



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

HARJATTOMAN TASA-VIRTAMOOTTORIN OHJAIN

Simo Sihvonen

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2017
Tietotekniikka
Sulautetut järjestelmät



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutus

SIHVONEN, SIMO
Harjattoman tasavirtamoottorin ohjain

Opinnäytetyö 32 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Maaliskuu 2017

Opinnäytetyössä käsitellään harjattoman tasavirtamoottorin moottorinohjaimen rakentamista ja kehitystä. Yleistyvissä sähköajoneuvoissa käytettiin ennen harjallisia moottoreita, mutta ne on yhä useammin korvattu harjattomilla vaihtoehdoilla. Harjattomalla moottorilla on selviä etuja perinteiseen harjalliseen toteutukseen nähden, joista tärkeimpiä ovat: hinta, koko/teho-suhde ja pitkäikäisyys. Harjaton moottori tarvitsee moottorinohjaimen, jotta sitä voitaisiin käyttää ja tämä opinnäytetyö käsittelee kyseisen ohjaimen kehitystä, käyttöä ja jatkokehitystä.

Moottorinohjaimen suunnittelu ja kehitys aloitettiin yksinkertaisesta prototyypistä, jota kehitysversio kerrallaan paranneltiin seuraavaan versioon, kun puutteita alkoi esiintymään. Tässä opinnäytetyössä on esitelty viisi eri kehitysversiota, mutta ohjainta on jatkokehitetty näidenkin versioiden jälkeen eteenpäin. Jokaisesta versiosta on kirjoitettu oma kappaleensa, joka kuvaa kunkin kehitysversion haasteita, muutoksia ja toteutusta.

Moottorinohjainten kehitysversioita testattiin koe- ja kehityskäyttöön muunnelluilla mekaanisilla alustoilla, eli kevyen liikenteen kulkuneuvoilla, joita oltiin muunneltu sähkökäyttöisiksi. Moottorinohjaimen kehityksen ohessa tehtiin muutoksia ja parannuksia mainittuihin mekaanisiin alustuihin, niissä ilmenevien heikkouksien ja puutteiden perusteella. Moottorinohjaimen viimeistä opinnäytetyössä tarkasteltua versiota käytettiin sähkökäyttöön muunnetussa rullalaudassa, jolla ajettiin testikäytössä useita satoja kilometrejä. Moottorinohjain toimii yksinkertaisella, mutta käytön sulavuutta rajoittavalla ohjelmakoodilla. Käytön aikana todettiin muitakin puutteita ja kehitystarpeita, sekä diagnostiikan tarvetta tuleviin versioihin.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in IT-technology

SIHVONEN, SIMO
Brushless DC motor controller

Bachelor's thesis 32 pages, from which attachments 0 pages
March 2017

The Thesis deals with the building and development of a brushless DC motor controller. The ever increasing amount of electric vehicles used to use brushed motors before, but they are increasingly being replaced by brushless options. Brushless motors have distinct advantages over traditional brushed ones with respect to their implementation, of which the most important are: price, size / power ratio and longevity. Brushless motors need a motor controller for them to be usable and this thesis deals with the development, use and further development of the controller.

The design and development of the motor controller was started from a simple prototype, which was then improved over the controller versions as weak links and other deficiencies came to light. In this thesis there are shown a total of 5 different development versions of the motor controller, but the development has since been continued to newer prototypes. Every controller version has its own sub-chapters dedicated to each of them, which detail the challenges, changes and implementations associated with the particular version.

The different motor controller prototypes were tested with light pedestrian vehicle platforms modified for testing and development use. Along with the changes between the motor controller prototypes, the mechanical test platforms were changes, further modified and improved as the weak parts were discovered. The Last examined motor controller shown in the thesis, was used in a modified longboard converted to electric use, was run in testing use for several hundreds of kilometers. The motor controller is simple, but the very basic nature of its control algorithm is limiting to the use of the board. During operation, there are other lacking areas and development needs that were found, as well as the need for diagnostics in future versions.

Key words: motor controller, dc, brushless, esc

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	MOOTTORITEORIA.....	6
2.1	Mekaaninen rakenne.....	6
2.2	Moottorin kommutointi	9
3	MOOTTORINOHJAIMEN KEHITYS	13
3.1	1. Prototyyppi	13
3.2	2. Prototyyppi	14
3.3	3. Prototyyppi	16
3.4	4. Prototyyppi	18
3.5	1. Kehitysalusta	19
4	KÄYTTÖSOVELLUS.....	22
5	JATKOKEHITYS.....	28
6	YHTEENVETO.....	30
7	LÄHTEET	31

1 JOHDANTO

Nykypäivän yleistyvissä sähköautoissa ja muissa sähköajoneuvoissa käytetään entistä enemmän harjattomia moottoreita. Harjattomilla moottoreilla on selkeitä etuja niiden vanhempiin ja perinteisiin harjallisiin versioihin verrattuna, kuten valmistuskustannukset, teho-tilavuus -suhde ja mekaaninen elinikä. Huonona puolena niissä taas on, että toisin kuin harjallisten moottorien yksinkertaiset moottorinohjaimet, harjattomat moottorit tarvitsevat monimutkaisemman moottorinohjaimen, että ne toimivat. Moottorinohjainteknologia on kehittynyt viime vuosina merkittävää vauhtia niiden suorituskyvyn ja valmistuskustannuksien pienentymisen vuoksi. Ohjainten prosessointiteho ja tehoelektroniikka ovat mahdollistaneet nopeampien ja suurempi tehoisten moottorien käytön sähköajoneuvoissa, mikä mahdollistaa suuremmat kiihtyvyydet ja huippunopeudet, sekä kuluttajaluokan ajoneuvoissa paremman hyötysuhteen ja näin pidemmän ajomatkan.

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi käytännönläheistä tutustumis- ja kehitystapaa harjattoman moottorin moottorinohjaimelle. Kehitys aloitettiin mahdollisimman yksinkertaisesta versiosta, jota versio kerrallaan kehitettiin eteenpäin vikoja ja ominaisuuksia korjaten. Jokaisesta kehitysversiosta on annettu niiden omissa kappaleissaan kuvaukset minkä takia versio rakennettiin, mitä sillä pyrittiin saavuttamaan ja toteuttamaan, sekä testauksen pohjalta saatujen tuloksien perusteella korjattavia asioita ja muutoksia seuraavaan moottorinohjaimen versioon. Päämääränä ei ollut kehittää ja rakentaa kuluttajaluokan tuotetta, vaan tutustua moottorinohjaimiin yksinkertaisten prototyyppien kautta. Lopputuloksena kehitetty moottorinohjain oltiin sijoitettu itsesuunniteltuun ja -rakennettuun sähkörullalautaan, jolla ajettiin testaustarkoituksessa useita satoja testikilometrejä.

2 MOOTTORITEORIA

2.1 Mekaaninen rakenne

Tämän opinnäytetyön sovelluksessa käsitellään ja käytetään kolmella vaiheella toimivaa harjatonta tasavirtamoottoria (BrushLess Direct Current, BLDC). Moottoreita on olemassa myös yhdellä ja kahdella vaiheella toimivia. Harjaton moottori voidaan jakaa kahteen pääkomponenttiin; staattoriin ja roottoriin. Staattori on paikallaan pysyvä osa ja roottori on pyörivä osa, joka on liitetty moottorin akseliin, josta kineettinen energia viedään tarvittavaan paikkaan tai vaihtoehtoisesti generaattoritoiminnassa tuodaan akselilta roottoriin. Moottoreita on kahdella erilaisella mekaanisella konfiguraatiolla: inrunner ja outrunner. Inrunner-konfiguraatiossa roottorin magneetit ovat staattorin sisäpuolella ja outrunner-konfiguraatiossa ne ovat staattorin ulkopuolella. Tämä mekaaninen ero muuttaa moottorin tuottamaa vääntöä ja maksimi pyörimisnopeutta.

Staattori on mekaanisesti yksinkertainen osa. Se koostuu vaihtelevasta määrästä ohuita staattorilaminaatteja, joita on ladottu tarpeeksi monta päällekkäin, niin että ne fyysisesti muodostavat oikean korkuisen pinon. Irtonaisia staattorilamineetteja on esitetty kuvassa 1. Laminaattien määrä ja paksuus riippuu staattorin pituudesta ja laadusta. Staattorilaminaatit on valmistettu “sähköteräksestä”, eli ne ovat erikoisseosta, joka sisältää teräksen lisäksi piitä. Piin lisääminen kasvattaa seoksen resistanssia, parantaa magneettivuoiden tunkeutumista sen läpi ja tärkeimpänä ominaisuutena se pienentää teräksen hystereesiä, eli magneettikentät pystyvät muodostumaan nopeammin (Polaris Laser).

Latomisen jälkeen laminaatit liimataan yhteen epoksimassalla, kuten kuvassa 2. Laminaatit ovat galvaanisesti toisistaan erotettuja, jotta Eddy-virroista johtuvat häviöt saadaan mahdollisimman pieniksi. Huonompilaatusissa moottoreissa staattorit voivat olla tehty paksummista laminaateista tai huonommista seoksista, mitkä johtavat suurempiin lämpöhäviöihin.

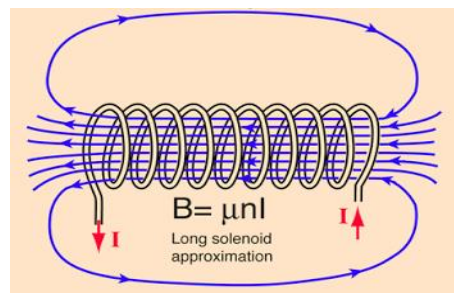


Kuva 1. Irtonaisia staattorilaminaatteja Inrunner-moottorista. (Polaris Laser Laminations)

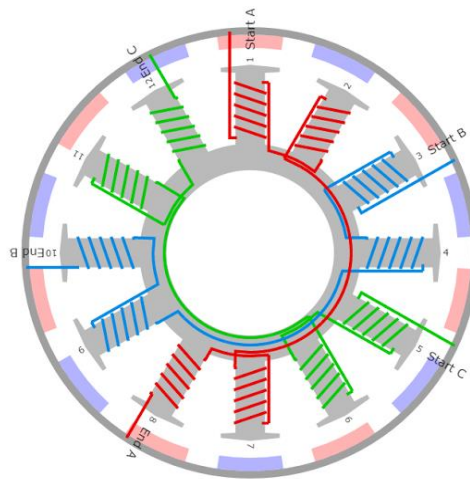


Kuva 2. Puretun moottorin staattori ja vihreä epoksiliima.

Sähköiseltä näkökannalta, kootun staattorin toiminta on helppo rinnastaa rautasydämiseen solenoidiin. Tosin toisin kuin solenoidissa, staattorissa on tarkoitus synnyttää magneettikenttä ja ohjata se staattorihammasta pitkin roottorin kestmagneettien luokse. Solenoidin toiminta on kuvattu kuvassa 3. Staattorin käämit luovat staattorihampaan pinnalle, joko magneettisen pohjois- tai etelänavan riippuen siitä mihin suuntaan virta kulkee ja miten päin käämi on käämitty. Kuvassa 4 on esitetty perinteinen kuvan 2 tapaisen, 12 staattorihampaisen ja 14 magneettinapaisen moottorin mekaaninen käämitys.

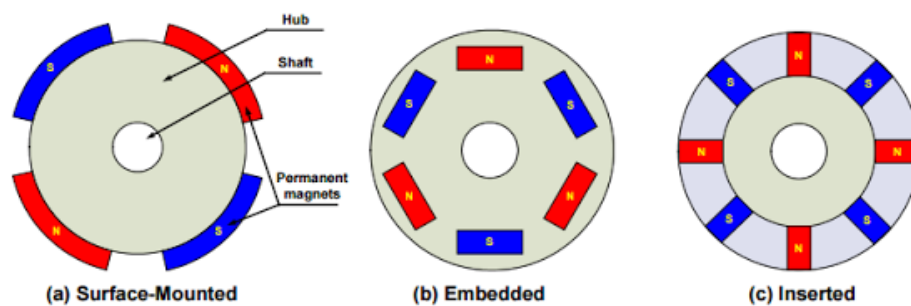


Kuva 3. Solenoidi ja sen synnyttämä magneettikenttä virran seurauksena. (Hyperphysics)

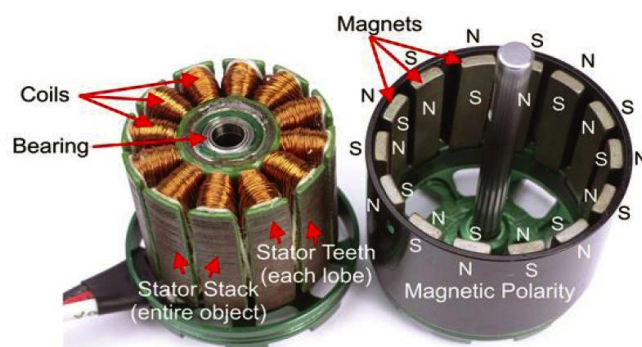


Kuva 4. 12 Staattorihampaisen ja 14 magneetinapaisen moottorin käämit jokaiselle vaiheelle. (Felix Nielsen)

Staattorista voi muodostaa seuraavanlaisen yksinkertaisen yhteenvedon; Mekaanisesti kasa staattorilaminaatteja, jotka on liimattu yhteen useasti epoksipohjaisella liimamassalla, kun taas sähköisesti staattorihampaat ovat sähkömagneetteja, joiden luoma magneettikentän vahvuus voidaan johtaa solenoidin yhtälöistä.

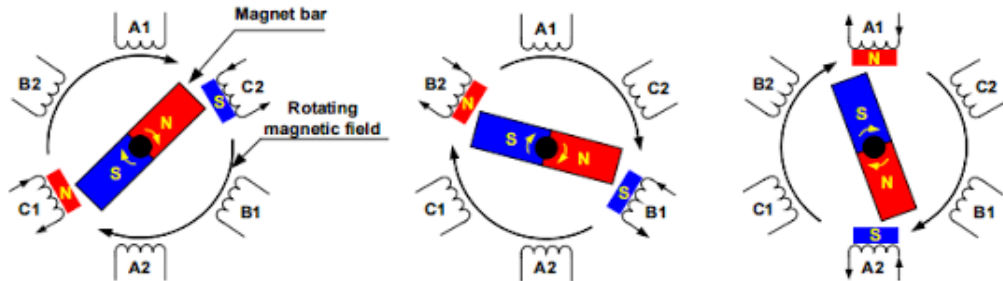


Kuva 5. Eri tapoja kiinnittää magneetteja roottoriin. (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011a)



Kuva 6. Havainnekuva staattorista ja roottorista. (Sam, DroneTest, 2014)

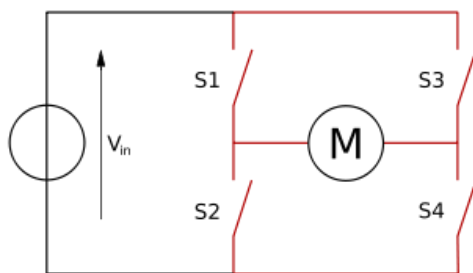
Sähköiseltä ja magneettiselta näkökannalta staattori on moottorin aktiivinen osa, koska moottorinohjain muuttaa moottorin käämien kautta kulkevien virtojen suuruuksia ja suuntia, joilla luodaan, muutetaan ja ohjataan magneettikenttiä, joiden kanssa roottorissa olevat kestopagneetit ovat vuorovaikutuksessa.



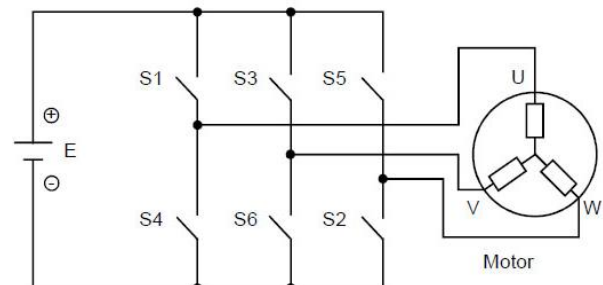
Kuva 7. Energisoitujen moottorikämmien ja kestopagneettien vuorovaikutus. (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011b)

2.2 Moottorin kommutointi

Moottorin kommutoinnilla tarkoitetaan tekniikkaa ja logiikkaa, kuinka moottori saadaan pyörimään. Oleellisena erona harjallisen ja harjattoman moottorin kommutoinnissa on moottorinohjaimen transistorilogiikan rakenne. Harjallisessa moottorissa se on yksinkertaisempi, koska harjallisen moottorin mekaaninen kommutaattori hoitaa staattorin luoman magneettikentän oikeassa asennossa pitämisen, kun taas harjattomassa moottorissa synnytettyä magneettikenttää ohjataan päätteesten transistoreilla. Yksinkertaistettu H-silta kytkentä harjallisen moottorin ohjaukseen on esitetty kuvassa 8.1 ja yksinkertaistettu universaali päätteeste harjattomille moottoreille on esitetty kuvassa 8.2.



8.1 (Wikipedia, 2016)



8.2 (Gozuk, 2016)

Kuvat 8.1-2: H-silta ja 3-vaihe silta.

Harjattomilla moottoreilla on silti selkeitä etuja harjallisiin moottoreihin nähden, joista oleellisimpia ovat pienemmät valmistuskustannukset yksinkertaisemman rakenteen takia, suurempi teho-paino ja teho-koko suhde kommutaattorin puutteen vuoksi ja periaatteellisesti loputon elinikä harjojen puuttumisen vuoksi. Ainoa huoltoa tarvitseva osa koko moottorissa ovat akselilaakerit. Lisäetuna moottori on myös hyötysuhteeltaan parempi ja se ei säteile yhtä paljon häiriötä ympäristöön, toisin kuin harjallinen moottori, jonka kommutaattorilla harjat aiheuttavat pieniä valokaaria liukuessaan kontaktien välillä, lähettäen RF-taajuista hurinaa.

Harjattoman moottorin ohjain voi toimia ilman takaisinkytkentää, mutta useimmiten ne käyttävät jotakin takaisinkytkentää. Ohjaimet voivat olla anturillisia tai anturittomia, mutta silti takaisinkytkennällisiä. Anturillisten ohjaimien moottoreihin on usein kytketty erillisiä ulkoisia antureita, jotka antavat moottorinohjaimelle lisätietoa moottorista, useimmiten roottorin asennosta, kun taas anturittomissa ohjaimissa moottori kytketään suoraan ohjaimen ja tarvittava lisätieto moottorista tutkitaan transistoripäätteen jännitteistä ja virroista. Anturiton ohjain ei siis olekaan oikeasti anturiton, mutta koska ainoa kytkentä moottorin ja ohjaimen välillä ovat moottorin kolme vaihejohtoa, niin ohjainta kutsutaan anturittomaksi. Anturillisissa ohjaimissa anturit ovat joko hallantureita moottorin sisällä tai ulkopuolella lukemassa roottorin kestopagneettien magneettikenttiä tai pulssianturi moottorin akselilla lukemassa roottorin asentoa. Esimerkkikuvat anturillisesta ja anturittomasta ohjaimesta on esitetty vastaavasti kuvissa 9.1 ja 9.2.



9.1 (Hobbyking, 2016a)

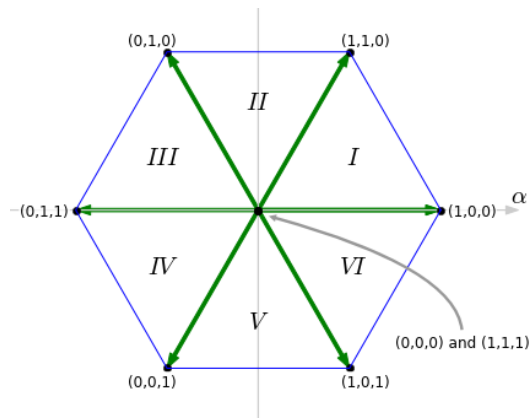


9.2 (Hobbyking, 2016b)

Kuvat 9.1-2: anturiton ja anturillinen moottorinohjain.

Moottorinohjaimet voivat myös erota niiden käyttökohteiden perusteella. Anturittoman ohjaimen suurin ongelma on, että se ei pysty lukemaan moottorin roottorin asentoa, jos moottori ei pyöri tarpeeksi nopeasti. Tämä ero selittää miksi kauko-ohjattavissa lennokeissa ja helikoptereissa lähes poikkeuksetta käytetään anturittomia ohjaimia, kun taas autokäyttöön on saatavilla anturillisia ohjaimia. Lentävissä kauko-ohjattavissa moottorit eivät yleensä pyöri matalilla kierroksilla, vaan minimivauhtikin on tarpeeksi korkea, että moottorin tuottamat EMF-jännitteet ovat tarpeeksi korkeat moottorinohjaimelle luettaviksi. Autokäytössä auto voi liikkua erittäin hitaas eteenpäin tai taaksepäin, jolloin pelkästään moottorin matalista EMF-jännitteistä on vaikeaa selvittää roottorin asentoa ja siitä seuraten kuinka ohjata staattorin magneettikenttää. Anturit antavat roottorille jonkin absoluuttisen asennon nopeudesta riippumatta ja moottoria voidaan pyörittää erittäin hitaastikin.

Moottorin kommutointilogiikassa käytetään kahta eri tyyppistä toteutusta. Kuutta eri kiinteä transistoritilaa käyttävää yksinkertaista perusohjausta, joka tuottaa puolisuunnikasta ohjausjännitettä ("DC brushless") tai parempaa ja monimutkaisempaa siniaaltoa simuloivaa transistorilogiikkaa, joka tuottaa sinimuotoista ohjausjännitettä ("AC brushless"). Halvat ja yksinkertaiset ohjaimet käyttävät yleensä kuutta eri kiinteää transistorien johtotilaa, joiden välillä vaihdetaan roottorin asennon mukaan. Tiloja muutetaan kun moottorin roottori siirtyy seuraavalle kommutointisektorille, jotka on esitetty roomalaisin numeroin avaruusvektorikuvassa 10. Anturittomassa ohjaimessa roottorin sektorin muutos pystytään tunnistamaan mitattujen EMF-jännitteiden perusteella tai anturillisessa ohjaimessa suoraan hall-anturien tilojen perusteella. Isompien ja tehokkaampien moottorien ohjaimet käyttävät siniaaltomuotoista ohjausta paremman hyötysuhteen ja ohjauksen lineaarisuuden saavuttamiseksi, mutta siniaaltomodulaatio tarvitsee toimiakseen paremman roottorin asennon resoluution. Tämän takia suuremmissa moottoreissa on yleensä integroitu pulssianturi, jolla roottorin asento saadaan suuremmalla tarkkuudella mitattua. Lisäksi täytyy ottaa huomioon kuinka monta magneettinapaa moottorissa on, koska tämä on suoraan yhteydessä mekaanisten kierroksien ja sähköisten kierroksien suhteeseen. Esimerkkinä viisi napainen moottori tarvitsee tehdä viisi sähköistä kierrosta yhtä mekaanista kierrosta kohden. Tämä ominaisuus lisää tarvittun roottorin asennon resoluution määrää, mutta yleinen sääntö on että jos sähköisen asennon saa mitattua yhden asteen tarkkuudella, niin siniaaltomodulaatio onnistuu.



Kuva 10. Kolmivaihemoottorin avaruusvektorikuvaaja. (Microchip, 2016)

Tämän opinnäytetyön moottorinohjain käyttää puolisuunnikasta ohjausjännitettä ja anturillista takaisinkytkentää hall-antureilla, joten hall-anturien sijoitus moottorin ympärille on kriittinen osa toteutusta. Hall-antureiden sijoituksessa on kaksi osa-aluetta; Hall-antureiden etäisyys toisiinsa nähden ja niiden absoluuttinen sijainti moottorin staattoriin nähden. Perinteinen ja varma tapa on sijoittaa hall-anturit 120 asteen välein moottorin ympärille. Tämä konfiguraatio toimii moottorin napamäärästä riippumatta, mutta huonona puolena se tarvitsee paljon tilaa, koska anturit ovat joka puolella moottoria. Sitten on toinen tapa, joka on riippuvainen moottorin napamäärästä, eli sitä ei voida käyttää ristiin toisen moottorin kanssa, jossa on eri määrä magneettinapoja, mutta sillä saadaan hall-anturit sijoitettua lähemmäs toisiaan ja näin voidaan käyttää pienempää piirilevyä anturien kiinnitykseen. Hall-anturien välinen kulma voidaan laskea yhtälöllä (1) magneettinapojen funktiona ja sen pohjalta luotu taulukko 1.

$$\alpha = \frac{360^\circ}{n * 3} \quad (1)$$

Taulukko 1. Hall-anturien välinen kulma magneettinapojen määrän funktiona

n	$\alpha / ^\circ$
1	120
2	60
3	40

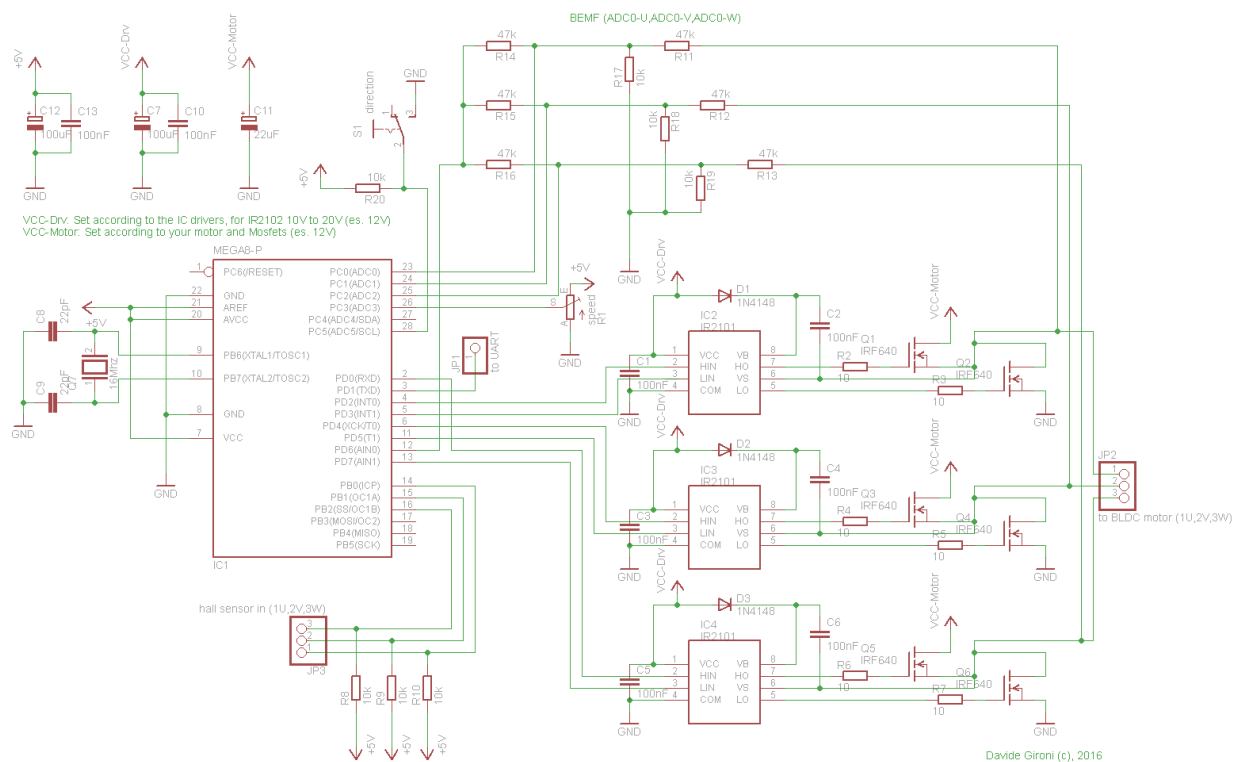
n	$\alpha / ^\circ$
4	30
5	24
6	20

n	$\alpha / ^\circ$
7	17,1

3 MOOTTORINOHJAIMEN KEHITYS

3.1 1. Prototyyppe

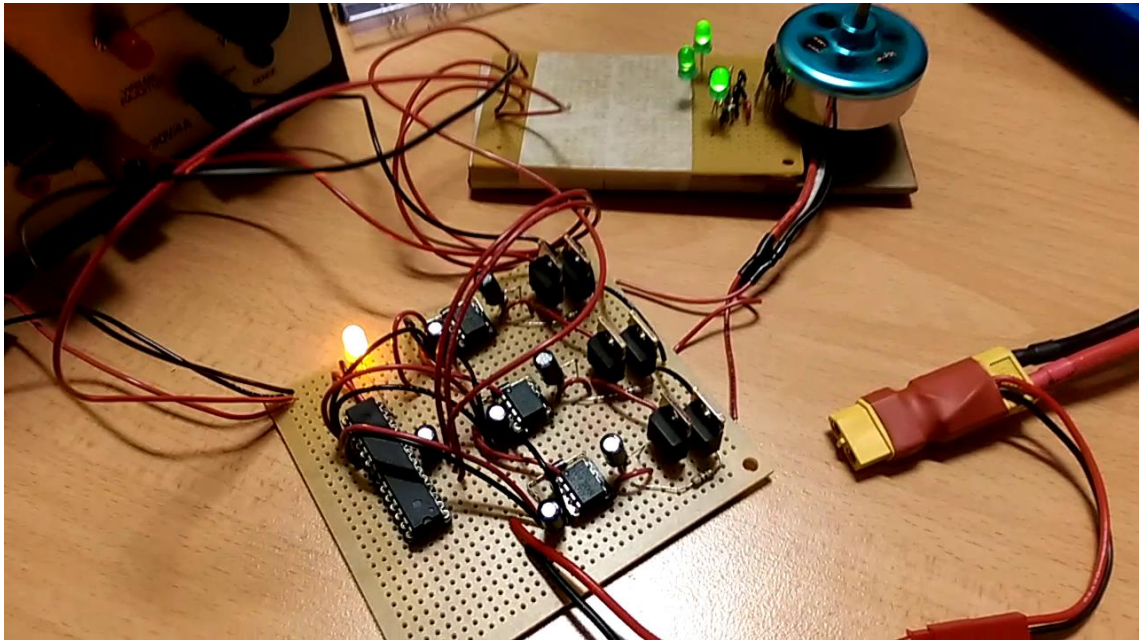
Ensimmäistä prototyyppeä suunniteltaessa tarkoituksena ei ollut päämääränä saada heti toimivaa kokoonpanoa, vaan tutustua ensin yksinkertaisesti toteutettuun kokonaisuuteen ja tutkia mitä sillä saadaan toteutettua. Uuteen asiaan tutustuttaessa on yleensä tehokkaampaa tehdä ensimmäinen versio, jonkun muun jo toimivaksi toteamasta kytkennästä. Lähtöalustana toimivan kytkennän etsintä tuotti tulosta ja johdatti David Gironen tekemään yksinkertaisen harjattoman moottorin ohjaimen. Davidin alkuperäinen piirikaavio on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. AVR-mikrokontrolleriin pohjautuva moottorinohjain BLDC-moottoreille. (David Girone, 2013)

Tämä antoi hyvän pohjan miettiä moottorinohjaimen toimintaa ja luoda sen pohjalta oma lohkokaavio. Lohko koostuu yksinkertaisimmillaan sensoroidulla moottorilla kuudesta lohokosta; Akku, mikrokontrolleri, hilaohjain, ohjaustehosilta, moottori- ja hallanturit. Teholähteenä voidaan prototyypissä käyttää laboriovirtalähdettä. Mikrokontrollerina käytettiin ATMEGA328-piiriä, josta oli olemassa käyttökokemusta. Hilaohjaimeksi valittiin Davidin käyttämä IR2101-puolisilta hilaohjauspiiri, koska

kyseinen toimintalohko on uusi. Ohjaustehosillassa käytettiin samoja MOSFET-piirejä kuin David, IRF640. Moottorina toimi käyttämättömäksi jäänyt RC-lennokin harjaton moottori. Hall-antureiksi valittiin US1881LUA-piiri. Toimiva prototyyppi on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. 1. Toimiva prototyyppi.

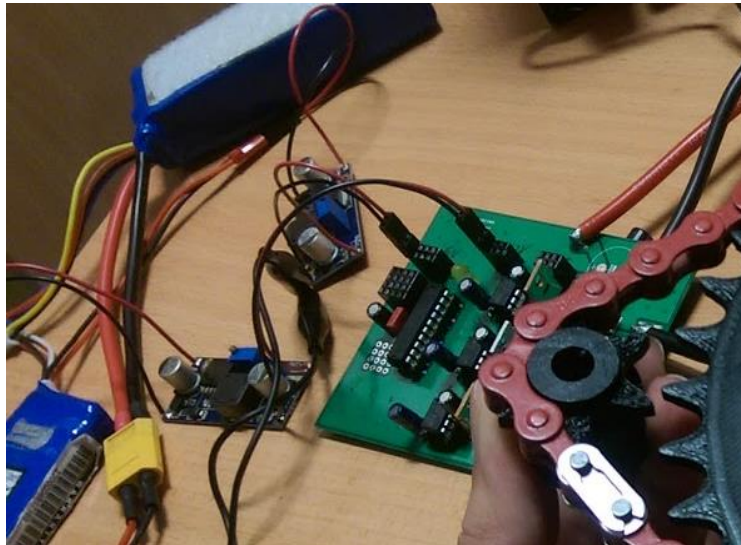
Kytkenällä opittiin, miten perus moottorikkomutointi toimii. Prototyypillä ei ollut tarkoitus ajaa suuria kuormia, vaan tutustua ensin tekniikkaan ja toteutukseen yksinkertaisemman ja nopean prototyypin kautta. Prototyyppiä olisi muutenkin ollut hankala sijoittaa oikeaan käyttöön, koska se tarvitsi kolme eri jännitelähdettä, jotka olivat tarpeellisia testauksessa tehojen hallittavuuksien takia.

3.2 2. Prototyyppi

Toinen prototyyppi on piirikaavion pohjalta suora kopio ensimmäisestä, mutta se on verolevyn sijaan rakennettu sille suunnitellulle piirilevyille, joka on piirilevypajassa teetätetty. Levyille on samalla lisätty liitäntäpisteitä, että mahdollisia lisäkytkentöjä olisi mahdollista ja helpompaa tehdä jälkepäin. Tarkoituksena saada sama kytkentä toteutettua siistimmin ja samalla kasvattaa mahdollisen kuorman kokoa. Teetätetty piirilevy näkyy kuvassa 13, muutaman buck-hakkurivirtalähteen kanssa.

Kuten 1. prototyypissä ohjain tarvitsee tilanteesta riippuen kolme eri jännitelähdettä. Transistoripäätteelle ja sen kautta moottorille yksi, transistorien hilajännitteiden

IR2101-ajuripiireille yksi ja mikrokontrollerille yksi. Piirilevyllä ei oltu lisätty erillisiä regulaattoreita, vaan tarvittavat jännitteet tuotettiin ulkoisilla buck-regulaattoreilla ja akuilla.

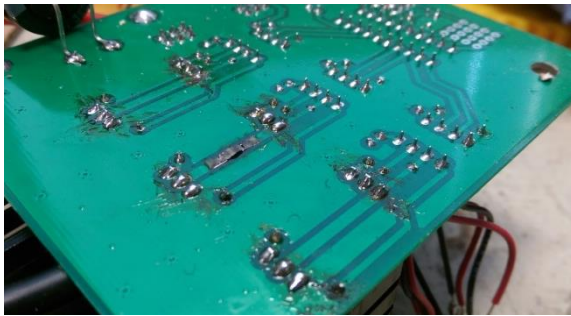


Kuva 13. Teetätetty piirilevy ja hakkuvirtalähteet.

Moottorinohjaimen liitetty moottori vaihdettiin myös isompaan malliin, jolla pystyttäisiin ajamaan isompia kuormia. Toinen syy minkä takia moottori vaihdettiin isompaan malliin oli että myös moottorinohjainta saataisiin kuormitettua enemmän ja todettua, missä siinä on heikoin kohta voimavirtapuolella. Mikrokontrolleriin kytkettiin potentiometri, jolla pulssinleveydmodulaatiota transistoripäätteelle saatiin säädettyä kätevästi. Kuormitustesteissä käytettiin virtalähteen ja moottorinohjaimen välillä tehoanalyysointia, joka tallensi hyödyllisiä parametreja testausta varten, kuten maksimivirta, maksimiteho, alin jännite ja käytetty kapasiteetti. Moottori ja moottorinohjain kiinnitettiin muunneltuun potkulautaan, joka toimi mekaanisena testialustana. Kevyillä kiihdytyksillä ja matalilla nopeuksilla ohjain kesti, kun akulta tuleva virta pysyi pienempänä kuin 30 ampeeria, mutta mosfet:en havaittiin käyvän melko kuumina ja seuraavaan versioon päätettiin laittaa mosfet:hin jäähdytyslaitteet, että niiden käyttölämpötiloja saataisiin laskettua.

Suuremmilla kuormilla havaittiin kumminkin ettei moottorinohjaimen kuparivedot kestäneet suuria virtoja, joita ohjaimella pyydettiin. Kuparivedot alkoivat palamaan poikki muutaman sekunnin jälkeen, kun virta kasvoi yli 80 ampeerin ja kokonaisteho läheni noin yhtä kilowattia. Aluksi poikki palaneita kuparivetoja korjattiin irtojohdon ja juottamisen avulla, mutta vähän ajan päästä pamahti kuparit uudestaan poikki ja loppua

kohden ei alkuperäisistä kuparivedoista näkynyt mitään. Ensimmäinen palanut kupariveto ohjaimessa on esitetty kuvissa 14.1 ja 14.2.



14.1



14.2

Kuva 14.1-2: poikki palanut kuparifolio.

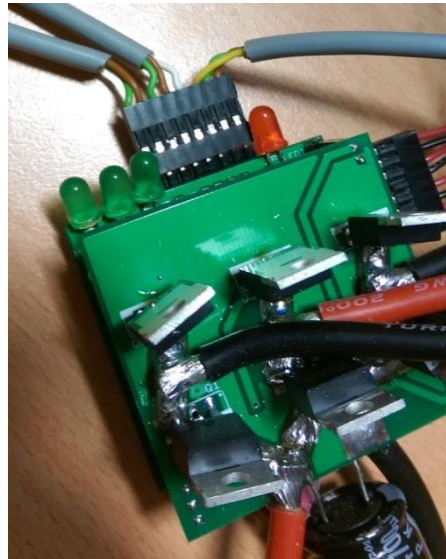
Moottorinohjain oli kuitenkin saavuttanut päämääränsä, eli se toimi, oli siistimmän näköinen kuin 1. prototyyppi ja sillä päästiin ajamaan oikeita kuormia. Ohjaimessa huomattiin kriittisinä ongelmina piirilevyn käyttämä suuri koko, joka teki levyn sijoittamisesta mekaaniseen testialustaan ongelmallisen. Alimitoitetuksi jääneet transistoripäätteen kuparivedot eivät kestäneet ohjaimelta pyydettyjä virtoja, vaan järjestelmällisesti paloivat poikki heikommasta alkaen. Vaikka kuparivedot olisivatkin kestäneet pyydettyä virtaa, niin itse mosfet:t olisivat palaneet sisäisesti pian rikki merkittävien tehohäviöiden takia, jotka johtuivat suurista virroista ja mosfet:en sisäisestä resistanssista johtamistilassa.

3.3 3. Prototyyppi

Kolmannen moottorinohjainiteraation päämäärinä oli saada levyn käyttämään piirilevyn kokoa pienennettyä ja kasvattaa transistoripäätteen kuparivetojen poikittaispinta-alaa pienempien johtamishäviöiden saavuttamiseksi ja vetojen poikki palamisen estämiseksi. Mosfet:lle lisättiin jäähdytysiilet, jotta niiden käyttölämpötilaa saataisiin laskettua. Edellä mainittujen kolmen syyn takia piirilevysuunnittelu tuotti erityistä haastetta ja loppujen lopuksi päädyttiin erikoisempaan pannukakku ratkaisuun, jossa moottorinohjain koostuu kahdesta erillisestä piirilevystä, jotka asetettaisiin päällekkäin.

Moottorinohjain pysyi vielä piirikaavion puolelta samanlaisena 1. ja 2. prototyyppiin verrattuna, koska kyseinen kytkentä oli todettu toimivaksi ja rajoittavaksi tekijäksi olikin muodostunut piirilevyn kuparivetojen alimitoitettu koko. Ainoana erona oli mikrokontrolleri, joka vaihtui Attiny861-malliin, koska pannukakurakenteen

alemmassa levyssä käytävä tila oli rajoitettu. Pienempi koteloisen ATtinyn avulla saatiin säästettyä tilaa ilman toiminnallisuuden uhraamista. Kasattu moottorinohjain ilman jäähdytysseilejä on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Moottorinohjain päällekkäin kasatuilla piirilevyillä.

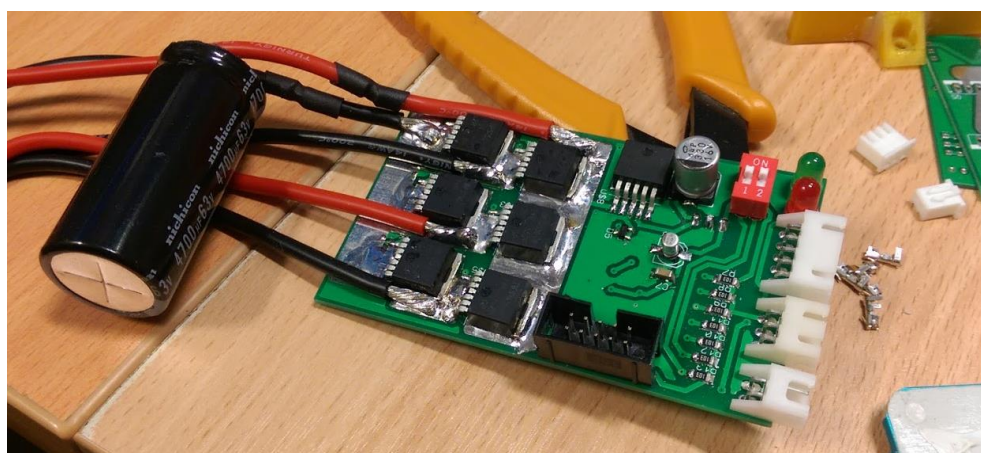
Moottorinohjain vei huomattavasti vähemmän tilaa leveys- ja pituussuunnassa, mutta kasatun ohjaimen koko oli kasvanut huomattavasti pääkkäisten piirilevyn ja kookkaiden jäähdytysseilien takia. Moottorinohjain saatiin kumminkin sijoitettua potkulaudan penkin alle. Ohjain kesti testaamista hyvin eikä transistoripäätteen kuparivedot enään palaneet poikki ja mosfet:t pysyivät kohtalaisen lämpöisinä kuormituksessakin. Seuraavaksi alettiin etsimään taas uutta heikkoa kohtaa, joka pettäisi kun kuormaa kasvatettaisiin. Mikrokontrollerin ohjausalgoritmin ramp-up aikaa pienennettiin, joka tarkoitti sitä että ohjaimen pulssinleveysmodulaation arvo nousisi nopeammin käskettyä arvoa kohden. Tämä tarkoitti nopeampia kiihdytyksiä, jotka johtivat suurempiin virtoihin ja sitä kautta suurempaan kuormaan, jota ohjain joutui kestäämään.

Seuraava kohta josta ohjain menikin rikki osoittautuikin hieman hankalammaksi, koska transistoripäätteen TO-220 -koteloisen IRLB3034-mosfet:n metallijalka sulii poikki. Tällaista heikkoa kohtaa ei pystynytkään johdon ja juottamisen kanssa korjaan, vaan tämä tarkoitti koko mosfet:en koteloiden vaihtoa toiseen, jonka jalat kestäisivät korkeampia virtoja. Toinen vaihtoehto oli vaihtaa läpijuotettavista mosfet:sta pintaliitosversioihin. Uuden ohjainiteraation suunnittelu aloitettiinkin tämän heikon kohdan löytämisen jälkeen ja sille asetettiin taas uusia suunnittelumuutoksia ja tavoitteita. Mahdollisimman suuri osa komponenteista päätettiin vaihtaa

pintaliitoskomponentteihin pienemmän tilantarpeen takia ja sen tuomana lisätuna komponentteja voitiin asettaa piirilevyn ylä- ja alapuolelle kohdakkain, koska levyn läpi ei enään kulkenut niin paljon läpivientireikiä komponenttien jaloille. Ohjainlevyyn päätettiin jatkossa myös integroida tarvittavat regulaattorit mikrokontrollerille ja logiikalla, sekä mosfet:en hilaohjaimille. Näin päästiin eroon ulkoisista buck-regulaattoreista ja tarvittavia ulkoisia jännitteitä tarvittiin enään yksi kappale kolmen sijasta.

3.4 4. Prototyyppi

Neljännän moottorinohjaimen piirilevysuunnittelussa tehtiin olennaisia muutoksia, kun kaikki komponentit muutamaa LED:iä ja liittintä lukuunottamatta vaihdettiin pintaliitosversioihin. Mikrokontrollerina toimi edelleen Attiny861 ja mosfet:en hilaajureina kolme IR2101-ajuripiiriä. Transistorit vaihdettiin TO263-7 -pintaliitoskoteloiseen IRFS7530-mosfet:iin, joka on luokiteltu 240 ampeerille jatkuvaa virtaa riittävän jäähtytyksen kanssa. Lisätuna uusilla mosfet:illa oli niiden matalempi johtamistilassa oleva $1,15 \text{ m}\Omega$ sisäinenresistanssi, kun taas aikaisemmillä IRLB3034-mosfet:illa johtamistilan sisäresistanssi oli $1,4 \text{ m}\Omega$, eli uudet mosfetit eivät tuottaisi niin suuria tehohäviöitäkään samoilla virroilla. Kasattu piirilevy on esitetty kuvassa 16. Piirilevyn liittimet vaihdettiin piikki- ja holkkirimoista JST:n HX-sarjan liittimiin, jotka ovat tuttuja kauko-ohjattavien LiPo-akkuja käyttäneille, koska kyseisiä liittimiä käytetään akkujen tasausvirtaliittiminä. Lopputuloksena levy näytti siististi toteutetulta.



Kuva 16. Pintaliitoskomponenteilla toteutettu 4. prototyyppi.

Ohjaimen testauksessa todettiin kumminkin kummallinen vikatila, joka ilmeni puutteellisena vääntönä ja moottorin roottorin lukittaessa paikoilleen korkeataajuisena vikisynä. Vikatila aiheutti hämmennystä, koska uusia mosfet:ja lukuunottamatta

komponentit olivat samoja aikaisempiin versioihin verrattuna. Lukuisien ongelmanratkaisutuntien jälkeen ei vian aiheuttajaa ollut löytynyt. Koko piirilevy oli mitattu läpi oskilloskoopin kanssa outoa jännitettä tai logiikatilaa etsien ilman tulosta. Vianetsintää jatkettiin vielä useamman päivän ajan, mutta ilman selkeää vianaiheuttajaa. Lopputulos kumminkin päättyi siihen, että vika johtuu mosfet:en hila-ajureista, koska niille tulevat logiikkasignaalit mikrokontrollerilta olivat oikein ja kaikki mosfet:t oli tarkastettu ja todettu ehjiksi. Mosfet:t eivät vain jostain syystä ohjautuneet oikein ja tästä syystä loppupäätelmä oli, että vika johtui hila-ajureista. Vian takia moottorinohjainta ei pystytty käyttämään kertaakaan kunnan kuorman ajoon, vaan se lopulta hylättiin epäonnistuneena ja toimimattomana.

Tämän taka-askeleen jälkeen oli tarpeellista katsoa moottorinohjaimen seuraavaa iteraatiota suureksi osaksi täysin uudesta näkökulmasta. Lisä integraatio komponenttipuolella oli taas oleellisena tavoitteena komponenttimäärän vähentämiseksi ja tilansäästämiseksi. Priorisointi keskittyi kumminkin hila-ajuriongelmaan ja sen ratkaisemiseen, joten uutta hila-ajuripiiriä alettiin etsimään. Hyväksi esimerkiksi löytyi Benjamin Vedderin suunnittelema VESC-moottorinohjain (Vedder's Electronic Speed Controller), jonka hän on jakanut Open Source -lisenssillä jaettavaksi. Kyseinen ohjain on erittäin suosittu itserakennettujen sähkörullalautayhteisöjen keskuudessa ja tämä katsottiin eduksi, koska se tarkoitti että ohjainta on testattu kattavasti yleisessä käytössä ja se on todettu toimivaksi. Kiinnostava asia ohjaimessa oli miten sen mosfet:en hilaohjaus oli toteutettu. Ohjaimessa käytettiin Texas Instrumentsin DRV8302-piiriä, joka on tarkemmin katsasteltuna erittäin pätevä pakkaus, joka integroi useampia ominaisuuksia yhden pakkauksen sisälle. Se sisältää hila-ajurit kaikille kolmelle puolisolille transistoripäätteessä, integroidun buck-hakkurin, joka tarvitsee vain ulkoisen kelan, diodin ja muutaman suotokondensaattorin, suojausominaisuuksia itse piirille ja transistoripäätteelle, kuten yllilämpö- ja ylijännitesuojaus. Näiden ominaisuuksien lisäksi pakkaukseen on integroitu kaksi differentiaalianalogivahvistinta, joilla voidaan mitata moottorin käämien virtoja transistoripäätteeseen lisättävillä shunt-vastuksilla. Piiri oli siis lupaava vaihtoehto korvaamaan useampia komponentteja yhden pakkauksen sisälle ja se lisättiin seuraavaan moottorinohjainiteraation.

3.5 1. Kehitysalusta

Uuteen moottorinohjaimen tuli muutoksia mikrokontrollerin ja aikaisemmin hila-ajurin osalta, sekä regulaattoreissa. Mikrokontrolleri vaihtui Atmelin Xmega-

mikrokontrolleriin lisäsuorituskyvyn puitteissa. Yksittäiset hila-ajuriipiirit korvattiin DRV8302:lla, joka korvasi myös yhden regulaattorin, sen sisäisellä buck-hakkuri ajo-osilla, mutta Xmegalle ja muulle 3,3 voltin logiikalle täytyi lisätä regulaattori DRV:n hakkurin tuottamasta 5 voltin jännitteestä. Piirilevyille tulevia liittimiä päätettiin myös vaihtaa ja tilansäästöä tavoiteltaessa päätettiin käyttää erittäin pienikokoisia Hirosen valmistamia DF-13 -sarjan liittimiä. Päällepäin liittimet vaikuttivat sopivilta, mutta käytännön toteutuksessa tuli kumminkin vastaan ongelmia niiden pienestä koosta johtuen.

Ohjaimen mekaaninen testialusta on tässä kohtaan vaihtunut aikaisemmasta muunnellusta potkulaudasta rullalautaan ja tämä tarkoitti, että ohjaus on muuttunut potentiometristä kauko-ohjattavan auton langattomaan vastaanottimeen, jonka kaasukanava on yhdistetty moottorinohjaimen. Servo-pulssi tai ”Pulse Position Modulation (PPM)” on yleinen ohjaussignaali kauko-ohjattavien hallintalaitteiden, kuten servojen ja moottorien nopeussäätimien välillä. Se toimii yleensä 50 hertsin päivitystaajuudella, mutta jotkin laitteet tukevat korkeampia päivitystaajuuksia. Signaali kantaa ohjaustiedon yksittäisen pulssin sisällä, jota toistetaan päivitystaajuuden mukaisin välein. Pulssi kantaa tiedon sen pituudessa, pulssin on oltava vähintään 1 millisekunnin ja enintään 2 millisekunnin pituinen. Lähetetty arvo muuttuu sen mukaan miten pitkä se on aikaisemmin mainitulla välillä, keskiarvo ollessa 1,5 millisekunnissa. Mikrokontrollerin ohjelmaan lisättiin laskuri, joka laskee 1 MHz:n taajuudella. Se alkaa laskemaan kun mikrokontrolleriin kytketyn kauko-ohjattavan vastaanottimen kaasukanavan logiikkataso nousee ylös ja lopettaa kun se laskee takaisin alas, missä kohtaan katsotaan kuinka kauan korkea logiikkataso kesti ja käsketty arvo päätellään tästä. 1 MHz:n taajuudella hyväksytyt laskurin arvot ovat 1000 ja 2000 välillä, josta sitten vähennetään 1000, koska pulssi on minimissään sen pituinen ja haluttu arvo saadaan näin laskettua.

Itse PWM-suhteen ohjaus on toteutettu edelleen yksinkertaisella algoritmilla, joka pohjautuu aikaisempien ohjaimien koodiin. Eteenpäin ajettaessa kauko-ohjaimen kaasumäärää maksimi pulssisuhteen, jota kohti ramppi -toiminto nostaa pulssisuhdetta. Esimerkkinä paikaltaan lähettäessä kauko-ohjaimen kaasua asetetaan puoleenväliin, moottorinohjain alkaa nostamaan transistoripäätteelle lähtevää PWM:n pulssisuhdetta ramppi-toiminnon kautta. Pulssisuhteen nouseminen pysähtyy, kun se saavuttaa 50 prosentin suhteen. Ilman ramppia pulssisuhde seuraisi 1:1-suhteessa kauko-ohjaimen

kaasun asentoa, mutta tämä todettiin epämukavaksi ja vaaralliseksi käyttää, koska sormen lipsahdus saattaisi yhtäkkiä antaa nopean kiihdytyspiikin, joka meinaisi viedä laudan alta. Ramppi-toiminto hidastaa pulssisuhteen muutosnopeutta ja antaa täten sulavemman kiihdytyksen, mutta se lisää viivettä kiihdytyksessä. Toimivaksi rampin nopeudeksi todettiin noin 6 sekunnin nolasta täysille kestävä ramppi. Tämä on kompromissi nopean vasteen ja sulavan kiihdytyksen välillä. Suurin puute rampin käytössä tulee kumminkin vastaan, jos maksiminopeudella kuljettaessa päästää kaasun nollantaatumaan ja laittaa sen heti takaisin täysille. Tällöin saattaa kestää useampi sekunti ennen kuin moottori alkaa taas kiihdyttämään riippuen siitä kuinka paljon laudan nopeus on ehtinyt hidastumaan. Regeneroivassa jarrutuksessa taas ei käytetä ramppia, koska hidastettaessa voivat mahdolliset viiveet olla vaarallisia, vaan jarrutus toimii aikaisemmin mainitulla 1:1-suhteella, eli pulssisuhde seuraa suoraan haluttua jarrutusta. Näistä puutteista huolimatta ohjainta on käytetty usean sadan kilometrin ajomatalla.

Moottorinohjaimen piirilevy on esitetty kuvassa 17 ja se on kaikista siistein ja kompaktein verrattuna aikaisempiin ohjain versioihin. Kaikista positiivisimpana asiana oli kumminkin aikaisempaa iteraatiota vaivanneen hila-ajuriongelman korjaaminen, koska moottorinohjainta päästin käyttämään käytännön käyttökohteessa. Piirilevyn DF-13 -sarjan liittimet tuottivat päänvaivaa, koska ne olivatkin jo liian pieniä ja niiden liittimien puristamiseen ei löytynyt sopivia puristimia. Liittimille tarkoitujen pihtien hintakin osoittautui lähemmäs puolta tuhatta euroa ja niiden ostamisen mahdollisuudesta luovuttiin hyvin nopeasti. Toinen ongelma mikä liittimien kanssa tuli vastaan oli, että laudalla ajon aikana esiintyvä värinä aiheutti stressimurtumia liitinjohtoihin, kunnes ne lopulta katkesivat kokonaan liittimen juuresta. Tämän jälkeen johdot juotettiin suoraan piirilevyn kuparivetoihin, että testausta päästiin jatkamaan, mutta uudet ja sopivammat liittimet lisättiin muutoslistaan tulevia versioita varten.



Kuva 17. 1. Kehitysalusta moottorinohjaimesta.

4 KÄYTTÖSOVELLUS

Ennen kuin moottorinohjaimen kehitystä aloitettiin, sille etsittiin oikeaa käyttökohdetta. Käyttökohteeksi valittiin sähköajoneuvo, joka toteutettaisiin motorisoimalla jokin tavallinen liikkumaväline. Tärkeimpinä kriteereinä valinnassa olivat skaala, hinta ja mekaanisen toteuksen helppous. Nillä kriteereillä mahdolliset kulkuvälineet rajattiin alussa polkupyörään, rullalautaan tai potkulautaan, joista polkupyörä päätettiin hylätä sen mekaanisen muunnoksen hankaluuden vuoksi. Kahden jäljelle jääneen vaihtoehdon välillä päädyttiin potkulautaan. Huokea hintaista potkulautaa etsiessä päätettiin, että laudassa tulisi olla kohtuullisen kokoiset ja ilmatäytteiset renkaat. Markkinoilta löytyi paljon aikuisille tarkoitettuja isopyöräisiä potkulautoja, joiden hinnat liikkuvat 400 eurosta ylöspäin. Todettiin, että halvemmalla pääsee jos löytää lapsille tarkoitettun laudan, jossa olisi ilmatäytteiset renkaat. Lopulta valittiin Puky:n valmistama R 07L -malli, joka on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Puky R 07L -potkulauta. (Puky)

Tarkoituksena oli lisätä taka-akselin päälle itserakennettu penkki, johon moottori, akut ja moottorinohjain kiinnitettäisiin ja suunnitella voimansiirto moottorilta takapyörälle. Voimansiirtoa rakennettiin 3D-mallinnetuilla ja -tulostetuilla paloilla helpon prototyypin takia. Muutaman kuukauden kehitysajan jälkeen tultiin kuitenkin siihen

tulokseen, että luotettavan voimansiirron suunnittelu ja toteuttaminen tulisi liian kalliiksi, koska kyseisen potkulaudan rakenne ja 3D-tulostetut voimansiirron palat eivät toimineet hyvin yhdessä, minkä seurauksena potkulauta mekaanisena kehitysalustana hylättiin. Potkulaudan eri kehitysversioita on esitetty kuvissa 19.1-6. Testiajoja potkulaudalle kerääntyi kokonaisuudessaan hieman yli kilometri.



19.1



19.2



19.3



19.4



19.5



19.6

Kuvat 19.1-6: Potkulaudan kehityksen aikaisia kuvia.

Potkulaudan hylkäämisen jälkeen päätettiin mekaaninen kehitysalusta vaihtaa rullalautaan, koska aikaisemmat kriteerit sulki polkupyörän edelleen pois vaihtoehdoista. Rullalautaa mekaanisena alustana tutkittaessa löydettiin muutamia yrityksiä, jotka valmistivat sähkörullalautoja kuluttajien käyttöön. Merkittävimminä mainintoina ovat Boosted Boards ja Evolve Boards, joiden lautoja on esitelty kuvissa 20.1 ja 20.2.



20.1 (Boosted Boards)



20.2 (Evolve Boards)

Kuvat 20.1-2: Markkinoilla olevia sähkörullalautoja.

Rullalautaa enemmän tutkittaessa todettiin, että se voisi yleisestikin toimia parempana liikkumisvälineenä polkupyörään ja potkulautaan verrattuna. Edellyttäen, että laudalle saataisiin tarpeeksi pitkä ajomatka ja kulkunopeus. Kehitys aloitettiin ostamalla halpa kokonainen lautapaketti, eli se sisälsi kaikki olennaiset osat. Ideana oli samalla lailla kuin potkulaudan kehityksessä tutkia mahdollisia tapoja rakentaa voimansiirto ja sitten rakentaa ensimmäinen prototyyppi 3D-mallinnuksen ja -tulostuksen kautta. Haastavinta voimansiirron suunnittelussa oli 3D-tulostetuilla paloilla tehdä voimansiirrosta ensinnäkin toimiva ja toisena kestävä ja luotettava pidemmälle käyttäjälle. Toinen haastava asia oli rullalaudan mekaaninen alusta ja sen luoma rajoite suunnittelulle. Moottorin täytyy kiinnittyä rullalaudan trukkiin, jotta moottorin ja renkaiden välinen etäisyys pysyisi vakiona riippumatta siitä ollaanko laudalla kääntymässä tai mentäessä suoraan. Ensimmäinen versio rullalaudan voimansiirrosta on esitetty kuvassa 21. Tästä kohtaan eteenpäin, käytetty moottorinohjain on 1. kehitysalusta V2.0.

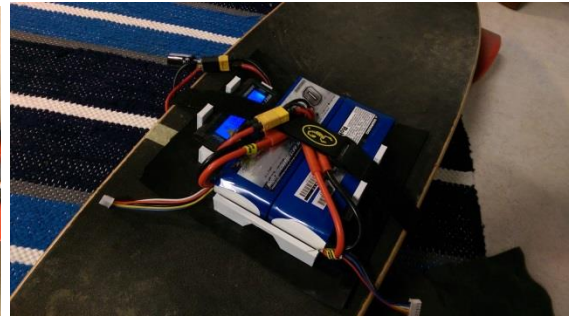


Kuva 21. Voimansiirron ensimmäinen prototyyppi.

Alkuun pääsemisen jälkeen laudalle tehtiin lähes päivittäin päivityksiä, joilla korjattiin ja vahvistettiin hajonneita osia. Nopean kehityksen hengessä tehtiin nopeita ja yksinkertaisia ratkaisuja ongelmiin, että laudaa päästiin testaamaan ulkotiloissa. Useimmat ratkaisut ongelmiin eivät tosin oltu yleensä suunniteltu ja toteutettu pitkäaikaisuutta ajatellen, jonka pystyy toteamaan kuvista 22.1 ja 22.2, jotka ovat otettu ensimmäisen laudan kehityksen lopussa. Laudalle kerääntyi useita kymmeniä kilometrejä ajomatkaa.



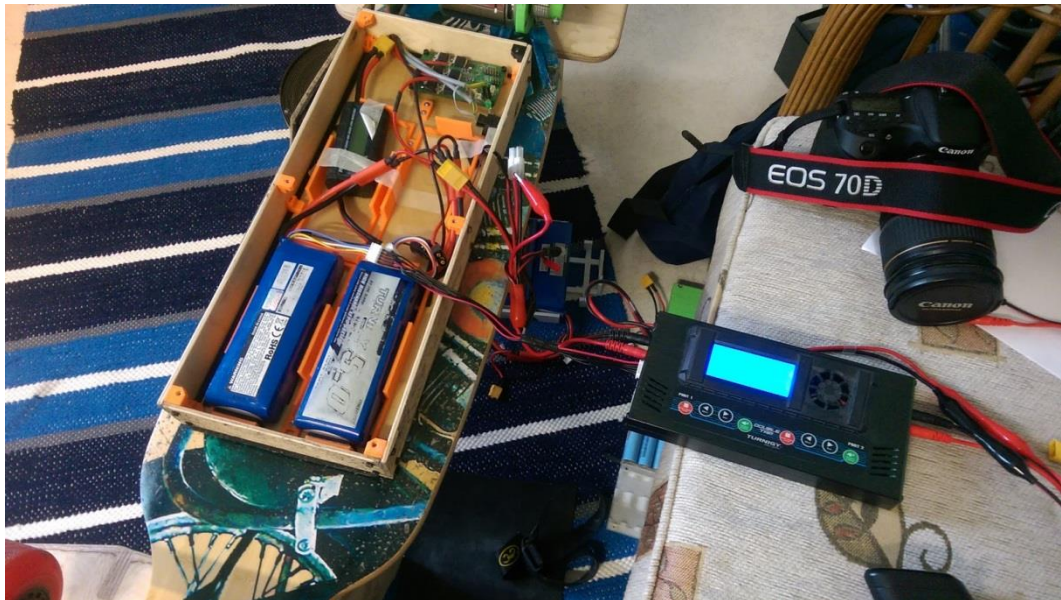
22.1



22.2

Kuvat 22.1-2: Kehityksen loppu ensimmäiselle laudalle.

Siirryttäessä uuteen lautaiteraatioon tärkeimpänä oli parantaa ensimmäisessä laudassa todettuja puutteita. Näistä suurin oli kiinteän kiinnityksen puute elektronikalle ja akuille, kuten ylläolevista kuvista 22.1 ja 22.2 voi todeta. Ideaksi syntyi ostaa uusi dekki, johon rakennettaisiin säilytystila laudan alle. Säilytystila on esitetty sisältöineen ja latauksessa kuvassa 23.



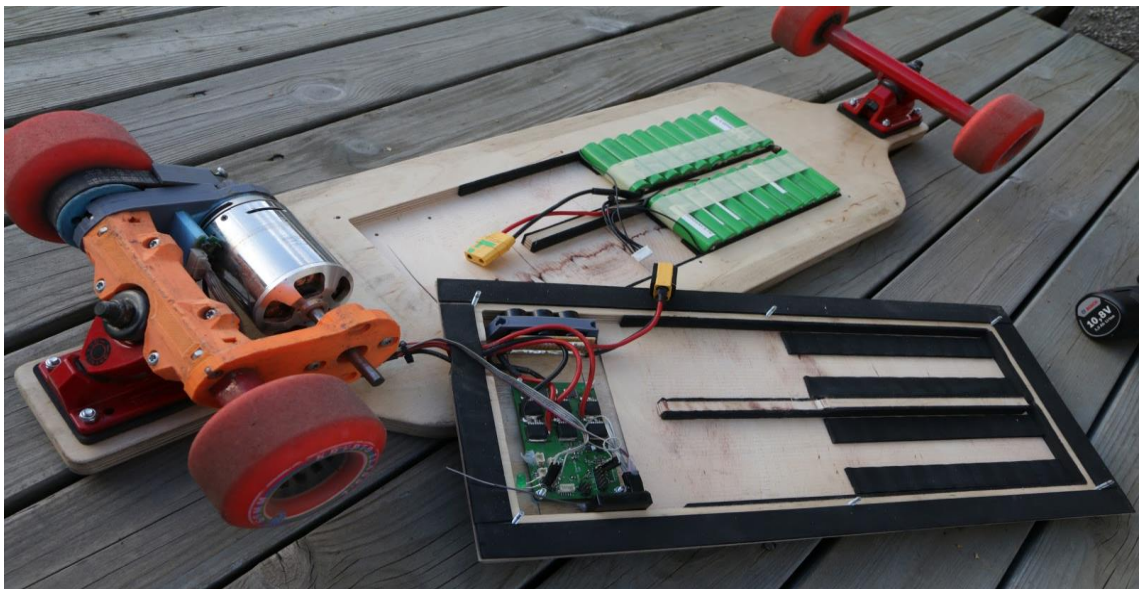
Kuva 23. Toisen lautaiteraation säilytystila ja sisältö.

Käytettävyydeltään uusi lautaiteraatio oli parempaa tasoa kuin vanha, koska normaalissa käytössä ei enään tarvinnut uusia teippejä ja niiden kiinnitystä, vaan säilytystilan sai avattua poistamalla kuusi Torx-kantaista pulttia. Uutena puutteena ja häirtana oli tosin tullut paha, tärinästä johtuva ääni, joka syntyi säilytystilan ohuiden vaneriseiniä osumisesta toisiinta. Tästä ominaisuudesta riippumatta lauta toimi mekaanisena alustana erittäin hyvin ja sille kertyikin sen käyttöaikana yli 400 kilometriä ajomatkaa. Tänä aikana saatiin moottorinohjaimen ensimmäisestä kehitysalusta korjattua suurimmat toimintaviat pois ja tarpeelliset ominaisuudet lisättyä perusajoa varten.

Kolmannen lautaiteraation suunnittelun tavoite oli saada lauta ulkopuolelta siistiksi, sekä korjata 2. iteraatiossa havaittu tärinästä johtuva melu. Voimansiirtoa ei muutettu. Ideaksi tuli suunnitella dekki, jonka sisään kaikki elektroniikka ja akusto mahtuisi. Dekki koostuu kahdesta 15 millisestä vanerilevystä, jotka on leikattu suunniteltuun ulkomuotoon ja niihin molempiin on jyrskitty kohdikkain olevat 10 milliset syvennykset, joihin akun kennot ja moottorinohjain sijoitetaan. Laudan ulkonäkö ja sisältö on esitetty kuvissa 24 ja 25.



Kuva 24. Kasattu lauta.



Kuva 25. Akusto ja moottorinohjain esillä.

Lauta tuntuu tukevalta pakkaukselta käsissä, sekä jalkojen alla ajon aikana. Suurin osa ajon aikana tärinästä johtuvista äänistä ovat hävinneet, mutta voimansiirron läheltä kuuluu vieläkin outoa ääntä riippuen siitä missä asennossa jalkaa pitää ajettaessa. Akusto sai myös päivityksen siirryttäessä pois lennokkoihin tarkoitettuista Li-Po akuista, jotka korvattiin sylinterimuotoisille 18650 Li-Ion -kennoilla. kuvassa 25 näkyvien vihreiden kennojen valmistaja on LG Chem ja mallinimi on MJ1. Saman kuvan 20 kennolla, jotka ovat konfiguroitu 4 sarjaan ja 5 rinnakkain asetelmaan. Laudalle saatiin ajomatkaa kyseisellä akustolla noin 30 kilometriä, 18 kilometrin tuntivauhdilla. Suurin kehitystarve on nyt muuttunut mekaniikan kehityksestä, moottorinohjaimen kehitykseen. Laudan moottorinohjaimen toimintaa voi parhaimmillaankin kutsua vain vähimmäistoiminnaksi, joten jatkokehitys tulee keskittymään siihen jatkossa.

5 JATKOKEHITYS

Tämän kappaleen tarkoituksena on kuvata laudan jatkokehityksen polkua ja käsitellä ominaisuuksia ja muutoksia, joita laudalle on suunniteltu. Kehitettävää on runsaasti ja lisättäviä, sekä parannettavia ominaisuuksia tulee sitä enemmän mieleen, mitä kauemmin laudan kanssa on puuhattu. Tärkeimpänä listalla on kumminkin moottorinohjaimen parannus, koska se on laudan olennaisin osa, jonka kanssa käyttäjä on vuorovaikutuksessa. Muita olennaisia vuorovaikutuksia ovat laudan akun lataaminen, johon on tarkoitus tehdä akunvalvontajärjestelmä. Laudan fyysinen ohjain, jota käyttäjä pitää kädessään ja hallintasovellus älypuhelimessa, jonka kautta laudan käyttäytymistä voi muuttaa, sekä valvoa jäljellä olevaa varausta akussa ja esimerkiksi seurata tehoelektroniikan lämpöjä ajon aikana.

Moottorinohjaimessa on paljon tekemistä. Sen ohjausalgoritmi on erittäin yksinkertainen, joka on toimivuuden ja testattavuuden kannalta hyvä asia, mutta se on liian kankea. Moottorinohjain ei anna hyvää vastetta annettuun ohjaukseen, vaan on hidas reagoimaan tilanteesta riippuen. Ongelma johtuu moottorin takaisinkytkennän puutteesta virran kannalta. Hall-anturit antavat kyllä tiedon moottorin roottorin asennosta ja sen pohjalta tiedetään, mitkä käämit energisoidaan, mutta tietoa käämin läpi kulkevasta virrasta ei ole. Tämän takia kiihdytyksessä ohjain käyttää yksinkertaista ramppi-toimintoa kiinteällä aikajaksolla, joka siis tarkoittaa sitä, että jos ohjaimesta annetaan yhtäkkiä täysi kaasu, kestää laudalla noin 5 sekuntia nostaa pulssinleveysmodulaatio sataan prosenttiin. Matalilla nopeuksilla tämä ei ole niin suuri ongelma, mutta suuremmilla nopeuksilla, jos kaasu yhtäkkiä pääseekin nollaantumaan ja se nostetaan takaisin täysille heti, saattaa kestää muutama sekunti ennen kuin lauta alkaa taas vetämään. Virtatiedon puute aiheuttaa myös moottorin ja moottorinohjaimen suojaamisen kannalta ongelman, jos moottori on esimerkiksi jumiutunut, niin algoritmi jatkaisi vain virran lisäämistä, kunnes jossain välissä jokin sulaa suurien virtojen takia.

Ratkaisu on lisätä virranmittaus moottorikämeihin. Yleensä tämä tapahtuu kaikissa moottorinohjaimissa lisäämällä shunt-vastukset ainakin kahteen moottorikämiin, jolloin kolmannen käämin virta pystytään laskemaan kahdesta mitatusta käämivirrasta Kirchhoffin virtalailla. Seuraavaan kehitysversioon lisätään myös magneettinen kiertomuunnin moottoriakselille. Ideana on saada kasvatettua roottorin asennon tarkkuuden resoluutiota ja tämän pohjalta vaihtaa pulssileveysmodulaatio tuottamaan

sinimuotoista modulaatiota moottorille. Tämä muuttaa myös moottorikäänien virrat sinimuotoisiksi, mikä helpottaa kolmannen käänin virran laskemista. Sinimuotoinen modulaatio parantaa myös moottorin hyötysuhdetta, koska staattorin luoma magneettikenttä saadaan pidettyä optimaalisessa kulmassa roottorin kestopagneetteihin nähden ja vielä lisäetuna moottori on hiljaisempi.

Toteutuksen suhteen on kumminkin syntynyt muutamia kysymyksiä. Esimerkiksi miten virtamittaus toteutetaan, kun pulssinleveysmodulaatio lähestyy 100 prosenttia? Tällöin kaikki virta voi kulkea mittaamattoman moottorikäänin kautta ja shunt-vastuksien kautta mitatut virrat näyttävät nolaa. Tietenkin olisi mahdollista laittaa shunt-vastukset kaikkiin kolmeen moottorikäämiin, mutta kyseinen toteutus vaatii taas lisää komponentteja. Olisi myös mahdollista rajoittaa maksimi pulssileveysmodulaatio esimerkiksi 95 prosenttiin, jolloin jonkin verran virtaa kulkisi aina mitatusta käänistä.

Yhtenä lupaavana vaihtoehtona voisi olla myös siirtyä käyttämään texas instrumentsin kehittämiä InstaSPIN-tuotteita, joiden tarkoitus on yksinkertaistaa moottorinohjainten kehitystä. Käytännössä ne ovat mikrokontrollereita, joiden ROM-muistiin on tallennettu moottorinohjauksen algoritmeja ja niille syötetään mikrokontrollerin AD-muuntimilta arvoja transistoripääteeltä ohjaukaskäskyjen lisäksi. Prosessoinnin jälkeen se palauttaa uudet arvot mikrokontrollerin PWM-moduulille. InstaSPIN toimii myös erittäin hyvin matalillakin nopeuksilla ilman antureita. Se olisi siis kätevä yhden piirin moottorinohjain prosessori, jota sitten erillisellä kommunikointipiirillä voitaisiin käskyttää.

6 YHTEENVETO

Moottorinohjaimen kehitystä jälkepäin katsottaessa on todettava, kuinka opettava kokemus se on ollut. Päätös aloittaa yksinkertaiselta pohjalta ja ymmärtää mitä peruslohkoja ohjaimesta löytyy ja miten ne toimivat yhdessä antaa paremman kokonaiskuvan nopeammin, kuin monimutkaisemman ja toimivamman ohjaimen tutkiminen. Hyvänä esimerkkinä voisi esimerkiksi pitää polttomoottoreihin tutustumista. Miksi aloittaa auton monisynterisestä nelitahtimoottorista, jos alkuun ja tekemään pääsee mopon yksisynterisellä kaksitahtimoottorilla? Samat tapahtumat mopon moottorissa tapahtuu kuin autonkin moottorissa ja aloittamaan pääsee huomattavasti halvemmalla.

Ensimmäisistä prototyypeistä opittiin, miten lohkoakaavio muodostui ja kuinka yksittäiset osat käyttäytyivät keskenään. Hall-anturien sijoitukset ja asennot kokeiltiin virheiden kautta, kunnes toimiva konfiguraatio löydettiin ja jälkepäin mietittiin tarkemmin minkä takia kyseinen konfiguraatio toimi ja sen pohjalta muodostettiin kaava, jolla hall-anturien kulmat toisiinsa nähden pystyttiin laskemaan moottorin magneettinapojen määrän perusteella. Testikuormia kasvattaessa alkoivatkin sitten tulemaan uudet ongelmat esille, eli transistoripäätteen kuparifolioiden alimitoitus ja siitä johtuen niiden poikkipalaminen suuremmilla virroilla. Toimintalohkot ja komponentit pysyivätkin suureksi osaksi samoina seuraavissa ohjainversioissa, mutta transistoripäätteen kuparifolioita pyrittiin kasvattamaan, niin suureksi kuin ne piirilevylle mahtuivat. Piirilevyn muotoa ja kokoa muutettiin myös ohjaimen kokonaiseen pienentämiseksi, että se olisi ollut helpompaa sijoittaa testialustaan.

Viimeiseen opinnäytetyössä esitettyyn moottorinohjaimen tiivistyikin kaikki aikaisempien versioiden virheistä opitut säännöt ja asiat. Lopputuloksena kumminkin on yksinkertainen ja toimiva anturillinen moottorinohjain, josta on hyvä jatkaa moottorinohjaimien opiskelua ja jatkokehitystä. Samalla on myös tullut todettua muita mielenkiintoisia aiheita mitä opiskella, kuten PID-säätimiä ja kehittyneempiä ohjaustekniikoita kuten ”FOC, Field Oriented Control”. Myös suunnitelmat tutustua tulevaisuudessa induktimoottoreihin ja IGBT-transistoreihin.

7 LÄHTEET

Boosted Boards. 1st Gen Boosted Board -Sähkökäyttöinen rullalauta. Löydetty 10.2.2016. <https://boostedboards.com/board/>

David Girone, 2013. A simple brushless sensed motor driver for AVR Atmega. Rakennetun ohjaimen piirikaaviokuva. Löydetty 15.2.2016. <http://davidegironi.blogspot.fi/2013/09/a-simple-brushless-sensored-motor.html?m=1>

Evolve Boards. Carbon GT –Hiilikuiturunkoinen sähkökäyttöinen rullalauta. Löydetty 22.2.2016. <https://www.evolvekateboards.com/>

Felix Nielsen. Motor Winding Scheme Calculator. Moottorin staattorin käämityslaskurin tulos 12 staattorihampaiselle ja 14 magneetinapaiselle moottorille. Sivusto, jossa kokoelma työkaluja oman moottorin rakentamiseen. Löydetty 13.10.2016. <http://www.bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/>

Gozuk, 2016. 3-vaihemoottorin transistoripäätteen piirikaavio. <http://www.gozuk.com/>

Hobbyking, 2016a. Afro 20A Race Spec Mini ESC Opto. Anturiton RC-moottorin harjattoman moottorin ohjain. Löydetty 5.11.2016. https://hobbyking.com/en_us/afro-race-spec-mini-20amp-opto-multi-rotor-speed-controller.html

Hobbyking, 2016b. Trackstar Brushless Turbo 120A ESC V2. Anturillinen RC-auton harjattoman moottorin ohjain. Löydetty 5.11.2016. https://hobbyking.com/en_us/trackstar-brushless-turbo-120a-esc-v2.html

Hyperphysics. Solenoid. Solenoidin muodostamat magneettikentänvuovivat. Hyperphysics verkko-opetusmateriaali. Löydetty 12.10.2016. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>

Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011a. Brushless DC Motor Fundamentals, Application Note AN047. Rotor Magnets Cross-Sections. Moottorimagneettien poikkileikkaukset. Sivu 8.

Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011b. Brushless DC Motor Fundamentals, Application Note AN047. Motor Rotation. Moottorin Kommutointi. Sivu 8.

Microchip, 2016. Space Vector Modulation. Moottorinohjauksen avaruusvektori-diagrammi <http://microchipdeveloper.com/mct5001:space-vector-modulation>

Polaris Laser Laminations. What Are Laminations? Kuva irtonaisista staattorilaminaateista Polaris Laser Laminations -kotisivut. Löydetty 9.10.2016. <http://www.polarislaserlaminations.com/motor-laminations.html>

Puky. R 07L -lasten potkulauta. Löydetty 25.3.2016. https://www.puky.de/en/k/roller_7_L/p/R_7_L_kiwi

Sam, DroneTest, 2014. Brushless Motors – how they work and what the numbers mean. Harjattomia moottoreita käsittelevä artikkeli. Luettu 20.12.2016. <http://www.dronetrest.com/t/brushless-motors-how-they-work-and-what-the-numbers-mean/564>

Wikipedia, 2016. H-sillan piirikaavio. Löydetty 21.4.2016. https://en.wikipedia.org/wiki/H_bridge