



Joona Karuma

Sähköpyörän akun suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

20.5.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Joonas Karuma
Otsikko: Sähköpolkupyörän akun suunnittelu
Sivumäärä: 31 sivua
Aika: 5.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka
Ohjaajat: Lehtori Pasi Kovanen

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa sähköpolkupyörä sekä sähköpolkupyörän akku. Projektin aikana keskityttiin rakentamaan yleisille teille so-
piva ajoneuvo, jolla pystyy ajamaan kohtalaisen pitkiä matkoja.

Insinööriyössä määritettiin aluksi, mitä vaatimuksia sähköpolkupyörälle on toiminta-
matkan, tehon ja ominaisuuksien suhteen, minkä jälkeen alettiin vertailemaan mark-
kinoilta löytyviä akkukennoja, napamoottoreita, akustonhallintajärjestelmiä ja mootto-
rinohjaimia. Samalla vertailtiin eri akkukennojen ominaisuuksia sekä suhdetta kapasiti-
teetin ja hinnan välillä. Sopivien komponenttien löytyttyä ne tilattiin, minkä jälkeen
aloitettiin rakentaminen.

Insinööriyön lopputuloksena syntyi hyvin toimiva sähköpolkupyörä.
Lisäksi päädyttiin tulokseen, että omarakenteinen sähköpolkupyörän akku on oikein
tehtynä toimiva ja turvallinen ratkaisu sähköpolkupyörän akuksi.

Avainsanat: sähköpolkupyörä, sähköpyörä

Abstract

Author: Joona Karuma
Title: Designing a battery for an electric bicycle
Number of Pages: 30 pages
Date: 5 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisors: Pasi Kovanen, Lecturer

The purpose of this thesis was to design and build an electric bicycle and an electric bicycle battery. During the project, the focus was on building a vehicle suitable for public roads that can drive moderately long distances.

In the thesis the requirements were determined for the electric bicycle in terms of range, power and characteristics, followed by a comparison of the battery cells, hub motors, battery management systems and motor controllers available on the market. At the same time, the characteristics of different battery cells and the relationship between capacity and price were compared. Once the suitable components were found, they were ordered, after which construction began.

The end result of the engineering work was a well-functioning Electric Bicycle. In addition, a conclusion was made that the self-built electric bicycle battery is a functional and safe solution.

Keywords: Electric bike

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Moottori	1
3	Moottorinohjain	3
4	Akkujärjestelmä	4
4.1	Akkukennojen valinta	4
4.2	Akun suunnittelu	5
4.3	Samsung INR21700-40T	7
4.4	Akustonhallintajärjestelmä	9
4.5	Akkukennojen yhdistäminen	13
4.6	Akun lataaminen	16
4.7	Kennojen pakkaus	18
4.8	Litiumioniakut ja lainsäädäntö	18
4.9	Kennojen jäähdytys ja lämmitys	18
5	Pyörän rakenne	19
5.1	Akun sijoitus ja kiinnitys	19
5.2	Napamoottori	21
5.3	Valot 5 V	23
6	Lopputulos	23
	Lähteet	25

1 Johdanto

Sähköisen voimalinjan omaavat ajoneuvot ja erityisesti sähköisen voimalinjan rakenne ovat kiinnostaneet minua jo pidemmän aikaa, minkä takia ryhdyin rakentamaan omaa sähköpolkupyörää. Sähköpolkupyörän energialähteenä toimii akku, jonka halusin mielenkiinnosta aihetta kohtaan suunnitella ja koota itse. Tekemällä akun itse voisin olla varma, että akussa käytetyt kennot olisivat laadukkaita.

Tässä insinööriyössä esitellään siis omarakenteisen sähköpolkupyörän akkujärjestelmä, moottorinohjain ja sähkömoottori. Työn pääpainona on sähköpolkupyörän akkujärjestelmä ja sen suunnittelu. Työssä kerrotaan myös hieman rakennetun sähköpolkupyörän rakenteesta ja muista komponenteista.

Tietoa on kerätty raporteista, oppimateriaaleista, kirjallisuudesta ja tutkimuksista. Työhön liitetään lisäksi havainnollistavia taulukkoja ja kuvia. Tavoitteena on, että työ on hyödyksi opiskelijoille ja henkilöille, jotka ovat kiinnostuneita sähköisestä liikkumisesta tai aikovat tehdä itse oman sähköpolkupyörän.

2 Moottori

Sähköpolkupyörän moottoriksi haluttiin napamoottori. Napamoottorissa staattori on akselin avulla kiinni polkupyörän takahaarukassa, englanniksi niin sanottu "outrunner", jolloin staattori on paikallaan. Roottoriin kiinnittyy takavanteen pinnat, joten roottori pyörii pyörän liikuessa. Suoravetoisessa napamoottorissa on hyviä puolia muun muassa se, että se on lähes huoltovapaa. Ainoastaan pyörän laakerit ovat kuluvia osia. Se on myös lähes äänetön, ja siinä on mahdollisuus regeneratiiviseen jarruun. Keskiömoottoriin verrattuna huonona puolena suoravetoisessa napamoottorissa on se, että siinä ei ole vaihteita ollenkaan sekä painavaan roottoriin varastoituu pyörimisenergiaa, joka pienentää kiihtyvyyttä ja pidentää jarrutusmatkaa.

Projektissa sähkömoottorina toimii harjaton tasavirtamoottori MXUS 3K V3 (kuva 1). Polkupyörän napamoottorissa on 46 magneettia (23 napaparia), ja se painaa 9,4 kilogrammaa. Siihen on mahdollista asentaa polkupyörissä yleisesti käytössä oleva jarrulevy ja maksimissaan viiden rattaan rataspakka. Moottorille valmistaja lupaa suurimmaksi sallituksi jatkuvaksi virraksi 50 ampeeria, mutta hetkellistä virtaa moottori kestää ainakin 90 ampeeria. Moottorin syöttöjännitealue on 24–120 volttia. Moottorissa on kaksi Hall-anturia asennontunnistusta varten. Niistä tarvitaan käytössä vain yhtä, joten jos käytössä ollut sensori viikaantuu, on toinen vielä varalla.



Kuva 1. MXUS 3K V3.

Sähkömoottorin Kv-arvo 4T-käämityksellä on 8,9 Kv, eli moottori pyörii 8,9 kierrosta minuutissa per sille syötetty voltti. Kv-arvon tietäminen mahdollistaa sähkömoottorin pyörintänopeuden laskemisen, kun sille syötetään tietty jännite. Kun 8,9 Kv:n moottorille syötetään 80 voltin jännite, pyörii moottori ilman kuormaa (kaava 1):

$$8,9 K_v * 80 V = 712 \text{ rpm.} \quad (1)$$

Nyrkkisääntönä voi todeta, että matalan K_v -arvon sähkömoottorissa on enemmän kierroksia staattorikäänissä poikkipinta-alaltaan pienemmällä johtimella, kun taas korkean K_v -arvon sähkömoottorissa on staattorikäänissä vähemmän kierroksia poikkipinta-alaltaan suuremmalla johtimella. [1] K_v -arvosta voidaan laskea moottorille K_t -arvo, joka kertoo, kuinka paljon vääntöä moottori tuottaa sille syötettyä ampeeria kohden (kaava 2):

$$K_t = \frac{9,5478}{K_v} \quad (2)$$

Moottorin K_t -arvo on siis 1,07 Nm/A, eli moottori tuottaa 1,07 newtonmetrin momentin sille syötettyä ampeeria kohden.

3 Moottorinohjain

Harjattoman tasavirtamoottorin moottorinohjain säätää moottorin nopeutta ja vääntömomenttia. Harjattoman tasavirtamoottorin staattorissa on kolmevaiheinen käämitys 120 asteen vaihe-erolla. Moottorinohjain saa tiedon roottorin asennosta moottorissa olevalta Hall-anturilta. Anturidatan ja mikrokontrollerin avulla mosfetit ohjataan kääntämään virta ja syöttämään se oikeaan käämitykseen oikealla hetkellä. Kun käämitykseen syötetään virta, se käämityksessä kulkevan virran suunnasta riippuen joko vetää puoleensa tai hylkii roottorissa olevaa kestopagneetin etelä- tai pohjoisnapaa ja roottori alkaa pyörimään.

Moottorinohjaimeksi valittiin Kelly KLS7218S (kuva 2). Moottorinohjain on suunniteltu harjattomille tasavirtamoottoreille ja se toimii syöttöjännitealueella 18–90 volttia. Sen moottorille syöttämä suurin jatkuva virta on 80 ampeeria ja suurin hetkellinen virta (20 sekuntia) on 200 ampeeria.



Kuva 2. Kelly KLS7218S [2].

Moottorinohjainta pystyy ohjelmoimaan Windows-käyttöjärjestelmälle tehdyllä Kelly KLS Configuration -ohjelman avulla. Ohjelmoitavia parametrejä on paljon, mutta niistä ehkä tärkeimpänä voisi mainita maksimivaihe- ja -akkuvirran sekä regeneratiivisen jarrun käyttöönoton ja virrantuoton maksimiarvon akulle.

4 Akkujärjestelmä

Tässä luvussa esitellään akkujärjestelmää, sen suunnittelua ja rakentamista. Akkujärjestelmään kuuluu tässä projektissa akkukennot, akustonhallintajärjestelmä ja akkulaturi.

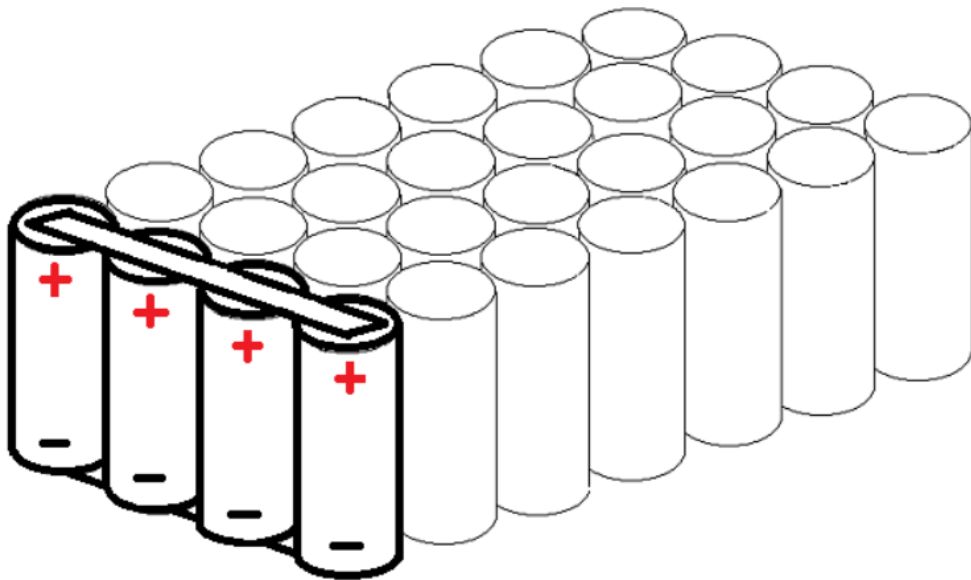
4.1 Akkukennojen valinta

Ennen kuin akkukennot valitaan, pitää tietää, minkälaisia vaatimuksia akulle on. Kennon purku- ja latausteho, energiatiheys, käyttöikä, hinta, turvallisuus ja

ympäristöystävällisyys voivat vaikuttaa kennovalintaan. Kennoja on paljon erilaisia, ja esimerkiksi NMC-akkukemialla toimiva 18650-kenno, jossa on 2800 milliampeeritunnin kapasiteetti, voi kyetä 5 ampeerin purkuvirtaan. Kun sama kenno optimoidaan korkeaan purkuvirtaan, laskee sen kapasiteetti noin 2000 milliampeerituntiin, mutta nyt se kykenee 20 ampeerin purkuvirtaan. [3] Kennojen käyttöikä on hyvä selvittää myös ennen valintaa valmistajan datalehdessä tai muusta luotettavasta lähteestä.

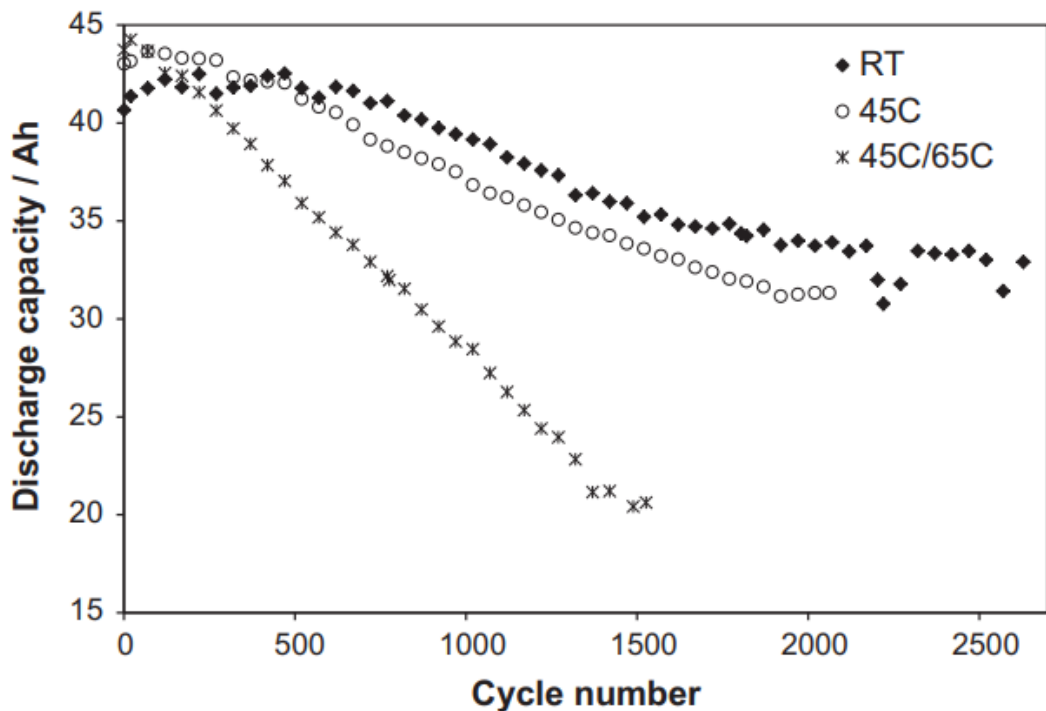
4.2 Akun suunnittelu

Kun useampi kenno yhdistetään rinnan, se toimii kuin yksi isommalla kapasiteetillä oleva kenno. Rinnan olevien kennojen lukumäärä määrittää akun lopullisen kapasiteetin ampeeritunteina sekä sen, kuinka paljon virtaa akku pystyy antamaan. Esimerkiksi kun tässä työssä käytettyjä Samsungin 40T-kennoja yhdistetään neljä rinnan (kuva 3), tulee akun kapasiteetiksi 16 ampeerituntia ja suurin jatkuva purkuvirta on 140 ampeeria.



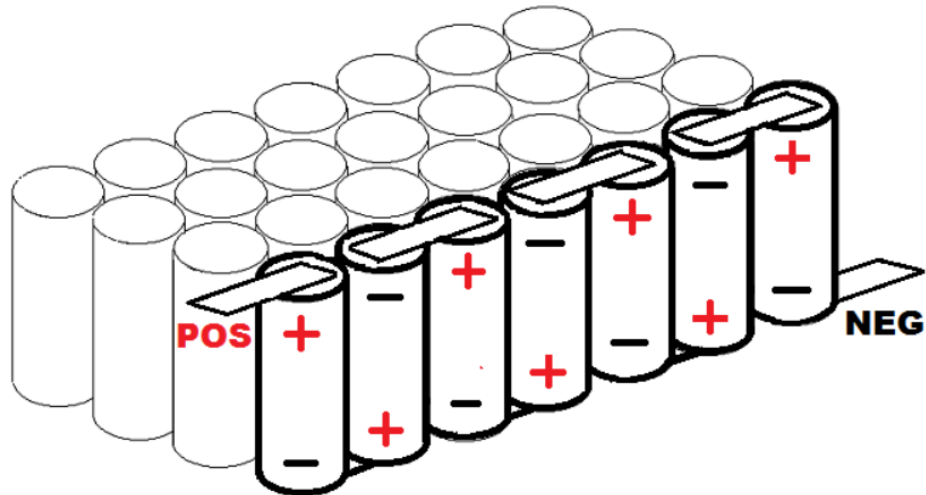
Kuva 3. Neljä kennoa kytkettynä rinnan [4].

Vaikka valmistaja lupaa kennoille suurimmaksi jatkuvaksi purkuvirraksi 35 ampeeria, voi olla kennojen käyttöiän kannalta suotuisaa suunnitella akku niin, ettei kennojen purkuvirta ainakaan jatkuvasti ole maksimin rajoilla. Akkukennot lämpenevät sitä enemmän, mitä niistä otetaan virtaa, ja useimmat kennot lämpenevät reilusti valmistajan sallimissa rajoissa. Samsungin 40T-kennon lämpötila kasvoi testeissä 47 °C ympäristön lämpötilaa suuremmaksi 20 ampeerin purkuvirralla [5]. Korkea lämpötila taas nopeuttaa kennojen ikääntymistä (kuva 4) [6].



Kuva 4. NMC-grafiittikemialla toimivan pussikennon purkukapasiteetin heikkeneminen ympäristön eri lämpötiloissa [6].

Kennojen sarjaan yhdistäminen (kuva 5) kasvattaa akun jännitettä, mutta purkuvirta ja kapasiteetti pysyvät samana. Kennot yhdistetään sarjaan liittämällä kennoryhmän positiivinen napa toisen kennoryhmän negatiiviseen napaan. Tässä työssä rakennetussa akussa kennoryhmiä on 20 sarjassa eli akun minimijännite on 50 V, maksimijännite 84 V ja nimellijännite 72 V.



Kuva 5. Kennot yhdistettynä sarjaan [5].

Akkukennoja hankittaessa tulisi varmistaa, että kennot olisivat mahdollisimman identtisiä keskenään kapasiteetin ja sisäisen vastuksen osalta. Niinpä kennojen tulisi olla saman mallin kennoja ja mielellään samasta valmistuserästä. Kapasiteettiero rinnan olevilla kennoilla aiheuttaa rinnan olevien kennojen välistä virrankulkua. Jos sarjassa olevien kennojen välillä on kapasiteettiero, seuraa siitä kennojen jännitteiden epäbalanssi. Se voi aiheuttaa ongelmia sekä purku- että lataustilanteessa. Jos akustonhallintajärjestelmä ei kykene balansoimaan kennoja tarpeeksi tehokkaasti, se joutuu katkaisemaan latauksen, kun joku kennoista saavuttaa maksimijännitteen. Akustonhallintajärjestelmä joutuu myös purkutilanteessa katkaisemaan virrankulun, jos jokin kennoista on minimijännitealueella, vaikka muut kennot olisivat lähes täydet. Riittää siis, että akussa on yksi epäbalanssissa oleva kenno, että akku on lähes käyttökelvoton.

4.3 Samsung INR21700-40T

Samsung INR21700-40T on Samsung SDI:n Koreassa valmistama sylinterimallinen akkukenno, joka on suunniteltu käytettäväksi kannettavissa IT-laitteissa, sähkötyökaluissa, sairaalalaitteissa, energiavaroistoissa, keskeytymättömissä virtalähteissä, sähköpolkupyörissä, sähköpotkulaudoissa ja muissa sähköajoneuvoissa. Kennon halkaisija on 21 mm ja pituus 70 mm. [7] Akkukennon

mallinimessä INR viittaa akkukemian olevan litium-nikkeli-mangaani-kobolttiok-
sidi (NMC). Litium-nikkeli-mangaani-kobolttiok-
sidi on yksi yleisimmin käytetyistä
litiumtekniikoista sähköajoneuvoissa sen alhaisten valmistuskustannusten ansi-
osta. NMC-kennon muita hyviä puolia ovat sen korkea kapasiteetti ja teho. [3]
Taulukossa 1 esitetään yleistiedot kennosta.

Taulukko 1. Samsung INR21700-40T kennon parametrit [7].

Parametri	Arvo
Tyypillinen kapasiteetti	4000 mAh
Maksimijännite	4,2 V
Nimellisjännite	3,6 V
Minimijännite	2,5 V
Latausjännite	4,2 V
Maksimi latausvirta	6 A
Maksimi jatkuva purkuvirta	35 A
Paino	70 g
Purkulämpötila-alue	-20 - 60°C
Latauslämpötila-alue	0 - 45°C
Akkukemia	LiNiMnCoO ₂
Hinta (eu.nkon.nl 2022)	4,75 €

Taulukossa 2 on esitetty, miten kennon lämpötila vaikuttaa kennon purkukapa-
siteettiin. Taulukosta näkee, että kapasiteetin kannalta optimaalisin lämpötila
kennolle on noin huoneenlämpötila. Kun litiumioniakun lämpötila laskee, li-
tiumioniakun purkautumisessa tapahtuva sähkökemiallinen reaktio hidastuu,
mistä seuraa purkukapasiteetin lasku [8].

Taulukko 2. Lämpötilan vaikutus purkukapasiteettiin [7].

Lämpötila				
-20 °C	-10 °C	0 °C	23 °C	60 °C
60 %	75 %	80 %	100 %	95 %

Taulukossa 4 on esitetty, miten kennon purkuvirran suuruus vaikuttaa kennosta saatavaan kapasiteettiin. Kennon sisäisestä resistanssista johtuva energiahäviö kasvaa purkuvirran kasvaessa. Suurempi purkuvirta aiheuttaa myös kennolle suuremman jännitepudotuksen, jolloin kennon purkautuminen pitää katkaista, vaikka kennossa olisi vielä energiaa.

Taulukko 3. Purkunopeuden vaikutus kapasiteettiin [7].

	Purkuehdot			
Virta	10 A	20 A	30 A	40 A
Suhteellinen kapasiteetti	100 %	95 %	93 %	90 %

Kennon kapasiteettitestaus on tehty 23 °C:n lämpötilassa ja 10 ampeerin virralla kapasiteetti on 3900 mAh, joka on taulukossa 100 prosenttia.

4.4 Akustonhallintajärjestelmä

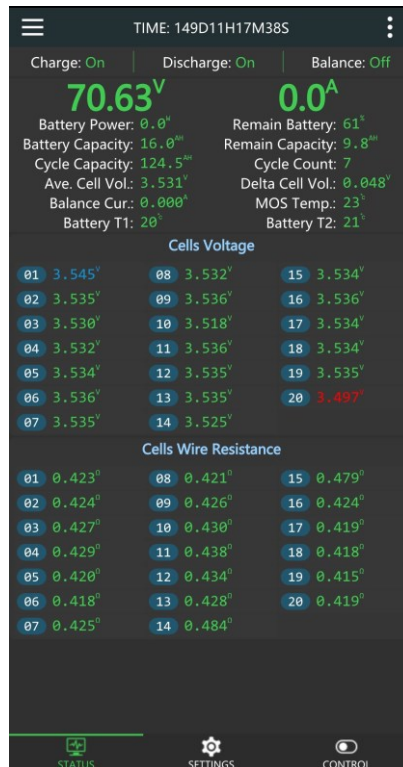
Akustonhallintajärjestelmä (tunnetaan myös nimellä BMS) on litiumioniakkua akun toiminnan ja turvallisuuden kannalta tärkeä osa. Sen tehtäviä ovat muun muassa suojata akkukennoja ali- ja ylijännitteeltä sekä liian suurelta purku- ja latausvirralta, balansoida kennojen jännitteet, estää akun ylikuumentuminen sekä estää akun lataaminen akun ollessa liian matalassa lämpötilassa.

Tähän projektiin akustonhallintajärjestelmäksi valikoitui JiKong BD6A20S8P (kuva 6). Tämä akustonhallintajärjestelmä on tarkoitettu akulle, jossa on 7–20 kennoa sarjassa ja kennojen kemia on litiumioni, LTO tai Lifepo4. BMS:n suurin jatkuva purkuvirta on 80 ampeeria ja balansointivirta 0,6 ampeeria.



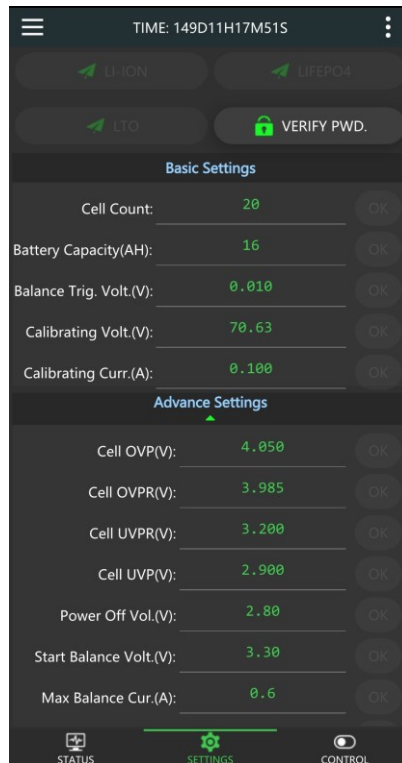
Kuva 6. JiKong BD6A20S8P [9].

Laitteen voi yhdistää Bluetoothin välityksellä älypuhelimeen (kuva 7), josta voi lukea erilaista tietoa akusta, kuten esimerkiksi akun tehon, akun ja yksittäisten kennojen jännitteet, akun lämpötilan sekä BMS:n mosfetien lämpötilan.



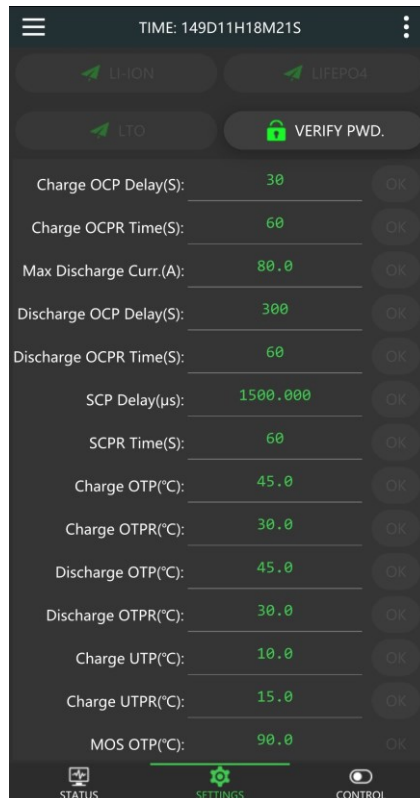
Kuva 7. Älypuhelimella otettu ruudunkaappaus BMS:n kanssa toimivasta sovelluksesta.

Sovelluksella pystyy muuttamaan erilaisia arvoja (kuva 8), jotka vaikuttavat akun toimintaan ja käyttöikäen. Kennoille pystyy asettamaan esimerkiksi itse määritetyn maksimi- ja minimijännitteen, jonka ylittyessä tai alittuessa BMS:n piiri sulkee lataus-mosfetit. Litiumioniakut ikääntyvät nopeammin niiden ollessa lähellä niiden maksimijännitettä, eli lataamalla akun pienempään jännitteeseen voi pidentää akun käyttöikää. Akun pitkäikäisyyden kannalta optimaalinen latausjännite litiumioniakuille olisi 3,92 V. Toisaalta taas alempaan jännitteeseen ladattaessa ei saa käyttöön akun koko kapasiteettia, minkä huomaa ajoneuvon lyhentyneenä toimintasäteenä. [10]



Kuva 8. Kuvankaappaus BMS:n sovelluksesta.

Muita BMS:n muutettavia arvoja ovat suurin sallittu lämpötila latauksen ja purun aikana sekä alin lämpötila latauksen aikana (kuva 9).



Kuva 9. Kuvankaappaus BMS:n sovelluksesta.

Akunhallintajärjestelmän pääpiiri kytketään akun miinusnapaan ja kennojännitteiden vahtimista ja kennojen balansointivirtaa varten kytketään jokaiseen kennoon akunhallintajärjestelmästä johdin. Akunhallintajärjestelmässä on myös kaksi lämpötila-anturia, jotka asennettiin akkuun.

4.5 Akkukennojen yhdistäminen

Yleisesti käytössä oleva tapa on kiinnittää yhteet kennoihin pistehitsaamalla. Yhteiden juottamista kennoihin ei suositella, koska hyvän juotosliitoksen saamiseksi pitää juotoslämpötilan nousta korkeaksi, jopa 370°C:seen, jolloin korkea lämpötila johtuu kennon sisälle ja voi vahingoittaa sitä [11]. Tässä projektissa akkukennojen sarjaan ja rinnan yhdistäminen tehtiin pistehitsaamalla kennojen napoihin nikkeliliuskoja. Nikkeliliuskojen pistehitsaaminen pitää suorittaa huolellisesti, koska nikkeliliuskan irrotessa on vaarana, että irronnut nikkeliliuska

aiheuttaa oikosulun, jolloin akku voi syttyä tuleen. Sopivanmittaisia liuskoja leikattiin kilon painoisesta nikkeli-liuskarullasta (kuva 10).



Kuva 10. Rulla nikkeli-liuskaa [12].

Kennot asetettiin suoriin riveihin ja sarakkeisiin käyttämällä akkukehikkoja (kuva11).



Kuva 11. Akkukehikko 21700-kennolle [13].

Akkukennojen yhdistämiseen käytettäessä nikkelin hyviä puolia ovat sen hyvä korroosionkesto ja hyvä pistehitsattavuus. Huono puoli on nikkelin korkea resistiivisyys verrattuna kupariin. Resistiiivisyys muuttaa sähköenergiaa lämmöksi aiheuttaen tehohäviötä. [11] Nikkeliliuskojen paksuus sekä määrä riippuu akusta otettavasta virran suuruudesta. Akun jännitehäviön ja kennojen yhteiden kuumenemisen minimoimiseksi pitää yhteet mitoittaa riittäviksi. Akusta suunniteltiin otettavaksi maksimissaan 80 ampeerin virta, ja kennoja on neljä rinnan, joten yksittäisestä kennosta kulkee suurimmillaan 20 ampeerin virta. Nikkelin resistiivisyys ρ , 20 °C:n lämpötilassa on $6,84 \cdot 10^{-8}$ ohmimetriä. Nikkeliliuskan leveys on 8 mm ja korkeus 0,15 mm. Liuskoja pistehitsattiin päällekkäin neljä kappaletta, joten poikkipinta-alaksi tulee $4,8 \text{ mm}^2$. Kennojen välisiä liitoksia on yhteensä 19, ja kennojen välinen etäisyys on 23 mm, eli nikkeli-liuskan kokonaispituus yhtä sarjaa kohden on 0,437m. Yhtälöstä 3

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (3)$$

ρ on aineen resistiivisyys
 l on johtimen pituus

A on johtimen poikkipinta-ala
R on johtimen resistanssi

lasketaan kennojen välisten yhteiden resistanssi yhtä sarjaa kohden, josta tulee pyöristettynä 6,2mΩ. Resistanssia käyttäen voidaan laskea kennojen välisten yhteiden hukateho akun maksimivirralla Ohmin lain avulla yhtälöstä 4.

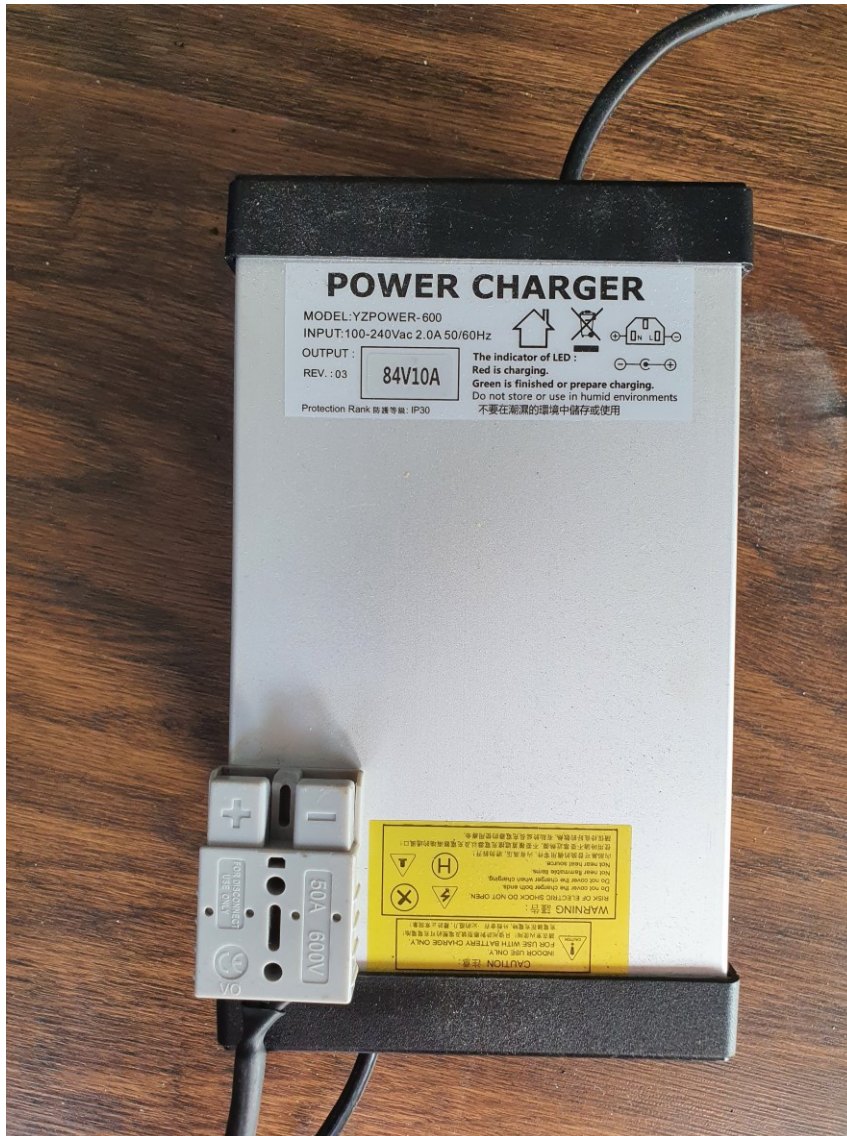
$$P = RI^2 \quad (4)$$

P on teho
I on johtimessa kulkeva virta
R on johtimen resistanssi

Hukatehoksi suunnitellulla maksimivirralla 20 ampeeria per kenno tulee pyöristettynä 2,5 wattia, ja kun se kerrotaan neljällä, saadaan akun kennojen yhteiden kokonaishukatehoksi 10 wattia. Käytännössä kuitenkin hukateho on todennäköisesti suurempi, koska kennoryhmien väliset liitokset eivät ole täysin resistanssittomia.

4.6 Akun lataaminen

Akkua ladataan litiumioniakuille suunnitellulla laturilla (kuva 12). Laturin latausjännite on 84 voltia ja latausvirta 10 ampeeria. Koska kennoja on neljä rinnan, jakautuu latausvirta kennojen kesken tasan eli latausvirta on 2,5 ampeeria kennoa kohden, joka on vielä maltillinen valmistajan ilmoittamaan 6 ampeeriin verrattuna. Tällä latausvirralla akun pitäisi latautua teoriassa tyhjästä täyteen hieman yli puolessatoista tunnissa. Latauspistoke on trukeista tuttu Anderson-liitin.



Kuva 12. Laturi 84 voltia ja 10 ampeeria sekä latauspistoke.

Laturia valittaessa litiumioniakulle on huomioitava laturin latausjännite ja latausvirta. Useimmat litiumioniakut tulee ladata 4,2 volttiin per kenno eli jos akussa on 20 kennoa sarjassa, niin latausjännite on kaavan 4 mukaisesti

$$4,2 V * 20 = 84 V. \quad (4)$$

Ladattaessa litiumioniakkua yli sen maksimijännitteen tulee kennosta epävakaata. Ylilatauksen jatkuessa alkaa kennon sisällä oleva elektrolyytti höyrystyä. Kennon sisäinen paine nousee, ja on vaarana, että kenno räjähtää [12]. Useimpia litiumioniakkuja ei tulisi ladata yli 1 C:n eli 4 ampeeritunnin kennossa se tarkoittaa 4 ampeerin latausvirtaa. Pitää huomioida myös, että litiumioniakkuja tulee ladata niin sanotulla constant current constant voltage -latausmenetelmällä [14].

4.7 Kennojen pakkaus

Kennojen pakkaamisen tarkoituksena on eristää akku sähköisesti sekä estää akkuun menemästä vettä ja muita vierasesineitä. Pakkaamisella myös suojataan akkua iskuilta sekä tärinältä. Akun paljaat yhteydet eristettiin Kapton-teipillä. Kapton-teippiä käytetään laajasti elektroniikan alalla ja sähköeristeenä esimerkiksi muuntajissa, sähkömoottoreissa ja keloissa. Sen ominaisuuksiin kuuluu korkean lämpötilan kesto ja korkea resistiivisyys, joten se on hyvä sähköeriste [15]. Akku käärittiin sitten kumimattoon, jonka tarkoituksena on suojata akkua tärinältä ja pieniltä iskuilta. Lopuksi akun päälle laitettiin lämmittämällä kutistettava PVC-kutistemuovi, joka suojaa akkua hyvin vedeltä ja vierasesineiltä.

4.8 Litiumioniakut ja lainsäädäntö

Litiumioniakuille ei ole tällä hetkellä yleisiäkään turvallisuusvaatimuksia. Akkuihin liittyvä keskeisin lainsäädäntö on akkudirektiivi (Valtionneuvoston asetus 520/2014), jonka tarkoituksena on mm. edistää akkujen kierrätystä ja estää vaarallisten aineiden käyttöä akuissa. Akkudirektiivi ei siis ole akkujen turvallisuuden liittyvä direktiivi, eli siinä ei huomioida turvallisuutta akkujen käytön aikana [16].

4.9 Kennojen jäähdytys ja lämmitys

Kennoille ei suunniteltu erillistä jäähdytystä tai lämmitystä. BMS-sovelluksen avulla voi valita lämpötilan ylärajan, jolloin BMS katkaisee akkujen

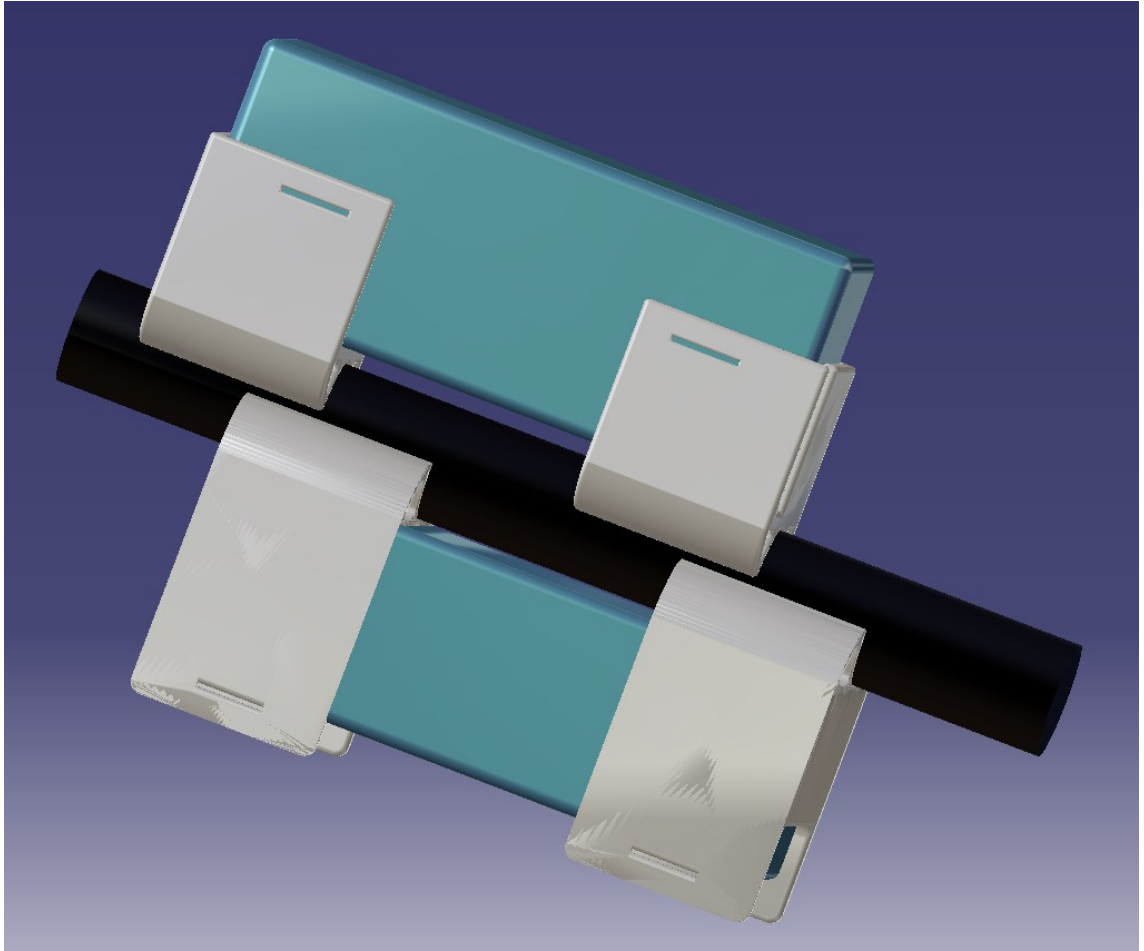
purkautumisen, joka estää akkujen ylikuumentumisen. Pitää kuitenkin huomioida, että lämpötila-anturit ovat asennettu keskelle akkuja, joten on mahdollista, että yksittäinen kenno voi ylikuumentua. BMS pitää myös huolen, että akkua ei ladata akun ollessa liian matalassa tai korkeassa lämpötilassa. BMS siis estää myös regeneratiivisen jarrun käytön akun lämpötilan ollessa liian matala. Kuluttajille yleisesti käytössä olevia litiumioniakkuja ei tulisi ladata niiden lämpötilan ollessa alle 0 °C. Litiumioniakun lataaminen alle 0 °C:n lämpötilassa aiheuttaa metallisia litiummuodostumia anodin ympärille, mikä huonontaa akun suorituskykyä ja lyhentää sen käyttöikää [17].

5 Pyörän rakenne

Pyörän rakenteesta käsitellään eniten akun sijoitusta ja kiinnitystä polkupyörän runkoon. Suurehkon akun mahduttaminen polkupyörän runkoon loi haastetta, mutta lopputuloksesta tuli hyvä suureksi osaksi 3D-tulostuksen ansiosta.

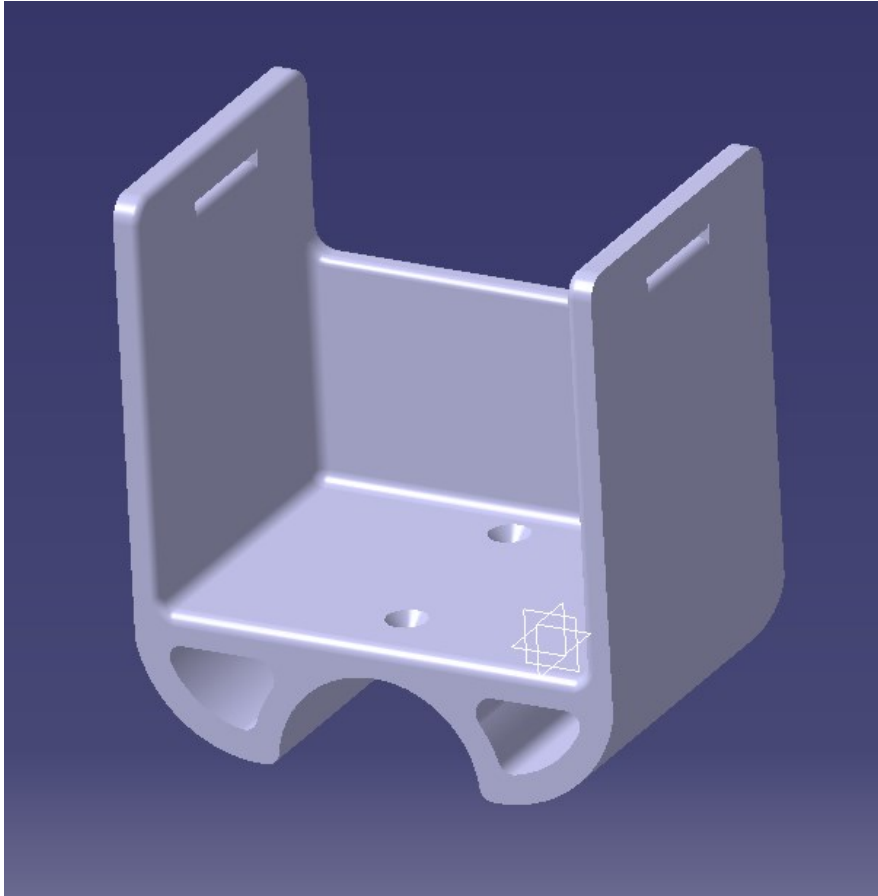
5.1 Akun sijoitus ja kiinnitys

Akusto pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman matalalle pyörään, jotta pyörän painopiste säilyisi matalalla eikä pyörän ajettavuus kärsisi. Niinpä akku jaettiin kahteen osaan ja akut kiinnitettiin polkupyörän runkokolmion alemman putken ylä- ja alapuolelle (kuva 13). Kokoonpanosta mallinnettiin prototyyppi Catialla.



Kuva 13. Akut mallinnettuna Catialla.

Akun kiinnittämiseksi pyöreään runkoputkeen tarvittiin jonkinlainen kannatin. Se tehtiin 3D-mallintamalla (kuva 14) ensiksi sopivat osat käyttäen Catia V5 -ohjelmaa, minkä jälkeen osat tulostettiin 3D-tulostimella käyttäen PETG-filamenttia. Kannakkeet pultattiin runkoon kiinni ja varmistukseksi laitettiin vielä sidontaliinat pitämään akut hyvin kiinnitettyinä.



Kuva 14. 3D-mallinnettu akunkannatin.

PETG-muovin hyviä puolia ovat sen kestävyys ja kemikaaliresistanssi. Huonona puolena sen melko matala käyttölämpötila (51–64 °C) [18].

5.2 Napamoottori

Napamoottorin akselin paksuus on 14 millimetriä, mutta akseliin on leikattu tassaiset sivut, joiden väli on 10 millimetriä, niinpä akseli mahtuu normaaliin polkupyörän takahaarukkaan. Napamoottorin akselissa kiinni olevasta pelistä tehtyyn osaan on tehty akselin muotoinen reikä ja osan tarkoitus on estää akselia pyörrähtämästä polkupyörän haarukassa (kuva 15).



Kuva 15. Napamoottorin akseli ja niin sanottu torque arm.

Tämä akselin pyörähtämistä estävä osa tunnetaan englanniksi nimellä torque arm. Akselin paikallaan pysyminen on ongelma erityisesti silloin, kun napamootorista otetaan enemmän vääntömomenttia ja kun käytössä on regeneratiivinen jarru, jolloin akseliin kohdistuu vääntömomenttia molempiin pyörimissuuntiin.

5.3 Valot 5 V

Polkupyörän valojen energialähteenä oli toimittava pyörän ajoakku. Niinpä ajoakun jännitettä piti laskea DC-DC muuntajan (kuva 16) avulla led-valoille sopivaksi. Näin ei ole ylimääräisiä ladattavia akkuja tai paristoja valoja varten.



Kuva 16. Step-down DC-DC-muunnin [19].

Käytössä olevan muuntajan sisääntulojännite voi olla 16–90 voltia ja ulostulossa on 5 voltia. Muuntimesta voi ottaa suurimmillaan 3 ampeerin virran.

6 Lopputulos

Lopputuloksesta tuli odotettua parempi. Sähköpolkupyörän toimintamatka on polkematta kesällä jopa 100 kilometriä, kun ajonopeus on maksimissaan 25 kilometriä tunnissa. Painoa pyörällä on noin 35 kilogrammaa. Pyörä on ollut erittäin toimintavarma, eikä se ole jättänyt tielle kertaakaan. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä on pyörällä ajettu 4500 kilometriä. Pyörään asennettiin kytkin, josta saa pyörän tehon ja huippunopeuden katulaillisiksi ja muualla kuin yleisillä teillä ajattaessa täydet tehot. Regeneratiivinen jarru on osoittautunut erittäin

tarpeelliseksi, koska sitä käytettäessä polkupyörän omia jarruja ei tarvitse käyttää lähes lainkaan. Raskaan pyörän ja staattorin sisältämän pyörimisenergian takia jarrupaloja joutuisi vaihtamaan kaupunkiajossa tiuhaan tahtiin ilman regeneratiivista jarrua. Sähkömoottori on lähes äänetön, mikä tekee ajamisesta mukavaa. Tosin kiihdyttäessä moottori aiheuttaa tärinää, joka voi tuntua epämu- kavalta, mutta tärinää ei synny enää vauhdissa.

Lähteet

- 1 Understanding kv ratings. Verkkoaineisto. Rotordronepro. <<https://www.rotordronepro.com/understanding-kv-ratings/>>. Luettu 25.4.2022.
- 2 Kelly KLS7218S. Verkkoaineisto. Aliexpress. <<https://www.aliexpress.com/item/32811686999.html>>. Luettu 25.4.2022
- 3 Types of lithium-ion. Verkkoaineisto. Batteryuniversity. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>. Luettu 14.3.2022.
- 4 Introduction to battery pack design and building. Verkkoaineisto. Electricbike.com. <<https://www.electricbike.com/introduction-battery-design-1/>>. Luettu 10.3.2022.
- 5 Samsung INR21700-40T. Verkkoaineisto. Lygte.<[https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Samsung%20INR21700-40T%204000mAh%20\(Cyan\)%20UK.html](https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Samsung%20INR21700-40T%204000mAh%20(Cyan)%20UK.html)>. Luettu 23.4.2022.
- 6 Cycle aging of commercial NMC/graphite pouch cells at different temperatures. Verkkoaineisto. Google scholar.<https://scholar.google.fi/scholar_url?url=https://www.academia.edu/download/78028126/xue-balib.com.47646.pdf&hl=fi&sa=X&ei=2SIAYs5Sg5CYAbrGpIAM&scisig=AGBfm3lk5QRxhCFE9efDC9owtqBr8DCSw&oi=scholar>. Luettu 20.4.2022.
- 7 Samsung INR21700-40T Datalehti. Verkkoaineisto. Dnkpowers. <<https://www.dnkpowers.com/wp-content/uploads/2019/02/SAMSUNG-INR21700-40T-Datasheet.pdf>>. Luettu 19.4.2022.
- 8 Why lithium-ion batteries are terrible in cold. Verkkoaineisto. Autoevolution. <<https://www.autoevolution.com/news/lithium-ion-batteries-deconstructed-why-they-are-terrible-in-the-cold-139456.html>>. Luettu 23.4.2022.
- 9 JiKong BMS. Verkkoaineisto. Aliexpress. <<https://www.aliexpress.com/item/4001192978656.html>>. Luettu 5.4.2022.
- 10 How to prolong lithium based batteries. Verkkoaineisto. Batteryuniversity <<https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>>. Luettu 15.3.2022.

- 11 Introduction to battery pack design and building. Verkkoaineisto. Electricbike.com. <<https://www.electricbike.com/introduction-battery-design-2/>>. Luettu 11.3.2022.
- 12 0,15x8 mm Pure Nickel Strip. Verkkoaineisto. Amazon.de. <https://www.amazon.de/gp/product/B075FL8D59/ref=ppx_yo_dt_b_asin_title_o01_s00?ie=UTF8&th=1>. Luettu 14.3.2022.
- 13 21700 lithium cell spacer. Verkkoaineisto. u-buy. <<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.u-buy.com.tw%2Fen%2Fproduct%2FZDA08TT0-fielect-50pcs-21700-lithium-cell-spacer-triple-battery-holder-bracket-battery-pack-bracket-for-diy-f&psig=AOvVaw0zZmp4JTvNC-jfO7JAIsCq&ust=1648805339473000&source=images&cd=vfe&ved=0CAsQjRxqFwoTCOCsu9qE8PYCFQAAAAAdAAAA-BAD>>. Luettu 15.3.2022.
- 14 How to choose a charger for your battery. Verkkoaineisto. Vruzend. <<https://vruzend.com/how-to-choose-a-charger-for-your-battery/>>. Luettu 16.4.2022.
- 15 Polyamide ans kapton tape. Verkkoaineisto. Strouse. <<https://www.strouse.com/blog/polymide-and-kapton-tape>>. Luettu 18.3.2022.
- 16 Opas teollisuuden litiumioniakkujen turvalliseen käyttöön. Verkkoaineisto. Tukes. <<https://tukes.fi/documents/5470659/8237195/Opas+teollisuuden+litiumioniakkujen+turvalliseen+k%C3%A4ytt%C3%B6%C3%B6n/c5c7fefe-7979-4344-ba25-ba18a6f9f234/Opas+teollisuuden+litiumioniakkujen+turvalliseen+k%C3%A4ytt%C3%B6%C3%B6n.pdf>>. Luettu 20.4.2022.
- 17 Charging at high and low temperatures. Verkkoaineisto. University. <<https://university.com/article/bu-410-charging-at-high-and-low-temperatures>>. Luettu 16.3.2022.
- 18 PETG. Verkkoaineisto. Dielectricmfg. <<https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg/>>. Luettu 15.4.2022.
- 19 DC-DC step down module. Verkkoaineisto. Aliexpress. <https://www.aliexpress.com/item/33014367277.html?spm=a2g0o.order_list.0.0.a0c618029jK1F>. Luettu 20.4.2022.