri integroituna akkuun. Suojaipiiri suojaa akkua yli- ja alijännitteiltä sekä liian isolta kuormalta. Sähkömoottoripyörään tuleva suojaipiiri, eli akunhallintajärjestelmä (BMS) on erillinen, joten käytettävissä akuissa ei ole suojaipiiriä itsessään. Valvottavia asioita ovat muun muassa purkuvirta, jännite, lämpötila sekä latausvirta.

Taulukossa 2 on lueteltuna lyijyhappo-, nikkelikadmium-, nikkelimetallihydridi- ja litiumioniakkujen ominaisuuksia. Näitä kaikkia on käytetty sähköisten kulku-
neuvojen energialähteinä. Niiden tärkeimmät ominaisuudet ovat nimellisjännite, ominaisenergia, energiatiheys, kapasiteetin hyötysuhde, energiatehokkuus, ominaisteho, tehotiheys, itsepurkaus, syklien kestoisuus sekä lämpötilan toiminta-alue, joita käsitellään seuraavaksi.

2.1.1 Nimellisjännite (Nominal Voltage)

Akkujen teoreettinen jännite riippuu akuissa käytetyistä elektrodimateriaaleista. Arvo on teoreettinen, eikä se todellisuudessa pysy vakiona, vaan akkujen jännite vaihtelee lataus- ja purkausprosessin aikana. Nimellisjännitteen käsite on otettu käyttöön ladattavien akkujen napajännitteen määrittämiseksi. Nimellisjännitteellä tarkoitetaan käyttöjännitteen keskiarvoja, kun täyteen ladattu akku puretaan täysin tyhjäksi vakiovirtaa käyttäen. /3, s.22./

2.1.2 Ominaisenergia ja energiatiheys (Specific Energy and energy density)

Ominaisenergialla tarkoitetaan akkukennon sisällä oleviin aktiivisiin materiaaleihin varastointuneen energian kokonaismäärää suhteessa akkukennon massaan (Wh/kg). Energiatiheys puolestaan on akkukennon sisällä oleviin aktiivisiin materiaaleihin varastoidun energian kokonaismäärä suhteessa akkukennon tilavuuteen (Wh/l). Litiumioniakkujen ominaisenergia on vertailtavista akuista suurin 250Wh/kg ja niiden energiatiheys on myös suurin, 693 Wh/l. /3, s.22./

2.1.3 Kapasiteetin hyötysuhde ja energiatehokkuus (Capacity Efficiency and Energy Efficiency)

Akkujen kykyä vastaanottaa latausta ja uudelleen latautua lasketaan käyttäen coulombin hyötysuhdetta sekä lataus/purkusyklien energiatehokkuuden kaavaa 2. Coulombin hyötysuhde on määritetty kaavan 1 mukaisesti. / 3, s. 21./

$$\mu_c = \int_0^{t_{dis}} i_{dis} dt / \int_0^{t_{cha}} i_{cha} dt \quad (1)$$

jossa	t_{dis}	kokonaispurkausaika	[s]
	t_{cha}	kokonaislatausaika	[s]
	i_{cha}	latauksen aikana kulkenut virta	[As]
	i_{dis}	purun aikana kulkenut virta	[As]

Energiatehokkuuden kaavan 2 mukaan latausprosessin jännite on korkeampi kuin purkausprosessissa ja sitä kautta energiatehokkuus on pienempi kuin kapasiteettihyötysuhde. Esimerkiksi litiumioniakkujen energiatehokkuus on yleensä noin 85–95 % ja kapasiteettihyötysuhde lähes 100 %. /3, s.21–22./

$$\mu_c = \int_0^{t_{dis}} v_{dis} * i_{dis} dt / \int_0^{t_{cha}} v_{cha} * i_{cha} dt \quad (2)$$

jossa	t_{dis}	kokonaispurkausaika	[s]
	t_{cha}	kokonaislatausaika	[s]
	i_{cha}	latauksen aikana kulkenut virta	[As]
	i_{dis}	purun aikana kulkenut virta	[As]
	v_{cha}	akun jännite latauksen aikana	[V]
	v_{dis}	akun jännite purun aikana	[V]

2.1.4 Ominaisteho ja tehotehiys (Specific Power and Power Density)

Ominaistehon yksikkö on W/kg , eli nimellisteho (W) jaettuna massalla (kg). Tehotehiyden yksikkö on vuorostaan W/l , joka tarkoittaa nimellistehon (W) suhdetta akkukennon tilavuuteen litroissa (l). Nimellistehon suhde massaan tai tilavuuteen osoittaa, kuinka nopeasti akut voivat antaa tarvittavan energian kuormille. Vertailtavista akuista litiumioniakuilla on suurin ominaisteho- ja tehotehiyssuhde. Litiumioniakkujen jälkeen suurimmat teho-ominaisuudet omaavat nikkelikadium- ja nikkelimetallihydridiakuilla, jonka jälkeen tulee tehottomin lyijyakku. /3 s. 22./

2.1.5 Itsepurkautuminen (Self-discharge)

Itsepurkautumisella tarkoitetaan akkujen purkautumista varauksesta ilman, että ne olisivat käytössä. Itsepurkautuminen johtuu akkujen sisäisistä kemiallisista reaktioista. Kaikissa akuissa on sisäisiä vuotoja, jotka purkavat akun varausta. Lämpötilalla on oleellinen vaikutus sisäisiin vuotoihin, eli itsepurkautuminen lisääntyy lämpötilan nousun myötä. Litiumioniakuilla ja lyijyakuilla on sama itsepurkautumisaste 5 % kuukaudessa, kun nikkelikadiumakuilla se on 10 % kuukaudessa ja nikkelimetallihydridiakuilla se on 20 % kuukaudessa. /3 s. 22./

2.1.6 Käyttöikä (Cycle life)

Akkujen käyttöikä määräytyy niiden lataus-/purkusyklien määrän mukaan. Sähköautoissa käyttöiän päättymisen määritellään, kun akun kapasiteetti on pudonnut 80 prosenttiin alkuperäisestä kapasiteetista. Käyttöikään vaikuttaa pääasiassa purkaussyvyys (DOD), purkausprofiili sekä akun lämpötila. DOD-asteikko kertoo, kuinka iso prosentti akun kapasiteetista puretaan käytön aikana. Yleisesti akkujen käyttöikä on parempi, kun DOD-jaksot ovat alhaisia. Esimerkiksi litiumioniakkujen tyypillinen kesto on 2000 sykliä alhaisella purkaus- ja latausvirralla sekä alhaisella lämpötilalla DOD-jakson ollessa 100 %. Mitä alhaisempi DOD-jakso on, sitä pidemmän käyttöiän akuille voi saada. Esimerkiksi 20–40 prosentin DOD-jaksolla voidaan litiumioniakuilla saavuttaa jopa 20 000 syklin käyttöikä. /3, s. 22./

2.1.7 Käyttölämpötila (Operating temperature)

Akut toimivat huonosti erittäin korkeissa ja matalissa lämpötiloissa. Alhaiset lämpötilat estävät ionien diffuusiota ja migraatiota johtaen vahingollisiin sivureaktioihin, jotka vaikuttavat akun käyttöikäen. Korkeat lämpötilat puolestaan aiheuttavat muita epätoivottuja sivureaktioita, kuten kaasun muodostumista ja korroosiota. /3, s. 22./

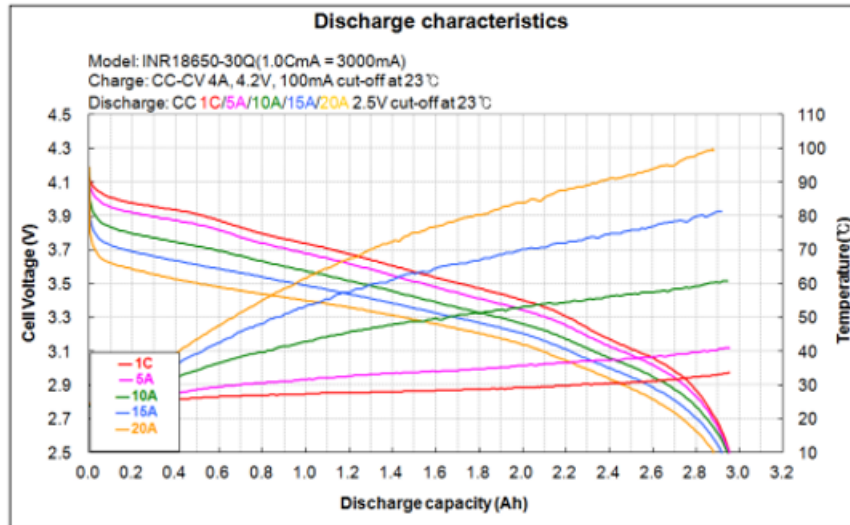
Taulukko 2. Luettelo akkutyypin ominaisuuksista /2, s. 23/

	Lead-acid	NiCd	NiMH	Li-ion
Specific energy (Wh kg ⁻¹)	33–42	50–80	70–95	118–250
Energy density (Wh l ⁻¹)	60–110	50–150	140–300	250–693
Specific power (W kg ⁻¹)	180	200	200–300	200–430
Power density (W l ⁻¹)	450	200	300	800
Nominal voltage (V)	2	1.20	1.20	3.6
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Very low
Self-discharge (per month)	<5%	10%	20%	<5%
Operating temperature (°C)	-15 to 50	-20 to 50	-20 to 60	-20 to 60
Cycle life	500 ~ 1000	2000	<3000	2000
Energy efficiency	>80%	75%	70%	85–95%

Taulukkoa 2 tarkastelemalla voidaan nähdä, että litiumioniakulla on etuja kolmeen muuhun akkutyypin verrattuna. Litiumioniakkujen energiatiheys on akkutekniikoiden suurimpia, ja tästä syystä se on valikoitunut käytetyimmäksi sähköautojen akkutyypiksi. Energiatiheys on ilmoitettu wattitunteina litraa kohden. Wattitunti on yksikkö, joka vastaa watin tehoa yhden tunnin aikana. Sähkömoottoripyörässä käytetty sylinterimallinen INR18650-30Q-litiumioniakku on 65 millimetriä pitkä, ja sen halkaisija on 18 millimetriä. Näin ollen yhden akun energiatiheys saadaan laskettua kaavan 3 mukaisesti. SI-järjestelmän mukaan sähköenergian yksikkö on joule, joka tarkoittaa yhden watin tehoa sekunnin aikana. Näin ollen 1 Wh = 3.6MJ. Yhden sähkömoottoripyörässä käytetyn akun energiatiheys on noin 653 wattituntia litraa kohden.

$$E_d = \frac{E}{V_l} = \frac{Ah * V_n}{\pi * r^2 * h * 10^{-6}} \quad (3)$$

jossa	E_d	Lieriön energiatiheys	[Wh/l]
	E	Energia	[Wh]
	Ah	Ampeeritunti	[Ah]
	V_n	Ominaisjännite	[V]
	V_l	lieriön tilavuus	[l]
	r	säde	[mm]
	h	korkeus	[mm]



Kuva 2 Viivadiagrammi INR18650-30Q purkautumisominaisuuksista /3, s. 3/

Yllä olevassa kuvassa 2 on kuvattuna INR18650-30Q-akun purkautumistilannetta. Kuvassa olevassa viivadiagrammista nähdään purkauskäyttäytyminen eri purkuvirroilla. Purkaustilanteessa akkua kuormitetaan tasaisesti jatkuvalla virralla (CC). Viivadiagrammin tarkoituksena on havainnollistaa eri purkuvirtojen vaikutusta kapasiteettiin sekä lämpötilaan. Nousutrendiset viivat kuvaavat akun lämpenemistä eri purkuvirroilla, kun taas laskevat viivat kuvaavat akun jännitettä verrattuna akun kapasiteettiin. Diagrammista voidaan myös huomata, että akun jännite laskee tasaisesti akun kapasiteetin ollessa keskialueella, mutta ääripäissä jännitteen muutos kiihtyy. Akun jatkuvalla maksimipurkuvirralla (15A) akku lämpenee purkaussyklin aikana 80 asteeseen, ja tällöin se ylittää suositellun käyttölämpötilan, joka on 60 astetta. 10 ampeerin purkuvirralla akku pysyy vielä suositellulla lämpötila-alueella.

2.1.8 Sisäinen resistanssi

Sisäinen resistanssi koostuu elektrodimateriaalin, kosketusvastuksen, kalvo-
 vastuksen sekä elektrolyytin yhteenlasketuista virrankulkua vastustavista ominaisuuksista /1, s.36/. Uudessa ja täyteen ladatussa Samsung INR18650-Q-
 akussa sisäinen resistanssi on noin 20 mΩ. Sisäinen resistanssi vaikuttaa li-
 tiumioniakkujen käyttöikänsä, ja se kasvaa käyttösykliin mukaan. Sisäinen re-
 sistanssi toimii vastuksena virtapiirissä, ja näin ollen se aiheuttaa jännite-
 häviön, eli siitä aiheutuu myös häviötehoa. Mitä suurempi sisäinen resistanssi

on, sitä suurempi on häviöteho ja sitä enemmän akku lämpenee purkautuessa. Tasavirtapiireissä akun häviöteho saadaan laskettua kaavan 4 mukaisesti.

$$P = I^2 * R_i \quad (4)$$

jossa	P	Teho	[W]
	R_i	sisäinen resistanssi	[Ω]
	I	Virta	[A]

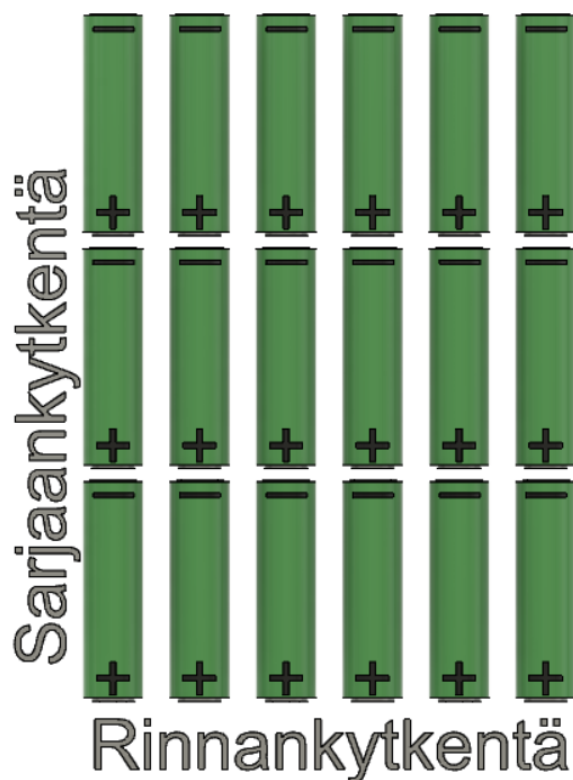
2.1.9 Maksimi- ja minimijännite

Litiumioniakkujen ominaisjännite on yleensä 3.6 voltia ja todellinen jännite voi olla väliltä 2.5–4.2 voltia. Nämä ovat litiumioniakkutekniikan minimi- ja maksimijännitteet. On erittäin tärkeää, että näitä jännitetasoja valvotaan, jotta vältetään ei-toivotuilta reaktioilta. Jos litiumioniakun kennojännitteen annetaan laskea alle valmistajan antaman minimijännitteen ylipurkauksen tai pitkän varastoinnin takia, seurauksena on elektrodimateriaalien asteittainen hajoaminen. Anodissa ylipurkaus aiheuttaa kuparisen virranjohtimen hajoamisen elektrolyyttiin, joka nostaa itsepurkautumisprosenttia. Kun akkusolua lähdetään uudelleen lataamaan, elektrolyyttiin liunneet kupari-ionit voivat saostua, metallisena kuparina, minne tahansa elektrolyytissä ja näin ollen siitä voi aiheutua oikosulku elektrodien välille. /14./

Akusta tulee epävakaata myös, jos sitä ladataan määritettyä maksimijännitettä korkeammaksi. Pitkäaikainen yli 4.3 voltin lataus pinnoittaa metallista litiumia anodille. Katodimateriaalista tulee hapettava aina, ja se menettää stabiiliuden ja alkaa tuottamaan hiilidioksidia. Kennon sisällä oleva paine alkaa nousta, jos latausta jatketaan. Tämä voi lopulta johtaa kennon halkeamiseen ja sitä kautta hyvin äkilliseen liekehtivään purkautumiseen. /13./

2.2 Akusto

Yksittäistä akkua akustossa kutsutaan soluksi. Akkukennosto taas koostuu monesta lohkokosta tai toisin sanoen erillisistä paketeista, joissa on rinnan- sekä sarjaankytkettyjä akkusoluja. Nämä paketit kytketään sarjaan ja tästä kokonaisuudesta koostuu akkukennosto. Yhteen lohkoon voi kuulua eri määrä akkusoluja, kunhan lohkon kapasiteetti on sama kuin muissa lohkoissa, eli rinnankytkettyjen akkujen määrä on sama. Näiden pakettien jännitteet voivat olla erisuuruisia. Matalin lohko kohtainen kapasiteetti akustossa määrittää akuston todellisen kapasiteetin. Matalimman kapasiteetin omaava akku tyhjenee muita nopeammin, ja sen jännitetaso laskee. Jännitetason laskiessa solun minimiarvoon akunhallintajärjestelmä rajoittaa ja lopulta katkaisee virrankulun.



Kuva 3. Rinnan ja sarjaankytkettyjä akkusoluja

Kuvassa 3 on havainnollistettu rinnan- ja sarjaankytkentöjä akustossa. Rinnankytkettäessä viereisten akkujen samat polaarisuudet kytketään yhteen ja sarjaankytkennässä, negatiiviset navat kytketään yhteen seuraavien akkujen positiivisten napojen kanssa. Esimerkkikuvassa on kyseessä niin sanottu

3s6p-akku, eli siinä on kolme akkua sarjassa ja kuusi rinnan. Tämä on yleinen merkintätapa kaupallisissa akkukennostoissa.

2.2.1 Akkukennoston jännitteen määrittäminen

Kun akkuja kytketään sarjaan, jännitteet lasketaan yhteen ja silloin akkuihin vaikuttaa virtapiirissä sama virta. Akuston sähköenergian määrä kasvaa, sillä wattitunteja (Wh) laskettaessa jännite(V) kerrotaan kapasiteetilla (Ah). Moottorin, ja moottorinohjaimen maksimijännite on 130 volttia, eli akuston maksimijännite ei saa ylittää tätä arvoa. Akuston maksimijännite määritetään litiumioniakkujen maksimijännitteen mukaan. 18650-litiumioniakun maksimijännitteen ollessa 4.2 volttia voidaan teoreettinen akkujen määrä laskea jakamalla moottorin tai moottorinohjaimen maksimijännite yhden akun maksimijännitteellä. Kun jakolaskun osamäärä pyöristetään alaspäin kokonaislukuun, saadaan teoreettiseksi maksimiksi 30 akkua sarjassa. Tällöin akun jännite olisi 126 volttia. Sähkömoottoripyörän akustossa akkuja on sarjassa 29 kappaletta, jolloin jännite nousee 121.8 volttiin. Pelkillä sarjakytkennöillä saavutetaan siis 365.4 wattituntia energiaa, joka tarkoittaa 365,4 watin tehoa tunnin ajan. Tässä tapauksessa akuston maksimipurkuvirta olisi valmistajan ilmoittama yhden akun purkuvirta eli 15 ampeeria. Tämä on kaukana moottorinohjaimen maksimiovirrasta, joka on 650 ampeeria. Jotta akuston maksimipurkuvirtaa ja kokonais-sähköenergiaa voidaan kasvattaa, on akkuja kytkettävä myös rinnan.

2.2.2 Akkukennoston kapasiteetin määrittäminen

Kapasiteetti eli sähkömäärä kertoo akun sisältämän sähkömäärän. Sen yksikkö on Coulombi, joka yksikkönä tarkoittaa yhden ampeerin suuruista sähkövirtaa sekunnin ajan. Tämä suure on verrattain pieni tarkasteltaessa akkujen kapasiteetteja, joten käyttöön on otettu suurempi yksikkö, ampeeritunti (Ah). Ampeeritunti nimensä mukaisesti tarkoittaa yhden ampeerin virtaa tunnin aikana. Akun kapasiteettia voidaan kasvattaa kytkemällä akkuja rinnan. Rinnan kytkentä tarkoittaa, että kaksi akkua kytketään virtapiiriin vierekkäin ja niihin vaikuttaa sama jännite. Näin ollen akuston jännite ei nouse, mutta kokonais-

energia kasvaa, sillä akkusolujen kapasiteetit lasketaan yhteen. Kun sähkömoottoripyörään tulevat 28 kappaletta 3000mAh akkuja kytketään rinnan, saadaan kyseisen kennoston kapasiteetiksi 84Ah.

Kytettäessä akkuja rinnan myös akkupaketin kokonaisresistanssi laskee kaavan 5 mukaisesti. Näin ollen jännitehäviöt, jotka ovat lämpöhäviöitä akuissa, laskevat. Kun kaavaan syöttää uuden INR18650-30Q-akun sisäisen resistanssin 20 mΩ, saadaan kokonaisresistanssiksi laskettua noin 0.71 mΩ. Kun akkuja kytketään rinnan, voidaan kuvitella johtimen poikkipinta-alan kasvavan. Se tarkoittaa, että johtimen läpi voidaan syöttää enemmän virtaa ja näin ollen akuston maksimipurkuvirta kasvaa.

$$\frac{1}{R_{kok}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_n} \quad (5)$$

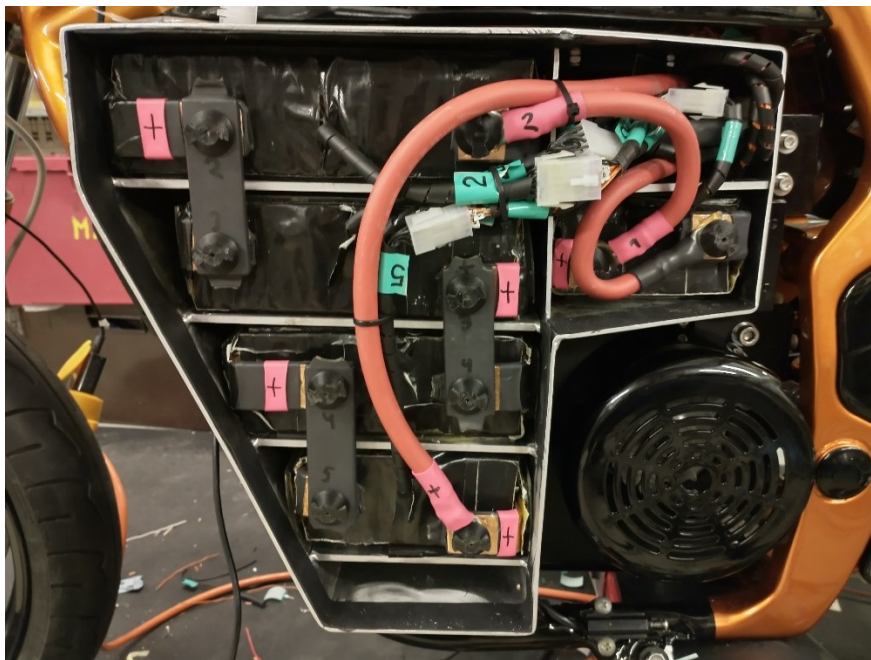
jossa	R_{kok}	kokonaisresistanssi	[Ω]
	R_x	Yhden vastuksen resistanssi	[Ω]

Kun sarjaankytkettyjen akkujen kohdalla moottoriohjaimen maksimijännite määrittää sarjaan kytkettävien akkujen määrän, ei rinnankytkettävien akkujen kohdalla ole teoriassa määrittävää tekijää. Kuitenkin toiminnan kannalta on tärkeää päästä lähelle moottoriohjaimen maksimitulovirtaa. Mitä pienempi akuston maksimipurkausvirta on, sitä enemmän joudutaan rajoittamaan akun purkausta akunhallintajärjestelmän konfiguroinnissa ja sitä pienempi kokonaisenergia saadaan sähkömoottoripyörään. Käytännön rajoittava tekijä on kuitenkin akuston paino. Sähkömoottoripyörän runkona käytetty Suzuki Bandit 600cc -moottoripyörä painoi tieliikennerekisteröinnin mukaan 214 kiloa. Jotta sähkömoottoripyörä saadaan rekisteröityä, tätä painoa ei saa ylittää. Näin ollen myöskään akusto ei saa ylittää tiettyä painoa, ja tätä kautta rinnan kytkettyjen akkujen määrä on rajallinen.

2.2.3 Akkukennosto

Akkukennoston ominaisjännite on siis 104.4 volttia, maksimijännite on 121.8 volttia ja minimijännite on 72,5 volttia. Kennoston kapasiteetti on 84 ampeerituntia ja jatkuva purkuvirta on 420 ampeeria (pulssitettuna 560A). Kennosto

koostuu 28 sarjaan- ja 29 rinnankytketystä 18650-akusta, mikä tarkoittaa yhteensä 812 erillistä akkusolua. Kuvassa 4 näkyy sivuprofiili akustosta, ja siitä voidaan havaita, miten eri akkupakettien väliset virtakiskot on kiinnitetty. Virtakiskoissa on 8 millimetrin kierteinen reikä, johon liitoskappale kiristetään. Lisäksi kuvassa näkyy positiivinen ja negatiivinen virtakaapeli. Positiivinen virtakaapeli on kytketty pääkytkimeen ja negatiivinen menee suoraan moottorinohjaimelle. Akunhallintajärjestelmän HALL-anturi on positiivisen virtakaapelin ympärillä.



Kuva 4. Akusto kuvattuna sivusta

Akkukennosto koostuu viidestä eri lohkoista, joiden jännitetasot vaihtelevat, mutta jokaisen lohkon kapasiteetti on sama. Yhden akun *jatkuva* purkuvirta on valmistajan ilmoittaman lukeman mukaan 15 ampeeria, eli koko akuston jatkuva purkuvirta on 420 ampeeria. Hetkellisesti pulssitettuna yhdestä akusta voidaan kuitenkin ottaa 20 ampeeria virtaa eli yhteensä 560 ampeeria. Pulssitus tarkoittaa järjestelmän hetkellisesti sallimaa suurempaa purkuvirtaa. Esimerkiksi kiihdytyksessä virran ylittäessä annetun maksimiarvon, akunhallintajärjestelmä sallii 130-prosenttisen virran hetkellisesti, jonka jälkeen virta rajoitus palautuu 100 prosenttiin. Uusi maksimivirran ylitys ole mahdollista tiettyyn aikaväliin, joka määritellään akunhallintajärjestelmän asetuksissa.

Taulukko 3 akkulohkojen solujen määrät, kapasiteetti sekä jännite.

Soluja rinnan [kpl]	Soluja sarjassa [kpl]	Soluja yhteensä [kpl]	Kapasiteetti	Jännite
29	3	84	87Ah	10,8V
29	5	140	87Ah	18V
29	6	168	87Ah	21,6V
29	7	196	87Ah	25,2V
29	8	224	87Ah	28,8V

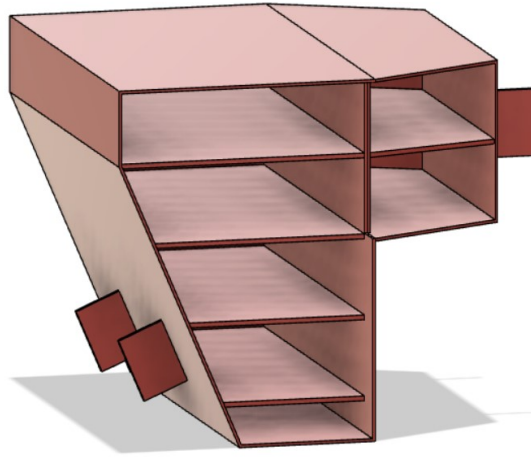
Taulukossa 3 on laskettu akuston eri lohkojen rinnan- ja sarjaankytkettyjen solujen kapasiteettia sekä jännitettä. Taulukosta voidaan huomata jokaisen lohkon kapasiteetin olevan sama sekä jännitteiden vaihtelun. Jännitteet yhteen laskemalla saadaan akuston kokonaisjännite. Akkujen kapasiteetti on laskettu kaavalla 6. Akuston kokonaisenergia saadaan kertomalla akuston ominaisjännite kapasiteetilla. Tällöin akuston kokonaisenergia on noin 8,8 kilowattituntia (kWh).

$$C_{kok} = C_{akku} * n \quad (6)$$

jossa	C_{kok}	kokonaiskapasiteetti	[Ah]
	C	Yhden solun kapasiteetti	[Ah]
	n	rinnan kytkettyjen solujen määrä	[kpl]

2.3 Akkukotelo

Pyörän runkoa valittaessa yhtenä tärkeimpänä ominaisuutena oli ns. kehtomallinen runko, jossa moottorin alapuolella on irrotettava tukirunko. Tämä tukirunko mahdollistaa tukevan kiinnityksen akkurungolle ja moottorille. Akkukotelo suunniteltiin Fusion 360 CAD (Computer Aided Design) -ohjelmaa käyttämällä. Akkukotelo suunniteltiin siten, että akuston painopiste saadaan pysymään mahdollisimman alhaalla ja keskellä, jotta moottoripyörän ajettavuus ei kärsisi. Mitä alempana moottoripyörän massakeskeispiste sijaitsee, sitä paremmin se on hallittavissa. Kuvassa 5 on akkukotelon 3D malli, jonka pohjalta akkukotelo rakennettiin.



Kuva 5. Akkukotelon toteutusmalli kuvattuna 3D-suunnitelmasta

Akkukotelossa on kuusi erillistä lohkoa, joista viiteen tulee akkuja ja kuudenteen tulee 12 voltin muuntaja sähkömoottoripyörän tekniikkaa varten. Akkukotelon kannesta tehtiin helposti avattava, jotta myöhempi opetuskäyttö ja huolto olisi mahdollista. Erilliset akuston lohkot ovat myös vaihdettavissa. Akkukotelon materiaalin on oltava mahdollisimman kevyttä ja kestävä. Tästä syystä akkukotelo valmistettiin 3 mm paksuista alumiinista. Kotelon sisällä olevat hyllyt ovat 5 mm paksuista alumiinia. Kiinnityskohtia akkukotelossa on neljä kappaletta, kaksi edessä ja kaksi takana. Sen lisäksi akkukotelo on tukevasti asennettuna moottorikiinnikkeen päälle, joka on 8 mm paksua terästä. Näin saavutettiin tukeva ja luotettava kiinnitys akkukotelolle. Akustolle menevien johtojen läpivienti tapahtuu akkukotelon päältä. Tästä läpivientilaipasta johdetaan akunhallintajärjestelmän, 12 voltin muuntajan sekä päävirtapiirin kaapelit, akkukotelo ja laippa kuvassa 6.



Kuva 6. Akkukotelo, johon kiinnitettyinä läpivientilaippa kaapeleille

2.4 Sisäiset kytkennät ja rakenne

Akkukotelon yläosassa on läpivienti, josta akunhallintajärjestelmän, 12 voltin muuntajan sekä akun positiivinen ja negatiivinen virtakaapeli tuodaan läpi sähkömoottoripyörän rungon sisälle. Sieltä johdot jakautuvat akkukotelon päällä oleville laturille ja moottorinohjaimelle sekä kytkentäkotelolle. Akunhallintajärjestelmä sijaitsee moottoripyörän penkin alapuolella.

Jokaisen akkupaketin kytkennät toisiinsa on toteutettu 150mm² kuparikiskolla. Sen leveys on 50 mm ja paksuus 3 mm. Kuparikiskon on oltava tarpeeksi paksumaa, jotta sen läpi voi kulkea 650 ampeeria virtaa. Kaapelit ja virtakiskot voidaan kuvitella vastuksiksi virtapiirissä, ja jokainen vastus tuottaa jännitehäviöitä. Virtakisko on ylimitoitettu jännitehäviöiden minimoimiseksi akkulohkojen välillä.

Yhdessä erillisessä akkupaketissa positiiviseen ja negatiiviseen virtakiskoon on kolvattu erillisiltä akkusoluilta tulevat nikkeli-liuskat käyttäen hyväksi 3D-tulostettua työkalua, joka näkyy kuvassa 8. Tämä työkalu auttoi nikkeli-liuskojen asettelussa ja piti niitä paikallaan juotoksen aikana. Kupari on erittäin hyvä lämmönjohdin, joten siihen nikkeliä kiinni juottaminen vaatii paljon lämpöä.

Tässä juotoksessa käytettiin 200 watin juotoskolvia, jolla kuparikisko lämmitettiin lähes hehkuvaksi, jonka jälkeen nikkeliliuskat saatiin juotettua kiskoon kiinni käyttäen lyijyllistä tinaa. Kuvassa 8 virtakisko on oikealla, jonka päällä näkyy nikkeliliuskat. Virtakiskot kiinnitettiin akkupaketin kylkiin liimamassalla, jonka jälkeen akkujen navat hitsattiin kiinni nikkeliliuskoihin. Kun virtakiskot oli juotettu paikalleen, tehtiin loput hitsaukset akkupaketteihin.

Ennen kuin akkujen hitsaus aloitettiin, jokaisen akkupakettiin tulevan akkusolun jännite mitattiin yleismittarilla, ja näin osaltaan varmistettiin, että akustoon tulee vain hyväkuntoisia akkuja. Suurin sallimamme varianssi jännitteessä oli 10mV, tällä varianssilla ainoastaan yksi akku erosi muista akuista. Jos kaksi erisuuruisen varauksen akkua kytketään rinnan, toinen akuista purkautuu ja alkaa ”lataamaan” toista akkua. Tässä tilanteessa välissä ei ole akunhallintajärjestelmää, joten purkuvirta ei ole rajoitettua. Ainoat resistanssit muodostuneessa virtapiirissä ovat akkujen yhdistämiseen käytetty nikkeliliuska sekä akkujen sisäiset resistanssit. Näin ollen jännite-eron ollessa suuri myös syntynyt ”latausvirta” voi olla liian suuri litiumioniakulle, ja pahimmassa tapauksessa akku voi räjähtää sisäisen paineen kasvun takia.



Kuva 7. 18650-spacer eli akkukehikko /17/

Akut aseteltiin paikalleen käyttämällä 18650-spacereitä eli akkukehikkoja. Nämä akkukehikot ovat modulaarisia, ja niitä voi yhdistää toisiinsa ja näin saavuttaa halutun muodon akustolle. Kehikkojen toisen hyödyn voi nähdä kuvasta 7, jossa akkujen väliin jää huomattava ilmarako. Tämä ilmarako mahdollistaa ilman virtaamisen vapaasti akun sisällä, ja näin ollen latauksessa ja purkaustilanteessa syntyvä lämpö pystyy tasapainottumaan laajemmalle alueelle.

2.5 Akkujen hitsaus

Hitsauksessa käytetty laite on Keenlabin kWeld spot welder. Akkujen hitsauksessa käytettyjen laitteiden toimintaperiaate on johtaa virtaa nikkeliliuskan ja akkunavan läpi. Tämä aiheuttaa materiaalien sulamisen yhteen. Hitsauskohdan on oltava mahdollisimman pieni ja hitsauksen on tapahduttava nopeasti, jotta akku ei vaurioidu suuresta lämpötilasta. Yleisesti akkujen hitsaukseen käytetyt laitteet käyttävät ennalta määrättyä pulssin pituutta hitsauksen intensiteetin asettamiseen. Ongelmana tässä on se, ettei virtaa pystytä tyypillisesti säätämään, jolloin se vaihtelee hitsauskohdan sähkövastuksen mukaan.

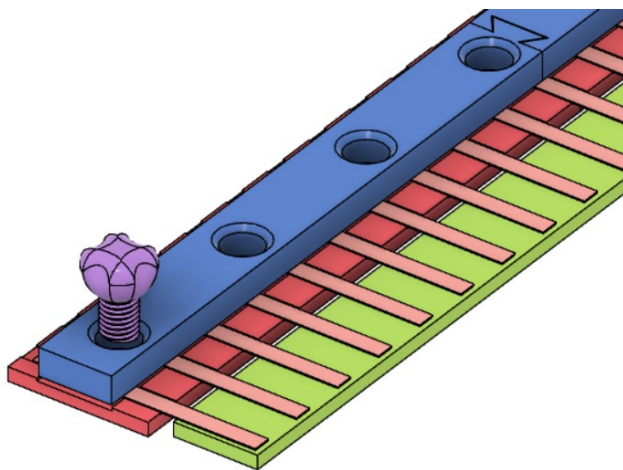
Tämä aiheuttaa ongelmia hitsauksessa, sillä hyvään hitsaukseen vaikuttavia tekijöitä on useita, kuten mekaaninen voima, kontaminaatio sekä korroosio. Nämä tekijät vaikuttavat resistanssiin, joka vaikuttaa hitsauksessa syntyvään lämpöön ja näin ollen hitsauksen intensiteettiin. Tämä voi johtaa epäjohdonmukaisiin hitsaustuloksiin. Ongelmaa on korjattu nykyaikaisissa hitsauslaitteissa käyttämällä useampaa pulssia, jotka pehmentävät hitsattavia metalleja ja polttavat hitsauskohdasta epäpuhtauksia. kWeld-hitsauslaite on ratkaissut tämän ongelman laskemalla hitsauskohtaan menevän energian jouleissa ja sen myötä automaattisesti muuttaa hitsauspulssin kestoja. Hitsauksista tulee näin ollen jokaisesta samanlainen, sillä metallia sulaa aina saman verran. /9./

kWeld-hitsauslaite tarvitsee erillisen tasavirtalähteen. Tasavirtalähteenä hitsauksessa käytettiin 100Ah/900A lyijyakkua. Täyteen ladatun akun tuottama purkuvirta oli noin 1600 ampeeria ja varsin riittävä akkujen hitsaukseen. Nikkelin hitsauksessa käytettiin 60–90 joulen energiaa, joka tarkoittaa kaavan 7 mukaan noin 300–470 μ s pituisia pulssia, kun virtalähde on täyteen ladattu ja virtalähteen purkuvirta on maksimissaan.

$$J = W * s = V * A * s \quad (7)$$

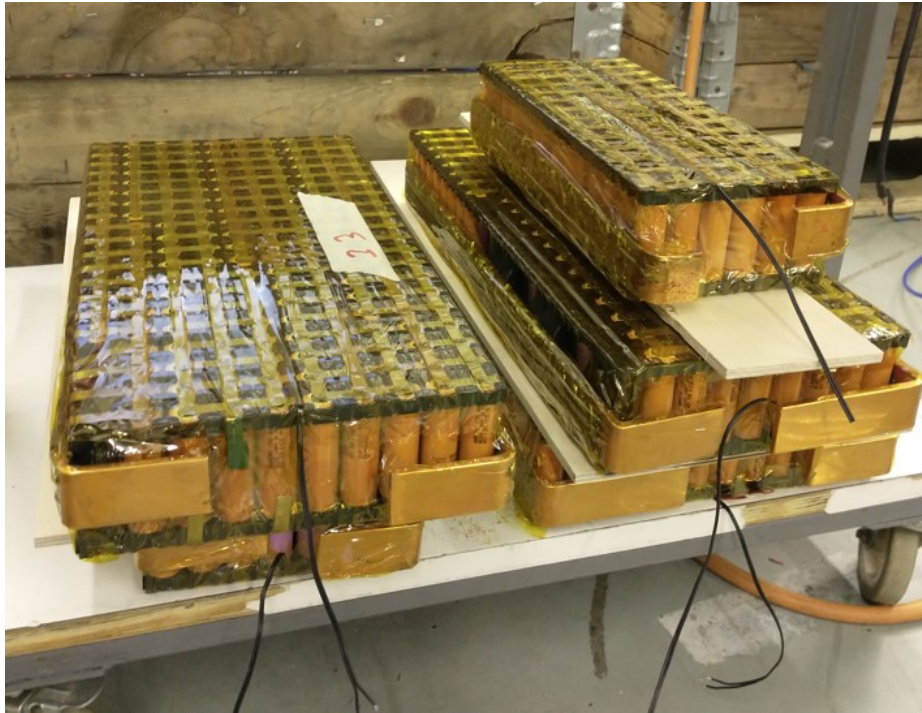
jossa	J	joule	[J]
	W	Watti	[W]
	s	Sekunti	[s]
	A	Ampeeri	[A]
	V	Voltti	[V]

Akkujen hitsauksessa nikkeli-liuskat hitsataan kiinni akun napoihin. Jokaisen rinnankytketyn akun välille hitsataan yhteensä 3.5 mm^2 nikkeli-johdin. Tämä koostuu kahdesta eri liuskasta, joiden koot ovat $0.2 \times 7 \text{ mm}$ ja $0.3 \times 7 \text{ mm}$. Nikkeli-liuska itsessään on puhdasta nikkeliä, jonka sähkönjohtavuus on $1,4 \times 10^7 \text{ S/m}$. Kuparin sähkönjohtavuus taas on $59.526 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Näin ollen nikkelin sähkönjohtavuus on vain noin 23 prosenttia kuparin sähkönjohtavuudesta. Nikkeliä käytetään akkujen hitsauksessa juuri tästä syystä. Kun akkua hitsataan, suurempi resistanssi aiheuttaa suuremman jännitehäviön, joka muodostaa suuremman lämpötilan hitsauskohtaan.



Kuva 8. 3D-tulostettu työkalu nikkeli-liuskojen asetteluun virtakiskossa

Koko paketti eristettiin polyimiditeipillä, joka on kellertävää teippiä kuvassa 9. Polyimiditeippi on erittäin lämmönkestävää, ja se kestää jatkuvan 230 asteen lämpötilan. Se on myös eristävää sekä venymätöntä. Sitä käytetään yleisesti ensimmäisen kerroksen eristeenä akkupakettien rakentamisessa. Tämän jälkeen koko akkupaketti teipattiin vielä kertaalleen käyttämällä erikoisvahvaa ilmastointiteippiä. Viimeisenä akkupaketin kylkiin sekä ylä- että alapuolelle liimattiin millin paksuisesta polykarbonaattilevystä suojalevyt estämään mekaanista kulumista.



Kuva 9. Hitsattuja ja polymamideipillä teipattuja akkupaketteja

3 AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄ

Akunhallintajärjestelmä on litiumioniakuista koostuvalle akustolle pakollinen järjestelmä. Se valvoo ja monitoroi akustossa tapahtuvia muutoksia. Akunhallintajärjestelmä koostuu monista sensoreista, toimilaitteista, ohjaimista sekä ohjelmoiduista algoritmeista, jotka valvovat ja ohjaavat akuston toimintaa. /2, s. 26./ Akunhallintajärjestelmän tärkeimmät tehtävät ovat seuraavat:

- monitoroida ja mitata kaikkia akuston soluja
- suojata akustoa ja taata turvallinen käyttö
- ylläpitää kaikkia soluja valmistajan suosittelman käytön mukaan
- optimoida akuston energian käyttö
- kommunikoida muiden laitteiden kanssa.

Laitteistopuolella akunhallintajärjestelmä mittaa virtaa, jännitettä ja lämpötilaa sensorien avulla. Laitteistot myös ilmaisevat järjestelmän vioista, kuten vioittunut sensori tai katkennut yhteys, jotka ohjelmistopuoli käsittelee. Ohjelmistopuoli ohjaa akustolta purettavaa ja sinne syötettävää virtaa ohjelmoitujen arvojen mukaisesti. Ohjelmisto vastaa myös akun tilaa valvovista algoritmeista kuten, SOC (State Of Charge), SOH (State Of Health) sekä SOP (State Of Po-

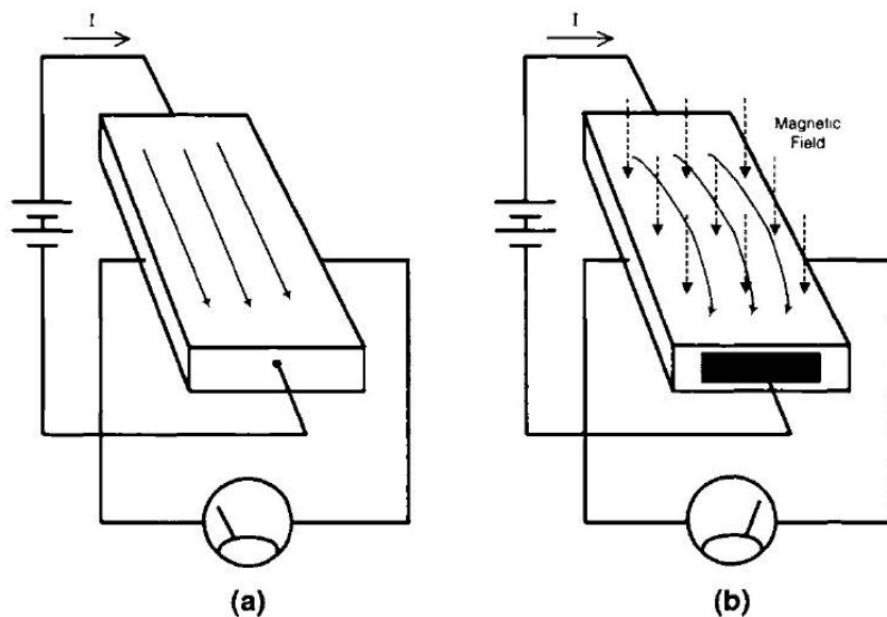
wer). Sen lisäksi muita algoritmeja ovat vikatila-algoritmit, solujen tasapaino-
tusalgoritmit sekä ohjausalgoritmit. /2, s. 26–27./ Akunhallintajärjestelmän
konfiguroinnissa määritellään akuston koko, solujen maksimi purkuvirta, solu-
jen turvalliset jänniterajat sekä akuston kapasiteetti.

3.1 Orion BMS 2

Orion BMS 2 on keskitetty akunhallintajärjestelmä, joka on tarkoitettu litiumio-
niakkujen valvontaan. Keskitetyllä akunhallintajärjestelmällä tarkoitetaan, että
järjestelmällä on yksi keskeinen laite, johon kuuluu kaikki mittarointiin ja val-
vontaan liittyvät laitteet. Vaihtoehtoisesti hajautetussa akunhallintajärjestel-
mässä on yksi keskuslaite ja jokaiselle valvottavalle solulle tulee oma akunhal-
lintalaite, joka vastaa sen solun mittaroinnista ja valvonnasta.

Orion BMS 2 luottaa siihen, että käytettävissä on ulkoisia ohjaimia rajoitta-
maan virran kulkua, sillä siinä itsessään ei ole kytkimiä /6, s. 4/. Sähkömootto-
ripyörän tapauksessa tästä vastaa moottorinohjain, joka pystyy rajoittamaan
syötettävää virtaa. Moottorinohjain vastaa myös virran katkaisusta, jos akunhal-
lintajärjestelmä ilmoittaa jännitteen tippuneen liian matalalle. Lataustilanteessa
virran rajoituksesta vastaa laturi. Akun sisään- ja ulostulovirtaa mitataan 8 mil-
lisekunnin välein Hall-efekti-anturilla.

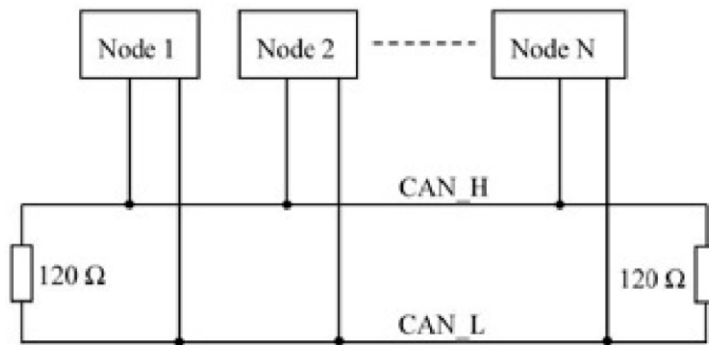
Kuvassa 10 on esitettyinä Hall-efekti-anturin toimintaperiaate. Kuvan kohdassa
(a) oleva levy kuvastaa johtavaa materiaalia, kuten kuparia, jonka läpi kulkee
virtaa. Kun kuvassa olevalla jännitemittarilla mitataan jännitettä, saadaan jän-
nitteeksi 0 volttia. Kuvan kohdassa (b) kuparilevyyn vaikuttaa magneettikenttä
virran virtauksen takia. Magneettikenttä indusoi levyn pinnalle pienen jännit-
teen, joka voidaan mitata jännitemittarilla. Jos kuvissa olevan akun napaisuus-
den kääntää, myös levyyn indusoitunut jännite vaihtaa napaisuuttaan. Tätä il-
miötä kutsutaan Hall-ilmiöksi ja se on nimetty Edwin Hallin mukaan. /18, s.1–
2./



Kuva 10. Hall-efekti-anturin toiminta /18, s. 1/

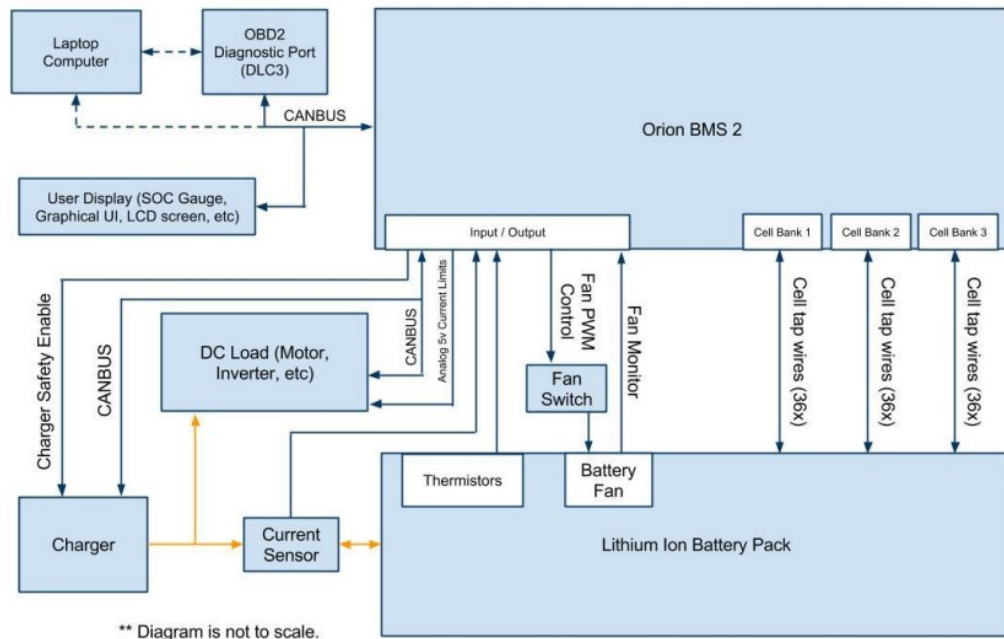
Hall-efekti-anturi on asennettu negatiivisen virtajohdon ympärille. Hall-anturi muuttaa mitatun ampeerimäärän kahdeksi 0–5 voltin analogiseksi jännitearvoksi. Toinen näistä jännitearvoista mittaa korkean resoluution varmistamiseksi pieniä virtoja, kun taas toista käytetään suurempien virtojen mittaamiseen. BMS muuttaa analogiset jännitearvot ampeeriarvoiksi.

Orion BMS 2 keskustelee näiden laitteiden kanssa käyttäen CAN-väylää (Controller Area Network). CAN väylä on autoteollisuuteen suunniteltu automaatiiväylä. Orion BMS 2 -laitteessa on kaksi erillistä CAN-väylää. Molemmat CAN-väylät ovat itsenäisiä ja ne voidaan asettaa eri viestintätaajuuksille. / 5, s.7./ Kuvassa 11 on havainnollistettuna Can-väylän toiminta. CAN- väylässä solmupisteet (nodet) on kytketty pääväylään, jonka molemmissa päissä on 120 ohmin vastus.



Kuva 11. CAN-väylän toiminta /19, s.14/

Kuvassa 12 on yleiskatsaus laitteiden kytkennästä. CAN-väylä liittää kaikki eri järjestelmien laitteet yhteen akunhallintajärjestelmän kautta. Kuvasta nähdään litiumioniakkupaketin solulle menevät johdot (Cell tab wires). Jokainen näistä liitinpakasta sisältää 36 johdinta. Nämä johtimet muodostuvat 3 erillisestä 12 solun valvontaan kykenevästä osiosta. Jos akkupakettiin tulee esimerkiksi 13 sarjaan kytkettyä akkua, 12 ensimmäistä kytketään yhteen osioon ja yksi kytketään seuraavaan siten, että loput toisen osion ylijäävistä johdoista kytketään 13:ta akun miinusnapaan. Johdotus aloitetaan aina kaikista negatiivisimmasta pisteestä. Käyttämättä jääville soluvalvontajohdoille ei tarvitse tehdä mitään, sillä akunhallintajärjestelmä ymmärtää niiden olevan käyttämättömiä. Jos akunhallintajärjestelmä havaitsee jonkun käytössä olevan soluvalvontajohdon katkenneen, ajoittain katkeilevan tai suuren impedanssin johtimessa, se antaa virhekoodin ja menee vikasetotilaan. BMS:än avoimen johdon tunnistuspiiri syöttää kennoihin ajoittain hyvin pienen virran ja tällä varmistaa, että liitoksen on kunnossa. /5, s.60/



Kuva 12. Havainnollistava kaavio akunhallintajärjestelmästä. /6/

3.1.1 Cell balancing

Solujen tasapainotuksen tärkein syy on maksimoida käytössä oleva kapasiteetti. Kaikissa akuissa on pieniä eroja kapasiteeteissa, jotka vaikuttavat koko paketin kapasiteettiin. Toisin kuin lyijyakut, litiumioniakut pysyvät hyvin balanssissa sen jälkeen, kun ne on ensimmäisen kerran balansoitu. Erot itsepurkautumisessa, sisäisessä resistanssissa sekä lämpötilassa ovat pääsyitä epäbalansoituun akkupakettiin. Näitä eroja mitataan yleisesti mikroampeereissa ja on akunhallintajärjestelmän tehtävä pystyä balansoimaan näitä eroja.

Akkusolujen tasapainotuksesta vastaa tasapainotusalgoritmi, joka alkaa tasapainottamaan soluja heti, kun kennojännite ylittää Start Balancing -jännitteen. Tasapainotus jatkuu niin kauan, kunnes kaikki akkusolut ovat määritetyn jänniterajan sisällä /6, s. 10/. Orion BMS 2 käyttää balansointiin passiivista menetelmää purkaakseen varausta täysimmistä soluista ja näin tasapainottaakseen koko akkupaketin. Passiivinen shuntti-vastustus kytketään täysimmän solun rinnalle, jolloin sen varaus purkautuu. /6, s. 40./

3.1.2 State of Health

State of Health (SOH) kuvaa yleisesti akun kapasiteetin alenemista iän myötä. Kun akun kapasiteetti pudonnut 80 prosenttiin akun alkuperäisestä kapasiteetista, akun ajatellaan olevan sen käyttöiän päässä. Lataussyklit sekä akun ikääntymisestä johtuvat kapasiteetin alenemat laskevat kokonaiskapasiteettia. Ikääntyminen voidaan havaita akun sisäisen resistanssin kasvuna sekä sähköistä ekvivalenttia tarkastelemalla. /7./

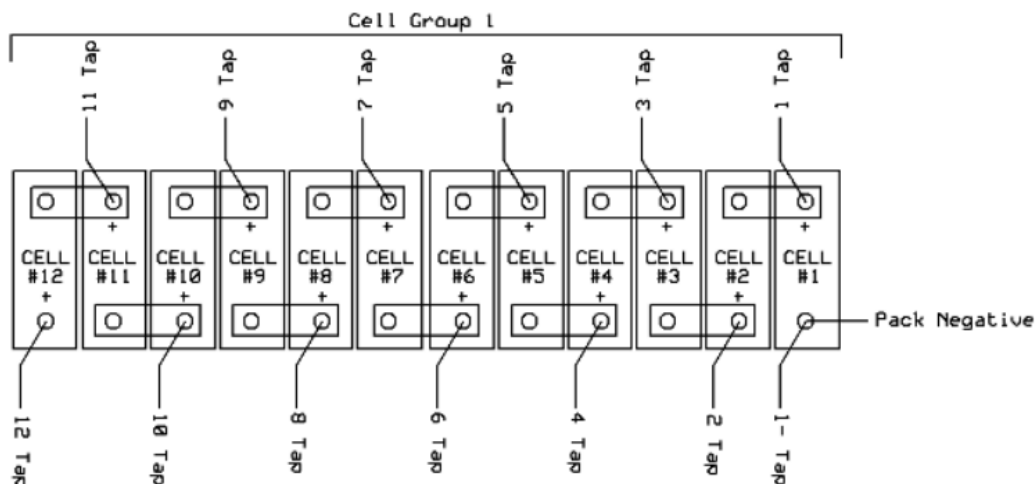
Orion BMS 2 käyttää SOH:n laskemiseen pääasiassa coulombin lakia. Virtapiirissä oleva HALL-anturi mittaa akuilta purettua sekä niihin ladattua virtaa. Virran kulkua laskemalla saadaan laskettua akuston kokonaiskapasiteetti. Latausvirta näkyy virta-anturissa miinusmerkkisenä ja purkuvirta positiivisena.

3.1.3 Lämpötilavalvonta

Jokaista akkulohkoa valvotaan erikseen eli yhteensä termistoreja otettiin käyttöön 5 kappaletta. Myös ulkolämpötilan tai akun tuulettimen ilman sisääntulon lämpötilaa voidaan valvoa näillä sensoreilla. Orion BMS 2 -laitteessa on yhteensä kahdeksan termistoria. Tarpeen vaatiessa termistoreja voidaan lisätä jopa 800 kappaletta asentamalla erillisiä laajennuspakkauksia Orion BMS 2:een /5, s. 36/.

3.1.4 Johdotus

Jokaista sarjaan kytkettyä akkusolua valvotaan erikseen, ja siksi jokaisen erillisen akun jännite on tiedettävä. Tämä on toteutettu siten, että akun kaikista negatiivisimmasta pisteestä lähdetään kytkemään jokaiseen akut erottavaan virtakiskoon yksi akunhallintajärjestelmältä tuleva kaapeli. Kaapelit ovat merkitty kuvan 13 mukaisesti. Yksi yksikkö valvoo aina 12 eri akkua. Orion BMS 2 -akunhallintajärjestelmässä on kolme erillistä liitinpakkaa, joista jokainen sisältää kolme erillistä yksikköä, joten sillä pystytään valvomaan maksimissaan 108 sarjaan kytkettyä akkua.



Kuva 13. 12 akun sarjaankytkentä /5/

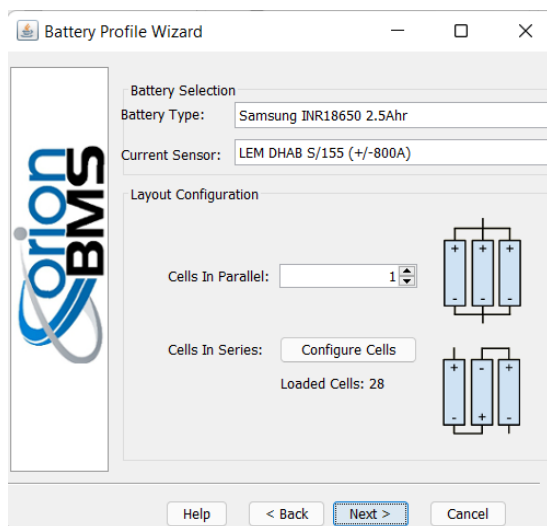
3.1.5 Käyttöönotto

Akunhallintajärjestelmän käyttöönotto on tehty hyvin käyttäjäystävälliseksi käyttäen OrionBMS 2 utility -ohjelmaa. Ohjelma sisältää useiden eri akkumallien valmiiksi konfiguroituja akkumalleja. Esiasetukset tehdään Battery Profile Wizard -toiminnolla, joka näkyy kuvassa 14.

Battery Selection (Akun Valinta)

Aluksi valitaan oikea akkutyyppe sekä käytetty virtamittari valikosta. Sähkömoottoripyörässä käytetty Samsung INR18650 -akun tiedot löytyvät esivalikosta. Akun esiasetuksia pystyy kuitenkin muokkaamaan jälkikäteen, jos omaa akkua ei löydy valikosta. BMS 2:sta ostettaessa valitaan haluttu virtamitt-

tari, ja se toimitetaan akunhallintajärjestelmän yhteydessä. Jos kuitenkin haluaa käyttää jotakin muuta virtamittaria, niin yhteensopivat virtamittarit löytyvät Orion BMS:än sivuilta.



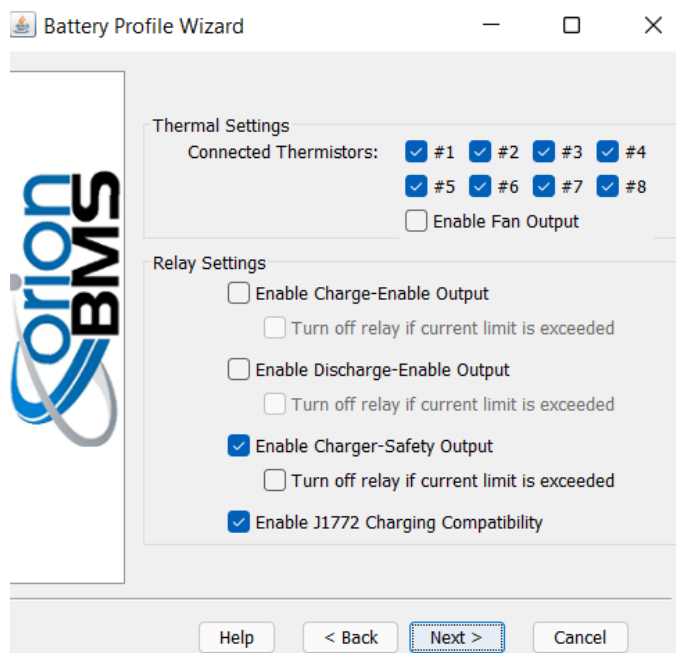
Kuva 14. Battery Profile Wizard, ensimmäinen sivu

Layout Configuration (Asettelyn Määrittäminen)

Tässä osiossa määritetään, kuinka monta akkua on rinnan ja sarjassa. Sarjaan kytketyt akut pystytään määrittelemään myös automaattisesti BMS:n ollessa yhdistettynä OrionBMS 2 utility -ohjelmaan. Automaattisessa täytössä BMS lukee kaikki solut, joissa on jännite, ja tätä myötä tietää, kuinka monta on kytketty sarjaan.

Thermal Settings (lämpötila-asetukset)

Kuvassa 15 on toinen sivu Battery Profile Wizard -konfiguroinnista. Tällä sivulla määritellään käytetyt lämpötila-anturit sekä käyttöön tulevat releet. Sähkömoottoripyörään asennettiin viisi termistoria jokaiseen erilliseen akkulohkoon. *Enable Fan Output* -valintaikkuna mahdollistaa yhden termistorin käytön akuston tuulettimen ohjaukseen. Sillä valvotaan ympäristön lämpötilaa ja sitä kautta saavutetaan kehittyneempi tuuletuksen ohjaus. Sähkömoottoripyörään tätä ominaisuutta ei asennettu, sillä akustossa ei ole erillistä tuuletinta.



Kuva 15 Battery Profile Wizard, toinen sivu

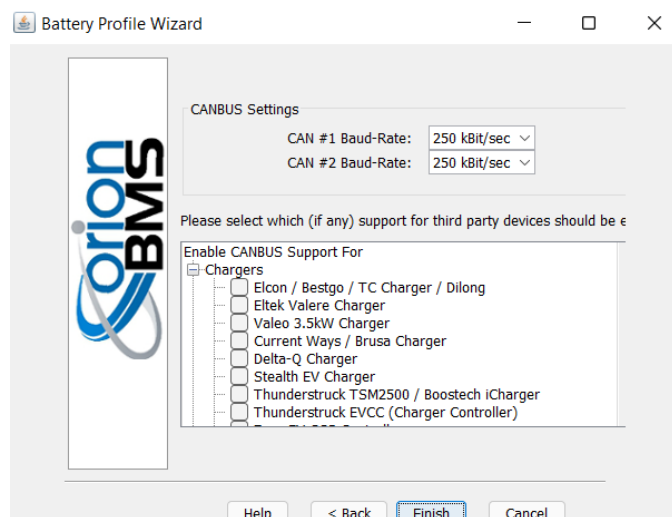
Relay Settings (Rele-asetukset)

Rele-asetuksissa voidaan määrittää käyttöön *Charge-Enable*-lähtö. Sitä käytetään ohjaamaan ajoittaista latausta, kuten jarrutusvoiman talteenottoa, aurinko- tai tuulivoimalla latausta. *Discharge-enable*-lähdöllä voidaan ilmaista kuormalle, että akku on purettavissa. Tällä lähdöllä voidaan indikoida esimerkiksi moottorinohjaimelle, että akkua saa alkaa purkamaan. *Charger-safety*-lähtöä käytetään laturin ohjaamiseen. Tällä lähdöllä voidaan estää ajoneuvolla ajaminen latauksen aikana. Sillä voidaan myös saavuttaa varmuus siltä varalta, että CAN- yhteys laturiin katkeaa. /5, s.19./ Käyttämässämme laturissa on turvamekanismi, joka katkaisee latauksen, jos CAN –yhteys katkeaa. J1772 on standardisoitu latausliitin sähköajoneuvoille. Tämän latausliitännän käyttäminen mahdollistetaan ottamalla käyttöön *Enable J1772 Charging Compatibility*.

CANBUS Settings (CAN-väylän asetukset)

Kuvassa 16. valitaan mitä CAN –väylään liitettäviä laitteita yhdistetään akunhallintajärjestelmään. Yleisimpiä laitteita ovat moottorinohjaimet, sekä laturit. Sivulla valitaan valikosta käytetty laite ja valitaan CAN #1 ja CAN#2 väylien

baudinopeus. Tämän jälkeen esiasetukset päätetään painamalla *Finish* painiketta.



Kuva 16 Battery Profile Wizard, kolmas sivu

4 LATAUS

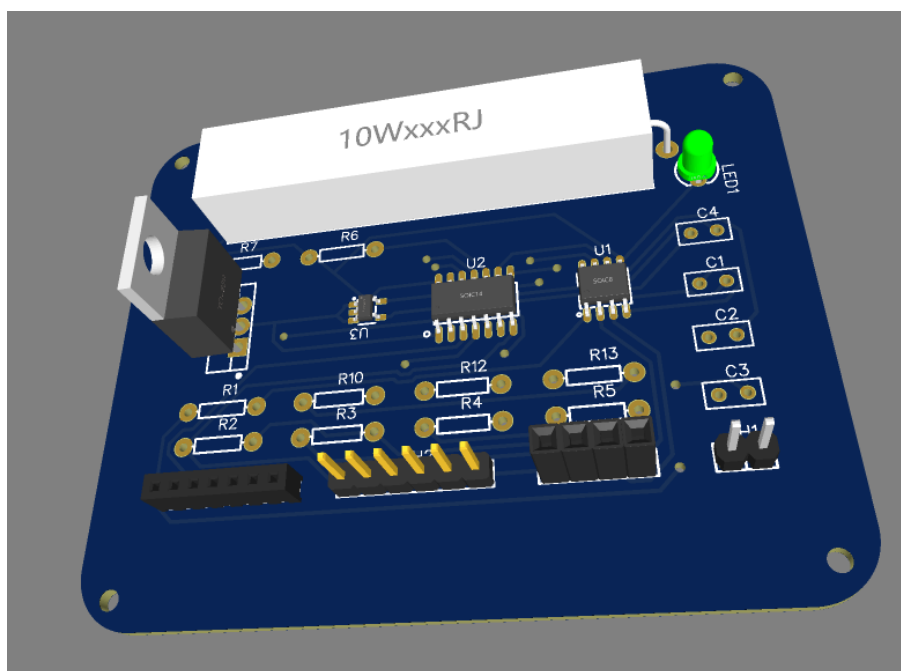
Sähkömoottoripyörän laturi on ELCON HK-J-H198-23, jonka latausteho on 3.3kW. Sen hyötysuhde täydellä teholla on $\geq 94\%$ ja paino noin 4 kiloa. Laturilla on IP68-tiiveysluokitus, joka lisää laturin luotettavuutta, sillä vesi ei vaikuta sen toimintaan. Laturi toimii verkkovirralla, ja sille riittää 16 ampeerin sulake. Laturissa on ylikuumenemissuoja, joka alkaa rajoittamaan syötettävää tehoa, jos lämpötila nousee yli 85 asteen, ja katkaisee syötön kokonaan, jos lämpötila nousee 90 asteeseen. /15, s. 2./ Laturissa on sisäänrakennettu 12 voltin muuntaja, joka antaa virran akunhallintajärjestelmälle. Akunhallintajärjestelmä ohjaa laturia CAN-väylän välityksellä. Kun akunhallintajärjestelmä havaitsee, että laturi on kytketty, se välittää tiedon välittömästi moottorinohjaimelle, joka kytkee pääkontaktorin pois päältä. Näin ollen ei ole mahdollista ajaa silloin, kun laturi on kytkettynä. Jos CAN-yhteys jostain syystä katkeaa, on laturissa suojapiiri, joka katkaisee syötön. Kun pääkontaktori on pois päältä, akunhallintajärjestelmä lähettää tiedon laturille, millä virralla ja jännitteellä akustoa saa ladata. Lisää teknisiä tietoja laturista löytyy taulukosta 4.

Taulukko 4. Laturin tekniset tiedot /15/

Model		HK-J-H198-23-XXCANXXXX/X-001
I N P U T	Input Voltage	AC 85~265V
	Frequency	45-65Hz
	Input Current	16A
	Power Factor	≥ 0.99 at over half power
	Efficiency	$\geq 94\%$ at full power
	Idle Power	$\leq 5W$
O U T P U T	Output	CV / CT
	Output Range	50-198V
	Output current Lim.	Maximum 32A
	Output Power	3300W @220vac or 1600W@110VAC
	Voltage Accuracy	$\pm 1\%$
	Current Accuracy	$\pm 2\%$
	Ripple voltage	5%

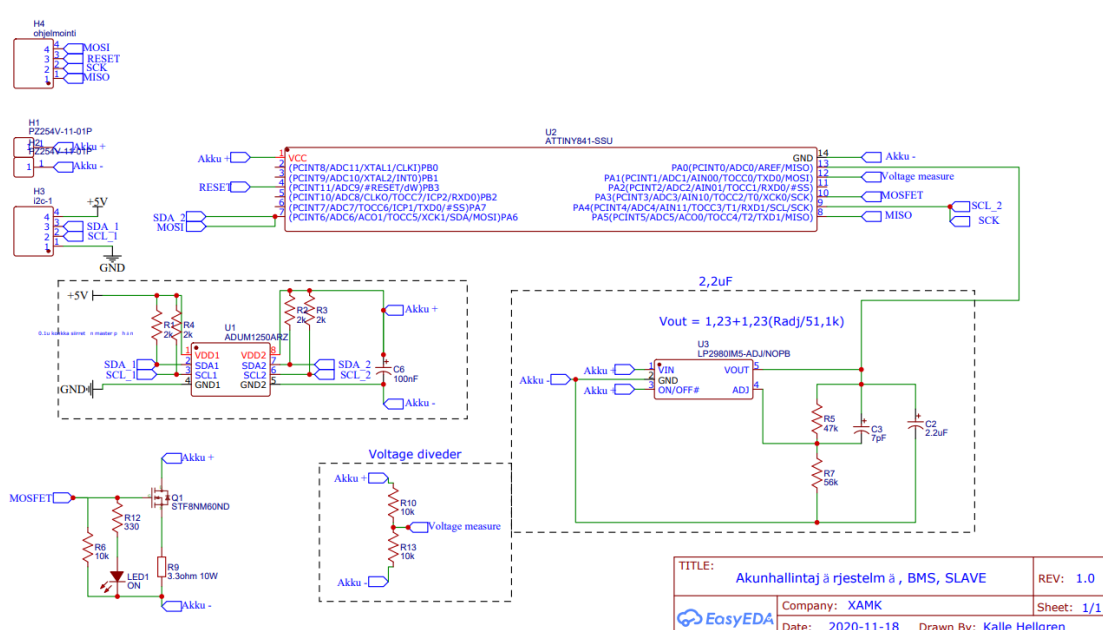
5 OMATEKOINEN AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄ

Akunhallintajärjestelmästä suunniteltiin hajautettu, eli jokaiseen akun lohkon tulee erikseen oma mikrokontrolleri (slave), joka lähettää tietoa päätietokoneelle (master). Keskustelu laitteiden välillä tapahtui I2C-väylällä. Master laitteena toimii Arduino Mega ja slave-laitteena toimii Attiny841-mikrokontrolleri. Attiny841 valikoitui akunhallintajärjestelmän slave-laitteeksi sen pienen koon sekä i2c-yhteensopivuuden vuoksi.



Kuva 17. 3D-malli suunnitellusta piirilevystä

Akunhallintajärjestelmää suunnitellessa ensimmäisenä tutustuttiin, mitkä ovat tärkeimmät ominaisuudet akunhallintajärjestelmälle. Näitä ovat esimerkiksi akun maksimi- ja minimijännitteiden valvonta sekä lämpötilan valvonta. Liik- keelle lähdettiin akun minimi- ja maksimijännitteiden valvonnasta. Jännitteen valvontaa varten jokaiselle erilliselle valvontayksikölle tarvitaan akun pääjän- nitteestä eristetty virtapiiri, sillä sarjaankytkettäessä ensimmäisen akun positiiv- inen napa on seuraavan akun negatiivinen napa ja niin edelleen. Piirissä ei siis voinut olla yhteistä maata. Tämä eristys toteutettiin kuvan 18 mukaisesti siten, että jokaiselle slave-laitteelle tuli optinen erotin (ADUM1250), joka on suunniteltu eristämään I2C-väylädata.



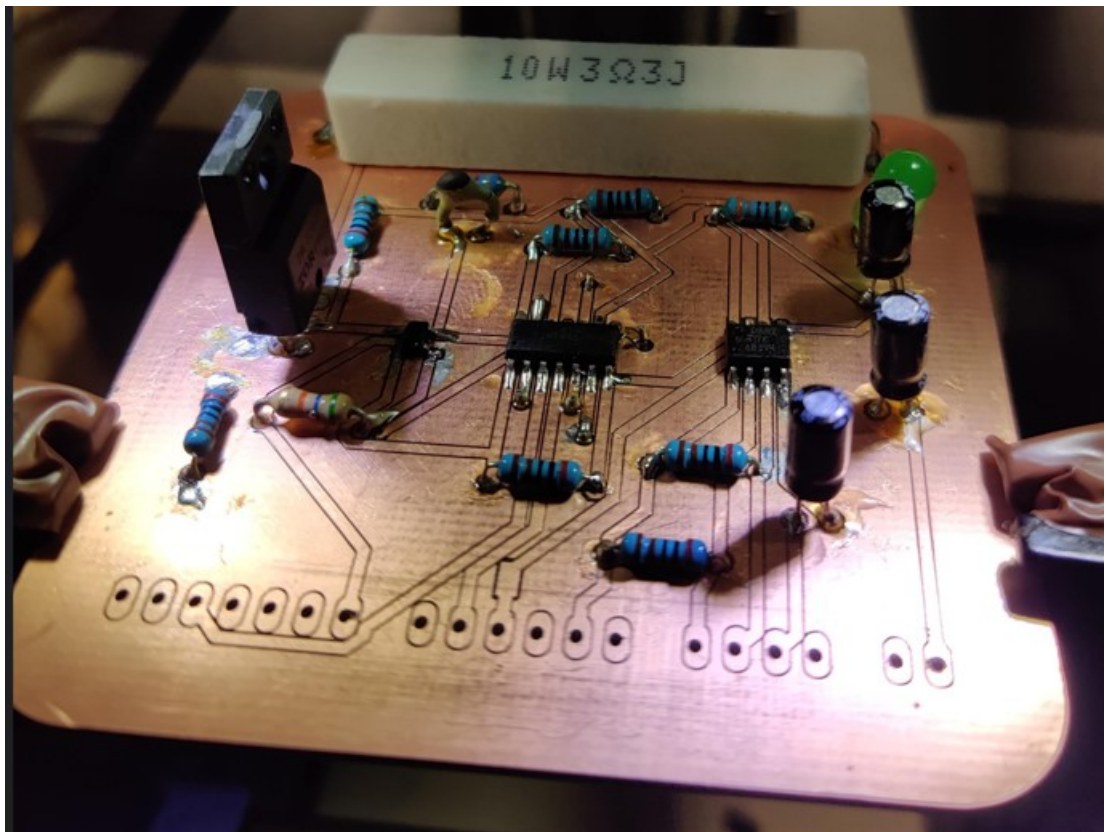
Kuva 18. Slave-laitteen kytkentäkaavio

Jokainen slave laite tarvitsee toimiakseen muuttumattoman referenssijännitteen, joka toimii perustana akun jännitteen mittaamiselle. Akun jännitteen vaihdelta 2.5–4.2 voltin välillä mikrokontrolleri tarvitsee jännitearvon, johon akun jännitettä verrataan. Kyseisessä piirikaaviossa referenssijännite asetettiin käyttämällä säädettävää jänniteregulaattoria ja regulointijännite oli 1.23 voltia. Lataustilanteessa jännitteen saavuttaessa määritetyn yläjännitteen, slave piirilevyssä oleva shuntti-vastus kytketään rinnan akun kanssa. Tällöin

virta purkautuu shuntti-vastuksen kautta ja akun jännite laskee. Myöskään latausvirta ei enää kulje akun läpi. Näin ollen täyteen tullut akku ei enää lataudu, mutta muut akut jatkavat latausta.

Ali- ja ylijännite lasketaan vertaamalla Attiny841 mikrokontrollerin käyttöjännitettä referenssijännitteeseen. Alijänniterajan valvonnan suunnittelu jäi vielä osin kesken. Tarkoituksena oli ohjelmoida Master-laite välittämään tieto kaikille Slave -laitteille niin, että ne katkaisivat oman jännitesyöttönsä. Tämän jälkeen Master laite olisi katkaissut päävirtapiirin.

Kuvassa 17. on 3D malli suunnitellusta hajautetusta akunhallinnan slave -piiristä. Kuvassa 20. on toteutettu piiri.



Kuva 19. CNC-piirilevyjyrsimellä toteutettu piirilevy

6 TULOKSET

Muunnosprojektin tarkoituksena oli valmistaa tieliikennekäyttöinen sähkömoottoripyörä. Jotta rekisteröinti on mahdollista, ei sähkömoottoripyörän paino saa ylittää runkona toimineen moottoripyörän painoa. Sähkömoottoripyörästä tuli 14 kilogrammaa kevyempi kuin polttomoottorisesta moottoripyörästä, eli tähän

tavoitteeseen päästiin. Lisäksi muutoskatsastuksessa tarkistettiin kaikkien sähköasennuksien lainmukaisuus. Myöskään näistä ei löytynyt katsastuksessa huomautettavaa.

Omatekoisesta akunhallintajärjestelmästä toteutettiin toimiva prototyypiversio, jonka suunnitteluun ja toteutukseen käytetty aika oli merkittävä. Kuitenkin tämän osaprojektin laajuus huomattiin jo projektin aikana liian suureksi. Jotta akunhallintajärjestelmä pystytään toteamaan luotettavaksi ja näin ollen ottaa käyttöön, olisi tämä vaatinut erittäin paljon erilaisten algoritmien koodaamista ja satoja työtunteja. Lisäksi sitä olisi pitänyt testata ja rasittaa erilaisilla testeillä lukuisia kertoja, jotta luotettavuus pystyttäisiin todentamaan. Kuitenkin suunniteltu akunhallintajärjestelmä ammensi ymmärrystä ja taitoa akunhallintajärjestelmiin liittyen, ja näin ollen sen merkitystä projektille ei voi vähätellä.

Opinnäytetyön kirjoittaja osallistui koko projektin aikana myös moottorin, moottorihjaimen, keskustietokoneen sekä valosähköjen suunnitteluun ja toteutukseen. Tämä opinnäytetyö ei pitänyt sisällään näitä osuuksia projektista. Iso osa projektiin käytetystä ajasta kului erilaisten akkujen, moottorien ja moottorihjaimien vertailuun.

Eri akkuvalmistajien akuissa on hyvin paljon eroavaisuuksia, ja projektin kannalta parhaimman mahdollisen akun löytämiseen tehty vertailu oli kattava. Siinä käytiin läpi taulukkolaskentaa hyödyntäen suuri osa markkinoilla olevista litiumioniakuista. Akkuja on eri kokoisia ja -mallisia, ja niiden purkuvirrat sekä kapasiteetit vaihtelevat paljon. Moottorihjain valikoitui sähkömoottoripyörään Mikkelin Ammattikorkeakoulun rakentaman sähköauton pohjalta, sillä tarkoitus oli käyttää sähköautosta purettua ohjainta. Tämä ohjain oli kuitenkin 2010 –luvun alkupuolelta ja sen ohjelmisto oli vanhentunutta. Tämä asia tuli ilmi vasta siinä vaiheessa, kun moottoripyörää alettiin testaamaan. Akunhallintajärjestelmä valittiin moottorihjaimen pohjalta yhteensopivuuden varmistamiseksi.

Kuvassa 20. on sähkömoottoripyörä esittelyssä vuoden 2022 American Car Show’ssa. Lähes kaikki sähkömoottoripyörän osat maalattiin ja akkukoteloon

teetettiin kynäruiskumaalaus. Sähkömoottoripyörän penkki 3D tulostettiin, jonka jälkeen se verhoiltiin.



Kuva 20. Sähkömoottoripyörämuunnos näyttelyssä American Car Show'ssa

7 POHDINTA

Sähkömoottoripyörän kulutus on testiajojen perusteella maantienopeuksissa (80 km/h) on noin 80Wh/km ja akun kapasiteetti 8.8kW/h. näin ollen maantienopeudella kantamaksi saadaan 110 km. Alkuperäisen suunnitelman mukaan kantaman minimiksi määriteltiin 150 km. Uskoimme että määritelty kantama pystyttäisiin saavuttamaan perustuen teoreettiseen akkujen määrään, joka mahtuisi akkukoteloon. Kuitenkin toteutusvaiheessa akkukoteloon oli asennettava 12 voltin muuntaja sähkömoottoripyörän sähköistyksiä varten. Näin ollen akkukoteloon ei mahtunutkaan suunniteltu määrä akkuja ja tästä syystä kapasiteetti jäi haluttua pienemmäksi. Jos sähkömoottoripyörän runko olisi valmistettu itse, olisi myös akkuja saatu mahtumaan enemmän. Sähkömoottoripyörän ajettavuus pysyi ajokokemukseen perustuen hyvänä. Projektin aikana huolena oli painopisteen nouseminen polttomoottorin poistamisesta johtuen.

Painopiste kuitenkin saatiin pysymään matalana ja pyörää on erittäin hyvä ajaa.

Akkujen hitsaus aiheutti projektin aikana erittäin paljon työtä. Hitsaukseen yritimme aluksi hyödyntää koululta löytynyttä muuntajaa ja vaihtovirtaa. Tätä varten rakensimme hitsauspöydän, sekä automaattisesti toimivan hitsauslaitteen käyttäen Mitsubishi Alpha logiikkaa. Kuitenkin testihitsauksia tehdessämme totesimme, ettei AC virralla hitsaus sovellu akkujen hitsaamiseen. Osasyynä sille oli, ettei piikkivirtaa saatu tarpeeksi suureksi. Toisiopuolen virtaa kasvatettiin ensiöpuolen käämitystä lisäämällä.

Kokonaisuudessaan projekti oli erittäin opettavainen ja sähköteknisesti kattava. Akunhallintajärjestelmää suunnitellessa tutustuttiin piirilevyjen suunnitteluun ja toteutukseen. Myös koodaaminen oli isossa osassa projektia, sillä esimerkiksi suunniteltu akunhallintajärjestelmä, sekä sähkömoottoripyörän valaistus koodattiin käyttäen C++ (Arduino)ohjelmointikieltä.

LÄHTEET

1. Huggins, R. Energy Storage. Boston, MA: Springer. 2010.
2. Weixiang, S., Xiong, R. Advanced Battery Magement Technologies For Electric Vehicles. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. 2019.
3. Introduction of INR18650-30Q. Samsung SDI. 2014. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://eu.nkon.nl/sk/k/30q.pdf> [viitattu 01.06.2022]
4. Orion 2 BMS migration guide. Ewert Energy Systems. PDF-dokumentti. Päivitetty 10.11.2017. Saatavissa: http://www.orionbms.com/downloads/documents/orionbms2_migration_guide.pdf [viitattu 01.06.2022]
5. Orion BMS 2 Wiring Manual. Ewert Energy Systems. PDF-dokumentti. Päivitetty 01.09.2018. Saatavissa: https://www.orionbms.com/manuals/pdf/orionbms2_wiring_manual.pdf [viitattu 01.06.2022]
6. Orion 2 BMS operational manual. Ewert Energy Systems. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.orionbms.com/manuals/pdf/orionbms2_operational_manual.pdf [viitattu 01.06.2022]
7. Arasaratnam I. Novel Battery SOC/SOP/SOH Estimation Algorithms in a Unified Framework. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2014. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://haranarasaratnam.com/docs/c_ECCE_2014.pdf viitattu [01.06.2022]
8. Linja-Aho, V. Jännitelähde-virtalähdemuunnos ja Theveninin teoreema. WWW-dokumentti. Päivitetty 25.01.2022. Saatavissa: <https://aoe.fi/#/materiaali/1900>. viitattu [01.06.2022]
9. kWeld - DIY battery spot welder kit. Keenlab. 2018. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.keenlab.de/index.php/product/kweld-electronics/>. viitattu [01.06.2022]
10. Lithium battery State of Charge. Wisdom Industrial Power Co. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lithium-battery-factory.com/lithium-battery-state-of-charge/>. Viitattu [01.06.2022]
11. Haifeng, D., Bo, J., Xuezhe, W. Impedance Characterization and Modeling of Lithium-Ion Batteries Considering the Internal Temperature Gradient. Energies. 2018. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/220> Viitattu [01.06.2022]
12. Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola S., Öistämö, J. Tekniikan kaavasto. 17. painos. Tampere: AMK-kustannus Oy Tammertekniikka.

13. BU-409: Charging Lithium-ion. Battery University. WWW-dokumentti. Päivitetty: 25.10.2021. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion> Viitattu [01.06.2022]
14. Lithium Battery Failures. Electropaedia. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.mpoweruk.com/lithium_failures.htm. Viitattu [01.06.2022]
15. HK-J series 3.3KW sealed car charger. ElCon. Päivitetty: 11.04.2015. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/1976/6951/files/HK-J-H198-23-verA1.pdf?v=1603319169> Viitattu [01.06.2022]
16. 18650 akkukehikko (spacer) 3 akulle. Akkula. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://akkula.fi/tuote/18650-akkukehikko-spacer-3-akulle/>. Viitattu [01.06.2022]
17. H Ramsden, Edward. Hall-Effect Sensors: Theory and Application, Elsevier Science & Technology, 2006.
18. Zhu, Yu. CAN and FPGA Communication Engineering: Implementation of a CAN Bus based Measurement System on an FPGA Development Kit : Implementation of a CAN Bus based Measurement System on an FPGA Development Kit, Diplomica Verlag, 2010.
19. Akut. Motiva. WWW-dokumentti. Päivitetty: 04.08.2020. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/va-litse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut viitattu [01.06.2022]