



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Santeri Salo

Esilatauspiirin suunnittelu sähkömoottoripyörään

Opinnäytetyö

Kevät 2022

Auto- ja työkonetekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Santeri Salo

Työn nimi: Esilatauspiirin suunnittelu sähkömoottoripyörään

Ohjaaja: Heikki Järvi

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 40

Liitteiden lukumäärä: 3

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Verge Motorcycles Oy. Työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa esilatauspiiri sähkömoottoripyörään. Suunnitellun esilatauspiirin on tarkoitus olla käytössä osana sarjatuotantomoottoripyörien sähköjärjestelmää. Tarkoituksena oli saada esilatauspiirin koko pienemmäksi ja tuotanto omavalmisteiseksi, jolloin hintaa saadaan taloudellisemmaksi ja riippuvuus erilliseen valmistajaan poistuu.

Kyseisessä tutkimuksessa keskitytään akustosta moottorinohjaimelle tulevan jännitteen esilataamiseen, jotta jännitettä katkovat kontaktorit sekä moottorinohjaimen kondensaattorit eivät vaurioituisi.

Työssä käydään läpi teoriaa liittyen esilatauspiiriin, sen komponentteihin sekä piiriin liittyviin vaatimuksiin. Työhön kuuluu myös itse piirin suunnittelu, komponenttien valinta teorian ja laskennan perusteella, piirikaavion laatiminen, suojakotelon mallinnus sekä valmistus, piirin kestävyys testaus ja piirin soveltuvuus ja sen toiminta osana sähkömoottoripyörän sähköjärjestelmää.

Esilatauspiirin suunnittelulla saatiin aikaan valmis ja varsin hyvin toimiva esilatauspiiri. Excel- taulukkolaskentaohjelmaan luodun muuttuvan taulukon perusteella on helppo määrittää komponenttien arvoja, jos esimerkiksi esilatausaikaa haluaisi tulevaisuudessa muuttaa tai akuston jännite muuttuisi. Piirin kustannukset tippuivat noin 75 % valmiiksi ostetuista esilatauspiireistä ja riippumattomuus muista valmistajista parani huomattavasti. Myös piirin fyysinen koko pienentyi huomattavasti aiemmin käytössä olleesta esilatauspiiristä. Esilatauspiiristä tuli tärinän-, pölyn- ja vedenkestävä valuhartsiin valamisen jälkeen. Polyuretaanivaluhartsi valikoitiin tarkasti olemaan elektroniikalle tarkoitettua, sillä se takaa komponenttien sekä niiden liitosten kestävyys ja vesitiiveyden.

¹ Asiasanat: esilataus, esilatauspiiri, vastus, syöksyvirta

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Santeri Salo

Title of thesis: Pre-charge circuit design for an electric motorcycle

Supervisor: Heikki Järvi

Year: 2022

Number of pages: 40

Number of appendices: 3

The thesis was commissioned by Verge Motorcycles Oy. The aim of the project was to design and implement a pre-charge circuit for an electric motorcycle. The designed pre-charge circuit was intended to be used as part of the electrical system of a serial production motorcycle. The aim of the project was to reduce the size of the pre-charging circuit and simplify its production to reduce costs, minimize resources used and finally to eliminate the need for an external manufacturer.

The thesis focused on pre-loading the electrical current flowing from the battery to the motor controller, to prevent damage to the contactors and capacitors in the motor controller.

The thesis dealt with the theory related to the pre-charge circuit, its components and the requirements related to the circuit. The main tasks in the project included designing the circuit, selecting components based on theory and calculation, drawing up a wiring diagram, modeling and fabricating a protective case, testing the durability of the circuit, and assessing the suitability and the operation of the circuit as part of the whole electric motorcycle electrical system.

The design was successful and produced a complete and functional pre-charge circuit. Based on a variable table created with an Excel spreadsheet program, it was easy to determine the values of the components if, for example, choosing to change the pre-charge time in the future or if changing the battery voltage. The pre-charge circuit costs decreased by approximately 75 % compared to a pre-purchased, pre-charging circuit and independence from other manufacturers improved significantly. The physical size of the circuit also decreased significantly as opposed to the circuit used previously. In addition, by applying a resin cast, the pre-charging circuit became vibration, dust, and water resistant. The polyurethane casting resin was carefully selected for its compatibility with electronics, adding durability and water resistance to the circuit components and their joints.

¹ Keywords: pre-charge, pre-charge circuit, resistor, inrush current

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tausta	8
1.2 Työn tavoite.....	8
1.3 Työn rakenne	9
1.4 Verge Motorcycles Oy	9
2 ESILATAUSPIIRI JA SEN KOMPONENTIT	10
2.1 Esilatauspiiri	10
2.2 Vastus ja resistanssi.....	11
2.2.1 Kiinteät vastukset.....	12
2.2.2 Säädetävät vastukset.....	14
2.2.3 Säätyvät vastukset.....	14
2.3 Releet.....	15
2.4 Kondensaattorit	16
2.5 BMS	17
2.6 Elektronikan suojaustavat.....	18
3 VAATIMUKSET ESILATAUSPIIRILLE	20
3.1 EMC	20
3.2 IP-luokitus	21
4 PIIRIN TOTEUTUS	23
4.1 Komponenttien määrittäminen.....	23
4.2 Piirikaavio.....	29
4.3 Suojakotelo	29
4.4 Valmistettavuus ja hinta	30
4.5 Fyysinen koko ja kestävyys	31

4.6 Piirin testaus.....	32
4.7 Arduino-testaus	33
4.8 IP-luokitus	34
4.9 Valmis piiri.....	34
5 TULOKSET	36
6 POHDINTA JA YHTEENVETO.....	37
LÄHTEET	38
LIITTEET	40

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Vastuksen piirrosmerkit (Pixabay, i.a.).....	12
Kuva 2. Sähkömagneettinen häiriö (KEBamerica, 13.7.2021).....	20
Kuva 3. Moottorinohjaimen kondensaattoreiden kapasitanssi.	24
Kuva 4. Esilatauspiirin piirikaavio.....	29
Kuva 5. Suojakotelon CAD-malli.....	30
Kuva 6. Suojakotelon mitat.	32
Kuva 7. Valmis esilatauspiiri kotelossaan valettuna.....	35
Kuvio 1. Syöksyvirta ilman esilatausta (Sensata, 2020).....	11
Taulukko 1. Vastuksen resistanssin vaikutus jännitteen, virran, tehon ja energian muutokseen ajan suhteen.	26
Taulukko 2. Esilatauksen jännitteen nousu ajan suhteen.	28

Käytetyt termit ja lyhenteet

BMS	Battery Management System eli akunhallintajärjestelmä
EMC	Electromagnetic Compatibility eli sähkömagneettinen yhteensopivuus
MCU	Motor Control Unit eli moottorinohjainyksikkö
Kontaktori	Suurikokoinen sähkömekaaninen kytkin, joka on sähköisesti ohjattu
Triakki	Puolijohdekomponentti, joka on toimintaperiaatteeltaan kuten kaksi vastakkaisiin suuntiin rinnan kytkettyä tyristoria, joiden hilat on kytketty yhteen

1 JOHDANTO

Johdannossa käsitellään opinnäytetyöhön liittyviä asioita. Tässä luvussa esitellään työn taustat, jonka pohjalta työtä on lähdetty tekemään. Työlle asetetut tavoitteet käydään lävitse työn taustan jälkeen. Lisäksi esitellään työn rakenne ja lopuksi työn toimeksiantajana toiminut yritys Verge Motorcycles Oy.

1.1 Työn tausta

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Verge Motorcycles Oy. Sähkömoottoripyörissä, kuten muissakin sähköajoneuvoissa kytketään akkupaketti kuormaan, eli akusto liitetään lataus- ja purkulaitteistoon. Kytkeminen on riskialtista piirin kapasitiivisuuden sekä suuren jännite-eron takia. Kapasitiivisuus aiheuttaa suuria syöksyvirtoja, joiden estämiseksi tarvitaan esilatauspiiri.

Sähkömoottoripyörän aikaisempi esilatauspiiri on tullut suoraan erilliseltä valmistajalta ostettuna. Ongelmana tässä on, että valmistaja on lopettanut kyseisen piirin valmistamisen ja piirin hinta ei ole ollut taloudellisesti kannattava. Tarkoituksena on saada esilatauspiirin tuotanto omavalmisteiseksi, jolloin hintaa saadaan taloudellisemmaksi ja riippuvuus erilliseen valmistajaan poistuu.

1.2 Työn tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa esilatauspiiri sähkömoottoripyörään. Kyseisessä tutkimuksessa keskitytään akustosta moottorinohjaimelle tulevan jännitteen esilataamiseen, jotta sähkövirtaa katkovat releet (kontaktorit) sekä moottorinohjaimen kondensaattorit eivät vaurioituisi. Tutkimuksessa on tarkoitus selvittää, mikä esilatauspiiri on, miksi sitä tarvitaan, miten esilatauspiiri toimii ja miten esilatauspiiri on mahdollista valmistaa mahdollisimman yksinkertaisesti, luotettavasti ja taloudellisesti. Suunnitellun esilatauspiirin on tarkoitus olla käytössä osana sarjatuotantomootoripyörien sähköjärjestelmää. Piirin suunnittelussa on tavoitteena tutkia eri vastusvaihtoehtoja, relevaihtoehtoja, vedenkestävyyttä (IP-luokitus), kokoa sekä valmistuskustannuksia. Myös piirikaavio kyseisestä piiristä kuuluu suunnitteluun. Kehitystyön jälkeen toteutetaan tulostenmukainen esilatauspiiri, joka myös testataan ja kytketään moottoripyörän sähköjärjestelmään. Esilatauspiirin komponenttien kasauksen ollessa valmis, sille suunnitellaan suojakotelo, joka valmistetaan 3D -tulostamalla.

1.3 Työn rakenne

Tutkimus alkaa johdannolla, jossa on kerrottu työn taustoista, tavoitteista, rakenteesta sekä yrityksestä, johon tutkimus toteutetaan. Teoriaosassa käsitellään esilatauspiiriä ja sen eri komponentteja sekä vaatimuksia esilatauspiirille. Teoriaosuuden jälkeen siirrytään esilatauspiirin toteutukseen. Toteutukseen sisältyy komponenttien valinta, piirikaavio, suojakotelo, valmistettavuus ja hinta, fyysinen koko ja kestävyys sekä itse piirin testaus. Työosuuden jälkeen kerrotaan tuloksista ja johtopäätöksistä. Lopussa on työssä käytetyt lähteet sekä liitteet.

1.4 Verge Motorcycles Oy

Verge Motorcycles Oy (entinen RMK Vehicle Corporation Oy) on suomalainen sähkömoottoripyöriä valmistava startup-yritys. Yrityksen toimipaikka sijaitsee Seinäjoella Etelä-Pohjanmaalla. Yritys on aloittanut toimintansa vuonna 2018. Sähkömoottoripyörän myyntivalttina toimii innovatiivinen vannemoottori.

2 ESILATAUSPIIRI JA SEN KOMPONENTIT

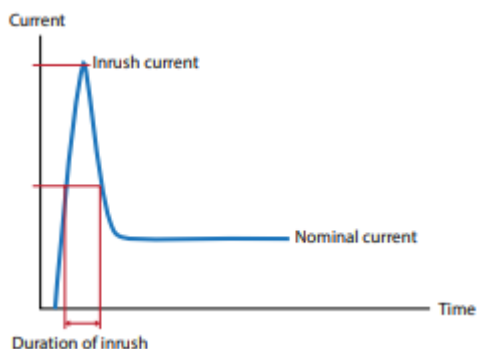
2.1 Esilatauspiiri

Esilatauspiiriä käytetään kapasitiivisissä järjestelmissä, joissa esiintyy suuria jännite-eroja (Sensata, 2020). Kapasitiivisuus aiheuttaa suuria syöksyvirtoja, joiden huippuarvot voivat olla tuhansia ampeereita. Tällaiset syöksyvirrat voivat rikkoa järjestelmän komponentteja, jos tätä virtaa ei rajoiteta ja ohjata. Esilatauspiiriä käytetään rajoittamaan tätä syöksyvirtaa, jolloin jännite nostetaan hitaammin lähtöjännitteen tasolle, jonka jälkeen pääkontaktorit voidaan sulkea. Esilataus mahdollistaa sähkökomponenttien pidemmän käyttöiän ja samalla parantaa koko järjestelmän luotettavuutta. Sähkö- ja hybridiajoneuvoissa esilatauspiiriä voidaan käyttää jokaisella käynnistyskerralla, mutta esimerkiksi teollisuusvirtalähteissä esilatausta käytetään harvemmin. Akunhallintajärjestelmä ohjaa kontaktoreiden toimintaa ja huolehtii siitä, että akku kytketään aina esilatauspiiriin kautta muuhun järjestelmään. Hitsautuneet kontaktorit ovat yleisimpiä kontaktoreiden vikatiloista. Sensatan (2020) mukaan, tähän on muutamia yleisiä syitä:

- Ylivoimaisesti yleisin kontaktorihitsauksen syy on syöksyvirrat. Tämä voidaan estää oikein suunnitellulla ja käytetyllä esilatauspiirillä. Pahimmassa tapauksessa kontaktori sulkeutuu, mutta ei avaudu uudelleen, jolloin virta kulkee kontaktorin lävitse, vaikka kontaktoria yritettäisiin ohjata auki.
- Yksi syy kontaktorin hitsautumiseen voi olla myös isku tai tärinä, jolloin virran kulkeutuessa koskettimien lävitse isku tärinää koskettimet erilleen, ja sitä seuraa uudelleen sulkeutuminen. Tämä voi aiheuttaa valokaaren, joka aiheuttaa paikallisia kuumia kohtia, jotka sulavat. Kontaktorin sulkeutuessa uudelleen, kuumat kohdat jäähtyvät ja jäähmettyvät, jolloin kontaktori hitsautuu.
- Oikosulku, jolloin jopa tuhansien ampeereiden virta kulkee suljetun kontaktorin lävitse, jolloin kontaktorit voivat hitsautua kiinni korkean lämmön syntymisen takia.

Hitsautuneiden koskettimien estämisen lisäksi esilataus voi myös auttaa havaitsemaan vialliset piirit, järjestelmäongelmat tai muita sähköisiä vaaroja. Oikosulun tapauksessa esilatausvastus rajoittaa virtaa, mikä minimoi järjestelmävaurion, kunnes sulake katkaisee virtapiiriin.

Esilatauspiirissä voi olla myös hälytystoiminto ja vikailmaisin, joka avustaa käyttäjää havaitsemaan vian. Joissakin tapauksissa käynnistysvirta voi olla tarpeeksi suuri rikkomaan sulakkeen, jolloin esilatauspiiriä voidaan hyödyntää estämään tiettyjen suojalaitteiden aiheuttomat vikatilanteet. Kun jännite syötetään varaamattomaan kapasitiiviseen kuormaan, kondensaattori alkaa latautua. Aluksi alkaa syöksyvirta ja lopulta se tasoittuu vakaaseen kuormaan (kuvio 1).



Kuvio 1. Syöksyvirta ilman esilatausta (Sensata, 2020).

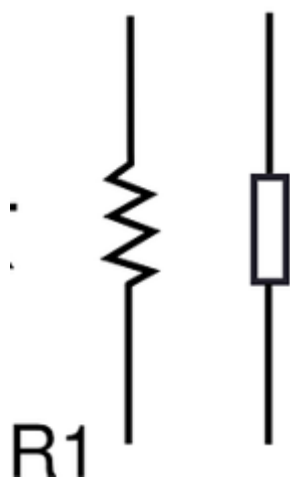
Esilatauspiirin tarkoituksena on rajoittaa käynnistysvirtaa järjestelmän käynnistyessä (Sensata, 12.11.2020). Esilatausaika voidaan määrittää tapauskohtaisesti muutamasta millisekunnista useisiin sekunteihin ottaen huomioon järjestelmän jännitteen, kapasitanssiarvon ja rakenteen. Esilatausajan kesto valitaan yleensä järjestelmän jännitteen ja kapasitanssiarvon mukaan, jolloin jännitteen ja kapasitanssiarvon ollessa korkea, esilatausaika on pidempi. Vastus toimii samalla toimintaperiaatteella, kuin venttiili, joka rajoittaa virran virtausta ja pidentää virtausaikaa.

Sähkömoottoripyörässä esilatauspiiri on käytössä jokaisella kerralla, kun ajoneuvoon kytetään virrat päälle ja moottorinohjaimelle syötetään jännite.

2.2 Vastus ja resistanssi

Elektroniikan yleisimpiä osia eli komponentteja ovat erilaiset vastukset. Niiden nimitykset, ulkonäkö sekä koko vaihtelevat niiden käyttötarkoituksen mukaan.

Vastuksella on kaksi piirrosmerkkiä, jotka ovat molemmat yleisesti hyväksytyjä (Silvonen, 2018, s. 35) (kuva 1). Tyhjä laatikko tarkoittaa vaihtovirtapiireissä myös impedanssia. Siksakviivalla voidaan tarvittaessa korostaa sitä, että kyseessä on nimenomaan vastus eikä esimerkiksi kondensaattorin impedanssi.



Kuva 1. Vastuksen piirrosmerkit (Pixabay, i.a.).

Elektroniikkapiireissä vastuksilla rajoitetaan virtaa tai jaetaan jännite haluttuihin osajännitteisiin (Ahoranta, 2012, s. 73).

Yleisimpiä vastuksien kytkentöjä ovat sarjakytkentä ja rinnankytkentä (Hämeri ym., 2011, s. 89–91). Sarjakytkennässä vastukset kytketään peräkkäin, jolloin kytkennän kokonaisresistanssi kasvaa samassa suhteessa eli kokonaisresistanssi on yksittäisten vastusten resistanssien summa. Rinnankytkennässä vastukset ovat rinnakkain, jolloin kytkennän kokonaisresistanssin käänteisarvo on yksittäisten vastusten resistanssien käänteisarvojen summa. Rinnankytkennässä vastuksilla on aina sama jännite. Vastus nimensä mukaisesti vastustaa virran kulkua Ohmin lain kaavan mukaisesti (Ahonen ym., 2016, s. 33).

Eri aineiden sähkönjohtavuuden vertailemiseksi on otettu käyttöön suure nimeltä resistiivisyys (Ahoranta, 2012, s. 36). Resistiivisyys kertoo, kuinka suuri resistanssi on määrätyn kokoisella kappaleella. Resistiivisyyden suuretunnus on kreikkalainen kirjain ρ (roo).

2.2.1 Kiinteät vastukset

Kiinteät vastukset ovat vastuksia, joiden resistanssiarvo on kiinteä eli muuttumaton (Haiko, 2009, s. 171–172). Tällaisia vastuksia ovat mm. kalvovastus, vastusverkko, vastusryhmä, jännitejakovastus, nollavastus, lankavastus, tehovastus ja ohitusvastus. Kalvovastuksia ovat erilaiset metalli- tai hiilikalvovastukset, jotka ovat yleisiä elektroniikan rakenneosia. Kalvovastuksia valmistetaan myös palakomponentteina eli pintaliitoskomponentteina. Palakomponenttien suosio perustuu niiden luotettavuuteen, pieneen kokoon sekä koneellisen ladonnan

tuomaan säästöön. Vastusverkot ovat esimerkiksi SIL- tai DIL-koteloissa olevia mm. logiikkakytkentöihin tarkoitettuja päätevastuksia eli terminaattoreita.

Vastusryhmät ovat esimerkiksi pintaliitoskomponenttikotelossa olevia erillisen vastuksen paketteja (Haiko, 2009, s. 172–174). Tarkkuudeltaan ne voivat olla esimerkiksi +/-1 % ja lämpötilakerroimeltaan +/-100 ppm, eli ne ovat erittäin laadukkaita komponentteja. Jännitejakovastukset ovat vastuspaketteja, jotka on yksinkertaisimmillaan toteutettu kahden tarkkuusvastuksen sarjakytkenällä, ja ne soveltuvat mittalaitteiden tarkkuutta vaativiin jännitejakotehtäviin. Jännitejakovastusten ominaisuuksia ovat tarkka jännitteenjakosuhte, suuri jännitekesto sekä pieni lämpötilakerroin. Nollavastukset näyttävät tavallisilta vastuksilta, mutta ne eivät varsinaisessa mielessä ole lainkaan vastuksia. Niiden resistanssi on todella pieni, ja niitä käytetäänkin lyhyinä johtoina piirilevyn johdinpuolella ylittämään piirilevyn poikittaisia johdotuksia. Lankavastusten käyttö perustuu niiden suuren tehohäviön keston. Niitä käytetään mm. virtaa rajoittavina vastuksina kytkennöissä, joissa tavallisen vastuksen tehonkesto ei ole riittävän suuri. Niiden huonona ominaisuutena saattaa olla rakenteesta johtuva induktiivinen ominaisuus, jolloin lankavastus toimii kelana ja sen impedanssi määräytyy siihen vaikuttavan taajuuden mukaan. Lankavastuksella voi olla myös alumiiniprofiilista tehty vaippa. Tehovastukseksi kutsutaan sellaista resistiivistä vastusta, jolla on suuri tehonkesto. Näitä vastuksia kutsutaan myös ei-induktiivisiksi vastuksiksi. Edellä mainitut lankavastukset ovat myös tehovastuksia, mutta on esitetty erikseen niiden induktiivisen ominaisuuden vuoksi. Tarkkuusvastukset ovat tavallisten vastusten kaltaisia, mutta niiden resistanssiarvojen poikkeamat ovat hyvin pieniä. Tarkkuusvastukset ovat kalliita ja niitä käytetään mm. mittaus- ja kalibrointilaitteissa.

Sulakevastukset ovat PTC-vastuksista valmistettuja tuotesarjoja, joita voidaan käyttää laitteiden sulakkeina (Haiko, 2009, s. 175). Sulakevastus ei hajoa oikosulusta, joten sitä voidaan käyttää lukuisia kertoja. Oikosulkutilanteessa se lämpenee nopeasti, jolloin virran kulku rajoittuu. Ohitusvastukset ovat suurille virroille tarkoitettuja pieniohmisia vastuksia. Niitä käytetään mm. muuntamaan suuri virran arvo jännitearvoksi erilaisissa mittalaitteissa. Ohitusvastus ei saa vaikuttaa virtapiiriin, jolloin sen resistanssin on oltava pieni.

2.2.2 Säädettävät vastukset

Kiinteiden vastusten lisäksi on myös säädettäviä vastuksia, joiden resistanssiarvoa voidaan nimensä mukaisesti säätää esimerkiksi käsin kiertämällä, liu'uttamalla tai painamalla, työkalulla tai moottorinohjauksella. Säädettävät vastukset voidaan jaotella seuraaviin: potentiometrit, trimmeripotiometrit, aseteltavat lankavastukset, painikeohjattavat vastukset, moottoriohjattavat vastukset sekä dekadivastukset. Tavallisia potentiometrejä ovat hiilikalvopotiometrit, joita käytetään edullisissa laitteissa. Potentiometrillä voidaan muuttaa resistanssia suhteessa säädön kiertokulmaan lineaarisesti, logaritmisesti tai eksponentiaalisesti. Yleisimmin käytetyt potentiometrit ovat lineaarisia.

Työkalusäätöisiä vastuksia eli trimmereitä käytetään kytkennöissä, joissa tarvitaan laitteen toimintakuntoon saattamiseksi ennakoasetuksia, ennen laitteen luovuttamista käyttäjälle (Haiko, 2009, s. 179–181). Trimmeripotiometrit ovat hinnaltaan edullisia. Potentiometrien ja trimmeripotiometrien lisäksi on vielä eräitä vastuksia, joiden arvoa voidaan säätää. Painikeohjattavat tarkkuuspotiometrit soveltuvat esimerkiksi laboratoriokäyttöön. Moottoriohjattavia potentiometrejä voidaan käyttää esimerkiksi kauko-ohjattavien äänentoistolaitteiden äänenvoimakkuuden säädössä. Dekadivastuksia voidaan käyttää esimerkiksi koulujen laboratorioissa tarkkojen resistanssiarvojen synnyttämiseksi. Hyvät dekadivastukset ovat kalliita.

2.2.3 Säätävät vastukset

Jos jokin ulkopuolinen tekijä saa aikaan vastuksen resistanssiarvon muuttumisen, puhutaan säätävistä vastuksista (Haiko, 2009, s. 181–183). Yleisiä resistanssimuutoksen aiheuttajia ovat lämpö, valo, jännite tai mekaaninen liike. Säätävät vastukset jaotellaan neljään luokkaan:

- NTC (Negative Temperature Coefficient) -vastukset. NTC-vastukset ovat lämpötilaan reagoivia vastuksia. NTC-vastuksella on negatiivinen lämpötilakerroin, jolloin lämpötilan kasvaessa sen resistanssi pienenee.

- PTC (Positive Temperature Coefficient) -vastukset. PTC-vastukset ovat myös lämpötilaan reagoivia vastuksia. Erona edelliseen on, että PTC-vastuksella on positiivinen lämpötilakerroin, jolloin lämpötilan kasvaessa sen resistanssi kasvaa.
- LDR (Light Dependent Resistor) -vastukset. LDR-vastuksia käytetään erilaisissa valaistuksen säätötehtävissä sekä valaistusta kytkevissä hämäräkytkimissä. Sen resistanssiarvo seuraa valaistuksen muutosta.
- VDR (Voltage Dependent Resistor) -vastukset. VDR-vastuksen eli varistorin resistanssi pienenee äkillisesti, jos siihen vaikuttava jännite ylittää varistorille määritellyn jännitetason. Käytetään esimerkiksi verkkojännitteeseen liitettävien laitteiden ylijännitteiden rajoittamiseen.

2.3 Releet

Tavallinen rele on sähkömekaaninen kytkin (Haiko, 2009, s. 149). Releen käämissä kulkeva sähkövirta saa aikaan magneettikentän, jonka voimavaikutuksesta syntyvä mekaaninen liike ohjaa releen kytkintoimintojen asentoa. Releitä voidaan ohjata pienellä ohjausjännitteellä kytkemään suuria jännitteitä tai virtoja. Relettä ohjaava pienjännitteinen virtapiiri voi olla erillään virtapiiristä, jota se kytkee. Suuria releitä kutsutaan nimellä kontaktori. On olemassa myös puolijohdereleitä, joissa releen ohjauspiiri on erotettu optisesti sen työpiiristä.

Sähkömekaanisia releitä on saatavilla erilaisilla toiminnoilla ja kosketinmäärillä (Ahonen ym., 2016, s. 28–29). Releen käyttötarkoituksesta riippuen, valmistaja yleensä ilmoittaa siitä erilaisia arvoja, kuten kosketintoiminnot, käämin jännite sekä koskettimien jännitteen- ja virrankesto. Releen käämi tuo induktiivista reaktanssia virtapiiriin, mikä voi aiheuttaa jännitepiikkejä piirissä, ja ne taas voivat rikkoa virtapiirin laitteita. Tämä estetään kytkemällä releen rinnalle estosuuntaan diodi, joka purkaa releen käämin aiheuttaman induktiivisen kuorman.

Sähkömekaanisia releitä käytetään esimerkiksi erilaisissa ohjauskelloissa, kun ohjaavana piirinä on elektroninen laite ja ohjattavana laitteena verkkosähkökäyttöinen laite (Haiko, 2009, s. 150).

Reed-releellä tarkoitetaan relettä, jonka kosketinjärjet on ilmatiiviisti suljettu lasiputkeen (Aho-
nen ym., 2016, s. 30). Koskettimet voivat olla sulkeutuvia, avautuvia tai vaihtokoskettimia.
Reed-releitä käytetään vaativissa oloissa, kuten räjähdysvaarallisissa tai pölyisissä tiloissa.
Puolijohderele ei sisällä lainkaan liikkuvia komponentteja toisin kuin sähkömekaaniset releet.
Puolijohdereleen kosketinkärjet on nimensä mukaisesti korvattu puolijohteella, joka on
yleensä transistori, tyristori tai triakki. Etuina sähkömekaaniseen releeseen verrattuna on pa-
rempi värinänkesto, pidempi elinikä, suurempi kytkentänopeus ja parempi luotettavuus. Puoli-
johdereleet myös aiheuttavat vähemmän häiriöitä, koska ne kytkeytyvät päälle siniaallon nol-
lapisteessä.

2.4 Kondensaattorit

Yleisiä elektroniikan komponentteja ovat myös erilaiset kondensaattorit (Haiko, 2009, s. 188).
Niiden ulkonäkö, koko sekä nimitykset vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Tasasähköpii-
riin kytketyn kondensaattorin läpi ei normaalisti kulje virtaa. Virtaa voi kuitenkin kulkea kon-
densaattorin varaamisen yhteydessä, kunnes sen jännite on saavuttanut lopullisen arvonsa,
ja kondensaattorin purkamisen yhteydessä, kunnes jännite on pienentynyt jännitteettömäksi.
Ideaalisen kondensaattorin ainut ominaisuus on sähköenergian varaaminen sähköstaattisen
kentän muodossa. Tätä ominaisuutta sanotaan kondensaattorin kapasitanssiksi, jonka mitta-
yksikkö on faradi (F). Faradin yksiköitä ovat myös mikrofaradi (μF), nanofaradi (nF) ja pikofa-
radi (pF). Vaihtosähköpiiriin kytketyn kondensaattorin lävitse kulkee vaihtovirta, joka syntyy,
kun kondensaattorin sähkövarausta vuoroin varataan ja puretaan.

Kondensaattori muodostuu kahdesta ohuesta metallilevystä, jotka ovat lähellä toisiaan ja nii-
den välissä on sähköeriste (Ahoranta, 2012, s. 136). Kondensaattorin levyille varastoidaan
sähköä, toisella levyllä on positiivinen sähkövaraus ja toisella negatiivinen sähkövaraus. Eris-
teaineena voi toimia ilma, jokin kiinteä aine tai oksidikalvo.

Kondensaattoreita käytetään paljon elektroniikkapiireissä (Ahoranta, 2012, s. 146). Niitä käy-
tetään tasa- ja vaihtojännitteen erottamiseen, tasajännitteen vakavointiin, eritaajuisten vaihto-
virtojen jakamiseen ja aikahidastuspiireissä.

Useita kondensaattoreita voidaan joutua kytkemään toisiinsa sarjaan, rinnan tai sekakytkennäksi (Haiko, 2009, s. 189–190). Kytkemisen syitä ovat esimerkiksi sopivan kapasitanssiarvon saavuttaminen kahdella tai useammalla rinnan kytketyllä kondensaattorilla, ja polaarittoman kondensaattorin rakentaminen kahden elektrolyyttikondensaattorin kytkemisellä sarjaan siten, että niiden samannimiset navat + tai – ovat vastakkain. Rinnan kytkettyjen kondensattoreiden kokonaiskapasitanssi C on niiden osakapasitanssien $C_1, C_2 \dots$ summa. Rinnan kytkettyjen kondensattoreiden kokonaiskapasitanssi on aina suurempi kuin suurin osakapasitanssi. Sarjaan kytkettyjen kondensattoreiden kokonaiskapasitanssin käänteisarvo on niiden osakapasitanssien käänteisarvojen summa. Kondensattoreiden sekakytkennät, jossa kondensaattorit ovat sekä rinnan, että sarjassa, ovat harvinaisia.

2.5 BMS

Litiumioniakuilla on paljon etuja lyijyhappoakkuihin verrattuna (Battle Born Batteries, 2021). Ne ovat kevyempiä, tehokkaampia, latautuvat nopeammin ja niillä on pidempi käyttöikä. Miinuksena litiumioniakuilla on herkkyys muuttuville olosuhteille, jotka voivat vahingoittaa akkuja. Jotta litiumioniakuista saataisiin kaikki hyöty irti, niiden on oltava rakenteeltaan monimutkaisempia, ja niiden pitää sisältää useampia komponentteja, jotta vahingolliset olosuhteet pystyttäisiin estämään. Tämä onkin BMS:n (Battery Management System) tärkein tehtävä. Akunhallintajärjestelmä valvoo ja hallitsee koko akuston käyttöä, suorituskykyä ja pitää akun toiminnan sille määritettyjen turvarajojen sisäpuolella.

BMS on välttämätön litiumioniakkujärjestelmässä (DS New Energy, 2019). Se hallitsee jokaisen akkukennon reaaliaikaisen ohjauksen, kommunikoi ulkoisten laitteiden kanssa, hallitsee SOC (State Of Charge) -laskentaa, mittaa lämpötilaa ja jännitettä. BMS:n valinta vaikuttaa akuston käyttöikänsä sekä laatuun.

Акунhallintajärjestelmä on tärkeä osa akun turvallista toimintaa, suorituskykyä ja käyttöikänsä (Battle Born Batteries, 2021). Sen ominaisuuksiin kuuluu laskea jäljellä oleva latausaika, tarkkailla akun lämpötilaa ja turvallisuutta. Se myös suojaa järjestelmää, johon litiumioniakku on kytketty ja lisäksi myös järjestelmää käyttävää henkilöä. BMS:n pääasiallinen tehtävä on suojata akkukennoja yllä latauksen tai ylipurkautumisen aiheuttamilta vaurioilta. BMS monitoroi yksittäisiä kennoja akustossa ja sen perusteella laskee, kuinka

paljon virtaa on mahdollista ottaa vastaan latauksessa sekä syötettäessä järjestelmälle vahingoittamatta akustoa.

Akunhallintajärjestelmä tasapainottaa kennorivistöjen eroavia jännitteitä (Synopsys, i.a.). Tasapainotusjärjestelmiä on kaksi pääluokkaa, aktiivinen ja passiivinen. Passiivinen tasapainotusjärjestelmä mahdollistaa tilanteen, jossa jokaisella akkukennolla on latauksen jälkeen sama lataustaso, kuin heikoimmalla kennolla. Se siirtää pienellä virralla energiaa täydemmistä kennoista tyhjempiin. BMS tarkkailee jokaista kennoa ja havaitessaan tietyn kennon lähestyvän suurinta latausrajaa, se ohjaa ylimääräisen virran seuraavalle kennolle.

2.6 Elektroniikan suojaustavat

Yleisiä elektroniikan suojaustapoja ovat erilaiset pinnoitteet ja kotelot (Manufacturing Tomorrow, 2021). Pinnoitteen ideana on eristää elektroniikan komponentti materiaaliesteellä sitä vahingoittavilta asioilta. Pinnoite voi olla ohut kerros, joka asennetaan kappaleen ympärille, jolloin se lisää sähköistä eristystä sekä suojaa komponenttia vedeltä ja pölyltä. Pinnoite on hyvä suoja komponentille esimerkiksi komponenttia käsitellessä. Koteloinnilla suojataan lähes jokaista elektronista laitetta. Kotelon tehtävä on suojata laitetta tai komponenttia sateelta, tuulelta, suoralta auringonvalolta ja pölyltä. Paras elektroniikan suojaus saavutetaan yhdistämällä pinnoitus ja kotelointi. Suojaus on myös hyvä toteuttaa useammalla eri materiaalikerroksella, jolloin yhden kerroksen pettäminen ei aiheuta tuhoa.

Komponentin valuhartsaus on myös tehokas suojaustapa elektroniikalle (Electrolube, 2019). Hartsit voidaan yleisesti jakaa kolmeen eri kategoriaan: epoksihartsit, uretaanihartsit ja silikonihartsit. Epoksihartsit ovat hyvin yleisesti käytettyjä hyvien ominaisuuksiensa takia, kuten lämmönkesto ja kosteuden- ja pölyneristys. Epoksihartsien kuivamisaikaa pidetään yleisesti hieman hitaana, mutta kovettumisaikaa voidaan nopeuttaa sekoittamalla hartsiin kovetinta. Myös lämpötilaa säätelemällä voidaan vaikuttaa hartsin kovettumisnopeuteen. Polyuretaanihartsit ovat epoksihartsin kaltaisesti hyviä eristämään komponentteja epäpuhtauksilta ja ovat samalla myös loistavia sähköneristeitä. Polyuretaanihartsit ovat hieman joustavampia, kuin epoksihartsit, joten valettuaan ne eivät vahingoita esimerkiksi komponenttien ohuita jalkoja. Silikonihartsit ovat erittäin hyviä käytettäväksi esimerkiksi LED- valoissa, koska ne ovat läpinäkyviä ja hyvin UV- valolta suojaavia. Silikonihartsit

omaavat myös erittäin hyvän lämpötilakeston, mikä tekee niistä hieman kalliimpia kuin edellä mainitut hartsit.

Kosteus ja vesi vaikuttavat laitteisiin monin eri tavoin (Hienonen ym., 2007, s. 52). Kosteuden ollessa suhteellisen korkea, voidaan pääasiallisina vaikutuksina pitää asioita, kuten kosteuden absorptio ja adsorptio, mekaanisen lujuuden heikkeneminen, turpoaminen, korrosio ja elektrolyysi, eristeiden johtuvuuden kasvu sekä dielektrisyysvakion kasvu. Tyypilliset vikaantumiset tämän kaltaisilla vaikutuksilla ovat fyysinen vikaantuminen, eristysvika, mekaaninen vika ja sähköisten häviöiden kasvaminen. Kosteuden ollessa suhteellisen alhainen voidaan pääasiallisina vaikutuksina pitää murtumista, kuivumista, mekaanisen lujuuden heikkenemistä, kutistumista ja metallikosketinten kulumista. Tällaiset vaikutukset aiheuttavat vikoja, kuten mekaanisia vikoja ja murtumia.

Koteloinnin tehtävä korroosioriskin pienentämiseksi on suojata elektroniikkaosia seuraavasti: vähentää mekaanista rasitusta, minimoida kaasu- ja pölykontaktit sisäosissa, estää veden, pölyn ja eliöiden pääsy sisäosiin, vähentää lämpötilan vaihtelua sisäosissa ja vähentää veden kondensoitumisriskiä (Hienonen ym., 2007, s. 123). Kotelorakenteessa voidaan hyödyntää monikerrostekniikkaa, jossa ulkoa lähtien eri kerroksille annetaan valikoidut suojaavat tehtävät:

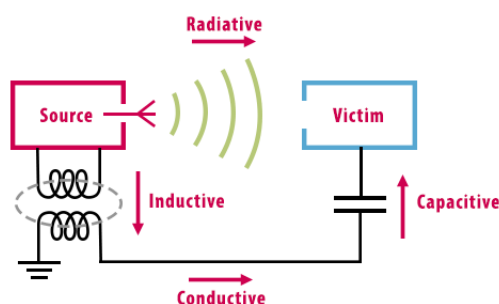
- Uloin kerros suojaa rakennetta auringon säteilyltä, sateelta, tuulelta ja mekaanisesti.
- Keskikerros suojaa lämpötilan vaihteluilta ja vähentää kaasujen vaihdon ulkoa sisälle.
- Sisin kerros komponenttilevyillä ja komponenteissa suojaa varsinaisen elektroniikan laitekotelon sisään pääsevältä kosteudelta ja epäpuhtauksilta.

3 VAATIMUKSET ESILATAUSPIIRILLE

3.1 EMC

Sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC (Electromagnetic Compatibility) tarkoittaa elektronisen laitteen tai järjestelmän kykyä toimia luonnollisessa toimintaympäristössään (Walden ym., 2015, s. 219). Laite tai järjestelmä ei saa tuottaa kohtuuttomasti sähkömagneettisia häiriöitä ympäristöönsä. Tätä häiriötä kutsutaan lyhenteellä EMI (Electromagnetic Interference), joka tarkoittaa sähkömagneettista häiriötä (kuva 2).

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE



Kuva 2. Sähkömagneettinen häiriö (KEBamerica, 13.7.2021).

EU:n alueella markkinoitavien sähkö- ja elektroniikkalaitteiden on täytettävä EMC-direktiivin olennaiset vaatimukset, ja valmistajan tai laitteen EU:n alueelle tuovan on pystyttävä osoittamaan tuotteiden täyttävien vaatimukset ja laadittava sitä osoittava vaatimustenmukaisuusvaakuutus sekä kiinnitettävä laitteeseen vaatimustenmukaisuutta osoittava CE-merkintä (Suomen Standardisoimisliitto, 2013, s. 4). CE-merkinnän kiinnittämisen edellytyksenä on myös muiden tuotetta koskevien direktiivien, kuten esimerkiksi sähköturvallisuutta koskevan pienjännitedirektiivin vaatimusten mukaisuus. EMC-standardit voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään käyttötarkoituksensa perusteella. Yleisstandardit, tuote- tai tuoteperhestandardit ja perusstandardit. Yleisstandardeissa esitetään EMC-vaatimukset tiettyyn toimintaympäristöön tarkoitetuille laitteille. Sitä voidaan käyttää silloin, kun tarkasteltavalle tuotteelle ei ole olemassa omaa tuote- tai tuoteperhestandardia. Yleisstandardit viittaavat perusstandardeihin testausmenetelmien sekä testien suorittamisen suhteen. Tuote- tai tuoteperhestandardeissa EMC-vaatimukset esitetään tiettyä tuotetta tai tuoteryhmää koskien. Perusstandardeissa esitetään EMC-testausmenetelmille, testilaitteistolle sekä testausolosuhteille yleisemminkin asetettavat vaatimukset.

Sähkömoottoripyörän tyyppihyväksyntää varten ajoneuvolle tehdään useita testejä, esimerkiksi EMC-testi. Kyseisen esilatauspiirin on selvittävä kyseisestä testistä moitteita, ja se on otettava suunnittelussa huomioon oikeanlaisella eristyksellä.

3.2 IP-luokitus

Sähkölaitteita käytetään hyvin erilaisissa olosuhteissa (Stek, i.a.). Sähkölaitteiden vesi- ja pölysuojaukselta sekä vierailta esineiltä suojaukselta voidaan arvioida kansainvälisellä kotelointiluokituksella eli IP-koodilla (International Protection). Sähkölaitteesta voi löytyä esimerkiksi koodi IP54. Koodin ensimmäinen numero kertoo, miten laite on suojattu vieraiden esineiden ja pölyn osalta, kun taas koodin toinen numero kertoo, miten laite on suojattu vedeltä. Numeroiden jälkeen koodissa voi olla yksi tai kaksi lisäkirjainta, joilla ei tavallisen sähkönkäyttäjän kannalta ole yleensä merkitystä. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä suurempi numero, sitä paremmin laite on tältä osin suojattu. Jos IP-merkintää ei ole erikseen ilmoitettu, suojausluokka on IP20. Tämä tarkoittaa, ettei vieras laite pääse sisään, mutta laitetta ei ole suojattu vedeltä. Tällaisia laitteita käytetään yleensä kuivissa sisätiloissa.

Ensimmäinen numero kertoo, kuinka hyvin laite on suojattu vieraiden esineiden ja pölyn sisäänpääsystä:

0 = suojaamaton

1 = Kun esineen halkaisija on yli 50 mm

2 = Kun esineen halkaisija on yli 12,5 mm

3 = Kun esineen halkaisija on yli 2,5 mm

4 = Kun esineen halkaisija on yli 1,0 mm

5 = Pölysuojattu

6 = Pölytiivis

Toinen numero kertoo, kuinka hyvin laite on suojattu veden sisäänpääsyn haitallisilta vaikutuksilta:

0 = Suojaamaton

1 = Pystysuoraan tippuvalta vedeltä

2 = Tippuvalta vedeltä (+/- 15 astetta)

3 = Satavalta vedeltä (+/- 60 astetta)

4 = Roiskuvalta vedeltä

5 = Vesisuihkulta (joka suunnasta)

6 = Voimakkaalta vesisuihkulta

7 = Lyhytaikaisesti upotettuna

8 = Jatkuvasti upotettuna

9 = Korkeapaineiselta ja kuumalta vesisuihkulta

Merkinnässä voidaan käyttää myös kirjaimia A-D, joka kertoo, miten laite on erityisesti suojattu koskettamiselta:

A = Suojattu nyrkiltä

B = Suojattu sormelta

C = Suojattu työkalulta

D = Suojattu langalta

4 PIIRIN TOTEUTUS

Piirin suunnittelussa on otettava huomioon monia eri seikkoja. Edellä mainittujen vaatimusten lisäksi, sen on sovittava kyseisen sähkömoottoripyörän sähköjärjestelmään. Suunnittelu aloitettiin ottamalla pyörän alkuarvot huomioon. Akuston ollessa täynnä, järjestelmän jännite on 400 voltia, ja se on siis akuston maksimijännite. Esilatauksen keston tavoitteeksi valikoitui 1–1,5 sekuntia. Varsinaisen esilatauspiirin suunnittelu alkoi teorian rinnalla jo melko alkuvaiheessa opinnäytetyön tekemistä. Tutkimus alkoi selvittämällä esilatauspiirin toimintaperiaatteen ja sen mahdolliset variaatiot. Suunnitellun esilatauspiirin tarkoitus oli olla mahdollisimman yksinkertainen, pieni, taloudellinen valmistaa, hyvä kestävyydeltään ja tietysti toimiva kyseisen sähkömoottoripyörän sähköjärjestelmän kanssa. Yksinkertaisimmillaan esilatauspiirin voi toteuttaa vastuksella ja releellä. Suunnittelua helpotti se, että itse esilatauspiiriin ei suunniteltu releen ohjausta, vaan relettä ohjataan yhdellä akunhallintajärjestelmän (BMS) liitännällä. Relettä ohjataan 12 voltin jännitteellä, jonka maadoitusta BMS katkoo. Teorian pohjalta komponentteja alettiin mitoittamaan moottoripyörään sopivaksi. Moottoripyörän akun jännitteen ollessa maksimissaan 400 voltia, asettaa se piirin kestävyydelle jo tiettyjä rajoitteita. Piiriin valittiin aluksi 200 ohmin vastus ja lähdettiin kokeilemaan siitä pienempi- ja suurempi resistanssisia vastuksia. Lopulta kuitenkin juuri ensimmäinen kokeiltu vastusarvo olikin paras vaihtoehto kyseiseen piiriin.

4.1 Komponenttien määrittäminen

Komponenttien määrittäminen aloitettiin mittaamalla moottoripyörässä käytettävän moottorinohjaimen kondensaattoreiden kapasitanssiarvo ohjaimen + ja – navoista. Mittaamiseen käytettiin Fluken 1587 FC yleismittalaitetta, jolla mitatessa kapasitanssiarvoksi saatiin 1877 μF (kuva 3). Moottorinohjaimen tietolomakkeen mukaan kapasitanssiarvo on 1880 μF , joten mittaustulos varmistui oikeaksi.



Kuva 3. Moottorinohjaimen kondensaattoreiden kapasitanssi.

Aikaisemmin opinnäytetyössä mainittu esilatausajan tavoitekesto tarkistettiin laskemalla moottorinohjaimen kondensaattoreiden latautumisaika.

Kun kondensaattorin kanssa sarjassa on vastus, kondensaattorin varausvirta pienenee ja varautuminen hidastuu (Ahoranta, 2012, s. 144). Kondensaattori varautuu sitä hitaammin, mitä suurempi vastuksen resistanssi on. Varautumisen nopeuteen vaikuttaa myös kondensaattorin kapasitanssi. Mitä suurempi kondensaattorin kapasitanssi on, sitä enemmän siihen mahtuu sähköä ja sitä kauemmin varautuminen kestää.

Kondensaattorin latautuessa tai purkautuessa vastuksen kautta, täyteen lataukseen tai purkamiseen tarvitaan tietty aika (Engineer educators, i.a.). Lataus- tai purkunopeus määräytyy piirin aikavakion mukaan. RC-piirin aikavakio on aikaväli, joka on yhtä kuin resistanssin (ohmeina) ja kapasitanssin (faradeina) tulo ja jota symboloi kreikkalainen kirjain tau (τ).

Kondensaattori latautuu 63,2 %:n syöttöjännitteestä yhden ajanjakson (RC) aikana (Calculator Academy, 2021). Viiden ajanjakson aikana kondensaattori on latautunut 99 %:iin syöttöjännitteestä. Tyypillisesti neljän tai viiden ajanjakson aikaa pidetään kondensaattoreiden täyteenlatautumisaikana. Kondensaattori ei ikinä tavoita 100 % latausta.

Esilatausaika T määritetään kaavalla

$$\tau = RC \quad (1)$$

missä

τ on esilatausaika sekunteina

R on vastuksen resistanssiarvo ohmeina

C on kapasitanssiarvo faradeina (Sensata, 2020)

$$0,001880F * 200\Omega = 0,376 \text{ s}$$

Moottorinohjaimen kondensaattorit ovat siis 0,376 sekunnin jälkeen 63,2-prosenttisesti latautuneet ja 1,5 s – 1,8 s jälkeen kondensaattoreiden voidaan tulkita olevan täysin latautuneet.

Excel-tilukkolaskentaohjelmaan luotiin taulukko, jolla voi helpommin hahmottaa jännitteen, virran, tehon ja energian nousua suhteessa aikaan (taulukko 1). Taulukkoon voi myös muuttaa haluamansa vastusarvon R ja toteamalla helposti, miten eri arvot muuttuvat.

Taulukko 1. Vastuksen resistanssin vaikutus jännitteen, virran, tehon ja energian muutoksiin ajan suhteen.

C	1880	uF							
	0,00188	F							
R	200	Ohm							
tau	0,376								
V0	400								
RC	0,376								
time step	0,05								
t, [s]	Voltage	Current	Power	Energy	Esilatausvastus				
0,05	49,807	1,751	87,21	4,36	200 Ohm				
0,1	93,411	1,533	143,194	11,52					
0,15	131,587	1,342	176,598	20,35					
0,2	165,008	1,175	193,878	30,044					
0,25	194,269	1,029	199,836	40,036					
0,3	219,886	0,901	198,023	49,937					
0,35	242,313	0,788	191,048	59,489					
0,4	261,947	0,69	180,813	68,53					
0,45	279,137	0,604	168,687	76,964					
0,5	294,187	0,529	155,644	84,747					
0,55	307,362	0,463	142,367	91,865					
0,6	318,897	0,406	129,318	98,331					
0,65	328,996	0,355	116,801	104,171					
0,7	337,837	0,311	105,005	109,421					
0,75	345,577	0,272	94,036	114,123					
0,8	352,354	0,238	83,942	118,32					
0,85	358,286	0,209	74,727	122,056					
0,9	363,48	0,183	66,371	125,375					
0,95	368,028	0,16	58,833	128,316					
1	372,009	0,14	52,065	130,92					
1,05	375,494	0,123	46,009	133,22					
1,1	378,546	0,107	40,607	135,251					
1,15	381,217	0,094	35,802	137,041					
1,2	383,556	0,082	31,536	138,617					
1,25	385,603	0,072	27,757	140,005					
1,3	387,396	0,063	24,414	141,226					
1,35	388,965	0,055	21,46	142,299					
1,4	390,339	0,048	18,855	143,242					
1,45	391,542	0,042	16,558	144,07					
1,5	392,595	0,037	14,535	144,796					

Jännitteen V nousu määritetään kaavalla

$$V_c(t) = V_s \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (2)$$

missä

- V_c on kondensaattorin jännite voltteina
- V_s on akun jännite voltteina
- t on esilatausaika sekunteina
- RC on ajanjakso ohmeina ja faradeina
- e on 2,71828 matemaattinen yksikkö. (Sensata, 2020)

Virran I nousu määritetään kaavalla

$$I(t) = \frac{V_s - V_c(t)}{R} \quad (3)$$

missä

- I on kondensaattoriin virtaava virta ampeereina
- V_s on akun jännite voltteina
- V_c on kondensaattorin jännite voltteina
- R on vastuksen resistanssi ohmeina. (Sensata, 2020)

Tehon P nousu määritetään kaavalla

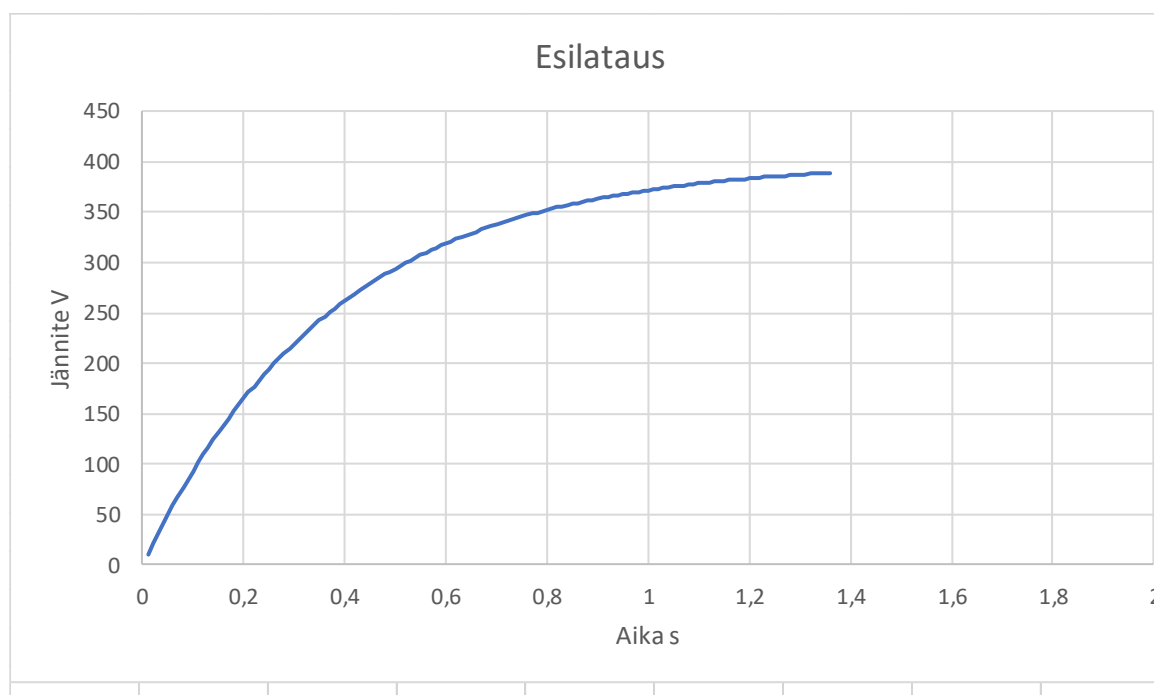
$$P(t) = I(t)^2 \times R \quad (4)$$

missä

- P on vastuksen kuluttama teho watteina
- I on vastuksen läpi menevä virta ampeereina
- R on vastuksen resistanssi ohmeina. (Sensata, 2020)

Resistanssiarvoa muuttamalla muuttuu myös jännitteen suhde aikaan (taulukko 2).

Taulukko 2. Esilatauksen jännitteen nousu ajan suhteen.



Vastuksen kooksi valikoitui siis 200 ohmin tehovastus. Tämä siitä syystä, että 200 ohmilla virta rajoittui hieman alle kahteen ampeeriin sekä esilatauksen kesto lähes täyteen jännitteeseen 1,5 s. Tehovastus siksi, koska sen on kestävä valitulla esilatausajalla vähintään 1,75 ampeerin virta. Releeksi valikoitui MOSFET-tyyppinen puolijohderele, joka omaa sähkömekaaniseen releeseen verrattuna paremman värinänkeston, pidemmän eliniän, suuremman kytkentänopeuden ja paremman luotettavuuden. Releen kriteerit olivat 400 voltin jännitteenkesto sekä kahden ampeerin virrankesto. Releen tietolomakkeen mukaan, releen ohjauksjännitteen on oltava 0,9V – 1,5V sekä ohjauksvirran alle 100 mA. Akunhallintajärjestelmältä tuleva syöttöjännite sekä virta ovat liian korkeita, joten niitä joudutaan rajoittamaan. Tämä hoidetaan yhdellä 1,1 kilo-ohmin vastuksella. Alla olevan laskennan virta-arvo saatiin syöttämällä erillisestä virtalähteestä 1,5V jännite releeseen, jolloin virtalähde ilmoitti kuluvan virran arvon 0,0096A.

Vastus mitoitettiin käyttämällä Ohmin lakia

$$U = I \times R \quad (5)$$

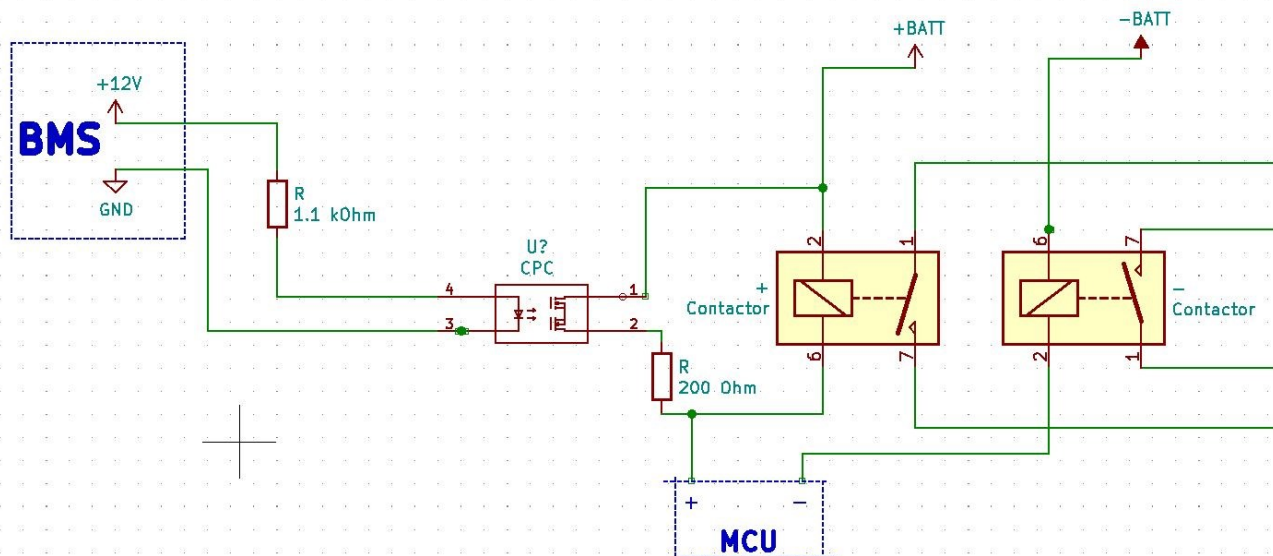
missä

- U on jännite voltteina
- I on virta ampeereina
- R on resistanssi ohmeina. (Tekniikan kaavasto, 2010)

Kaavalla saadaan vastuksen resistanssiarvoksi $R = 1093,75$ Ohmia, joka muuntamalla kilo-ohmeihin saadaan 1,093 kOhm, tällöin vastuksen arvoksi valittiin 1,1 kOhm, joka oli lähimpänä saatua resistanssiarvoa.

4.2 Piirikaavio

Komponenttien valinnan jälkeen piiristä piirrettiin piirikaavio (kuva 4). Kaavion piirtämisessä käytettiin KiCad-nimistä ohjelmaa. Tarkoituksena oli piirtää mahdollisimman yksinkertainen ja selkeä piirikaavio. Kaaviossa BMS kuvaa akunhallintajärjestelmää, josta ohjataan puolijohderelettä auki/kiinni asentoon. MCU (Motor Control Unit) kuvaa moottorinohjainta.

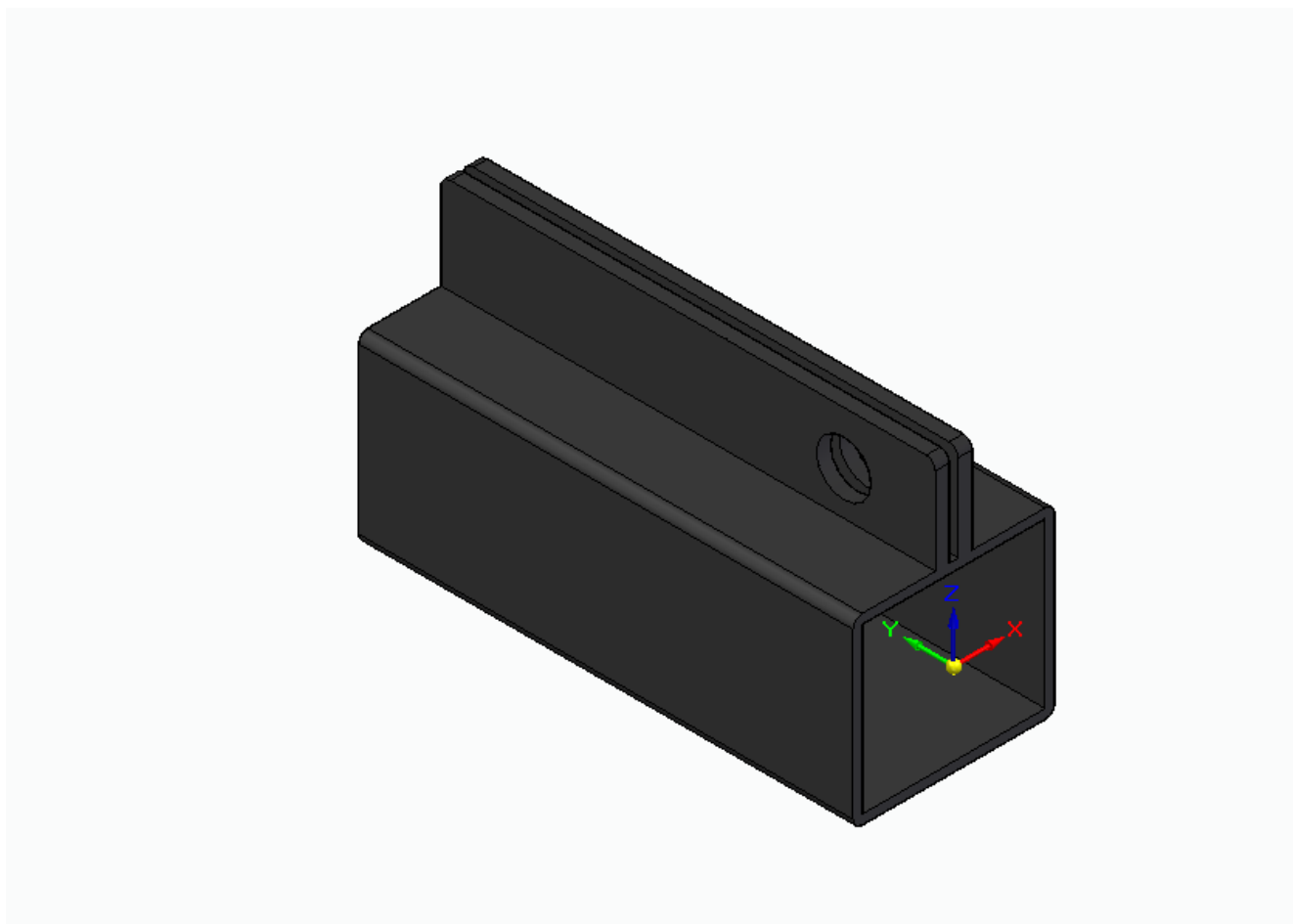


Kuva 4. Esilatauspiirin piirikaavio.

4.3 Suojakotelo

Piirin ollessa valmis, sille suunniteltiin suojakotelo. Suunnittelu aloitettiin sijoittamalla piirin komponentit mahdollisimman pieneen tilaan ja mallintamalla siihen sopiva suojakotelo.

Suojakotelon suunnitteluun käytettiin Solid Edge -mallinnusohjelmistoa (kuva 5). Kotelo valmistettiin 3D-tulostamalla ABS-muovista.



Kuva 5. Suojakotelon CAD-malli.

4.4 Valmistettavuus ja hinta

Esilatauspiirin valmistettavuus haluttiin mahdollisimman tuottavaksi sekä ainakin aluksi oma-tuotantoiseksi. Suunnitellun esilatauspiirin rakentamiskustannukset ovat huomattavasti pienemmät, mitä markkinoilla olevien esilatauspiirien ostaminen. Kaikki piirin valmistukseen tarvittavat tuotteet ovat listattuna alle.

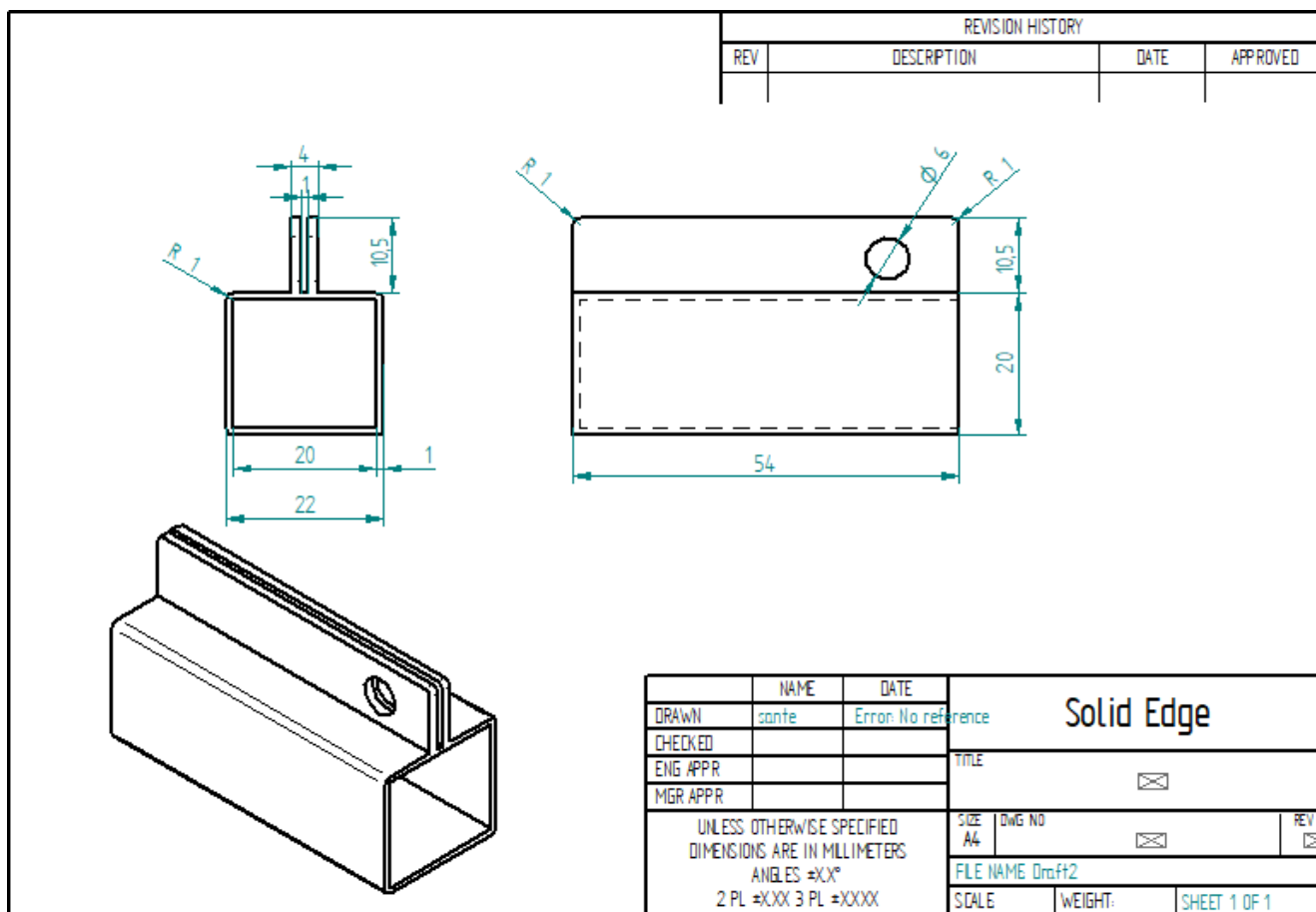
- Tehovastus 200 Ohm 1 kpl (0,9 €)
- Puolijohderele 1 kpl (8,8 €)
- Ohjauspuolen vastus 1 kpl (0,023 €)

- 3D-tulostuskotelo materiaali 7 grammaa (n. 0,14) €
- Valuhartsin n. 2 cl (0,3) €
- Valmistusaika n. 7min (1,5) €

Yhteenlaskettuna esilatauspiirin valmistushinnaksi saadaan siis 11,66 €. Valmistushintaa saadaan vielä pudotettua entisestään tekemällä sekä valamalla useampi esilatauspiiri kerralla.

4.5 Fyysinen koko ja kestävyys

Fyysinen koko haluttiin tässä tapauksessa mahdollisimman pieneksi, jotta piiri voitaisiin sijoittaa kontaktoreiden lähelle, jotka sijaitsevat akun sisällä. Tällöin johtojen mitat pysyvät lyhyinä sekä korkeajännitepuoli akun sisällä. Kotelon ulkoisiksi mitoiksi tuli 22 mm * 20 mm * 54 mm. Lisäksi kotelon katossa on kiinnitysriipa, josta kotelo kiinnitetään pidikkeeseen (kuva 6).



Kuva 6. Suojakotelon mitat.

Komponentit sijoitettiin koteloon, jonka jälkeen kotelo täytettiin elektroniikalle tarkoitetulla kovalla polyuretaanivaluhartsilla. Valuharts liimaa komponentit ja liitokset tiukasti yhdeksi osaksi, jolloin värinänkesto ja iskunkestävyys paranevat huomattavasti. Lämmönkesto hartsi on korkea.

4.6 Piirin testaus

Testausvaiheessa suoritettiin myös monia erilaisia testejä komponenteille, jotta piirin turvallisuus olisi mahdollisimman hyvä. Kyseisiin testeihin kuului enimmäkseen tilanteita, joita kriittisimmässä tapauksessa voisi käydä. Näitä tilanteita ovat valuhartsin paloturvallisuus, vastuksien, releen ja johtojen oikosulut, jotka kaikki voivat aiheuttaa hengenvaarallisen tulipalon tai sähköiskun. Vastuksien oikosulkukestävyys testattiin kytkemällä hartsiin valettu vastus oikosulkuun ja seuraamalla, pystyykö vastuksen kuumeneminen sytyttämään ympäröivän hartsikerroksen tuleen (liite 1). Valuhartsin paloturvallisuutta testattiin sytyttämällä hartsi tuleen ja seuraamalla sammuuko hartsi itsekseen vai toimiiko se

polttoaineena tulelle (liite 2). Releen kestävyttä testattiin syöttämällä liian suuri ohjausvirta releelle, ja sen seurauksena releen ohjauksen toiminta lakkasi, mutta siitä ei aiheutunut vaaratilannetta. Suunnittelun ja komponenttien hartsauksen jälkeen alkoi pääasiallinen testausvaihe. Tähän mennessä komponentteja sekä esilatausta oli testattu lukuisia kertoja ja piiri oli todettu toimivaksi. Sulaketta järjestelmään ei asennettu. Oikosulku/vikatilanteessa vastuksen lanka toimi testeissä sulakkeena ja paloikin poikki sulakelangan tavoin (liite 3). Koko piirin ollessa valettuna hartsiin, sulaketta ei myöskään pääsisi vaihtamaan. Releen korkeajännitepuolen johdot ovat 1,5 mm² paksua, ja ne mitoitettiin eristämään 600V DC-jännitettä, jolloin jännitekestävyys on taattu.

Testaaminen onnistui hyvin muutaman kerran, mutta se alkoi käydä työlääksi, koska moottorinohjaimen jäävän jännitteen purkamiseen meni melkein minuutti aikaa. Tästä syystä moottorinohjaimelle asennettiin purkuvastus, joka purkaa moottorinohjaimen kondensattoreihin jäävän jännitteen kyseiseen vastukseen, jolloin jännite alenee nopeasti ja testausta voidaan toteuttaa nopeammin.

4.7 Arduino-testaus

Esilatauksen testauksen helpottamiseksi, piiriin asennettiin Arduino-kokoonpano, joka käyttää mikro-ohjainta sekä Velleman VMA436 -relemodulia. Arduino on avoimeen laitteistoon perustuva mikro-ohjain/elektroniikka-alusta sekä ohjelmointiympäristö. Valmis ohjelmointikoodi löytyi suoraan internetistä ja se olikin käyttövalmis muutaman numeron vaihtamisella. Arduinon mikro-ohjain ohjasi relemoduulia ohjelman avulla, johon muokattiin haluttava lataus- sekä purkuaika. Latausajaksi valittiin kaksi sekuntia ja purkuajaksi 18 sekuntia, jolloin yhden purku ja latauskierron aika on 20 sekuntia. Itse purkutapahtuman ei tarvitsisi olla niin pitkä, mutta aikaa varattiin reilusti komponenttien jäähtymiselle. Kyseisellä järjestelmällä oli mahdollista testata esilatauspiirin toimivuus sekä kestävyys tuhansia kertoja ilman ihmisen pakollista läsnäoloa. Kyseisellä kierrolla saadaan piiriä testattua kolme kertaa minuutissa, joka tarkoittaa kahdeksan tunnin työpäivän aikana 1440 kertaa.

Piiriä testattiin ajamalla 5158 kertaa esilatauskierto sen lävitse, ja tuloksena oli vieläkin ehjä ja toimiva piiri. Myöskään tehovastuksen resistanssi ei ollut muuttunut läpi ajettujen kertojen jälkeen. Tämän perusteella voi suorittaa laskennan, että jos moottoripyörän käyttäjä käynnistää pyörän keskimäärin kerran päivässä jokaisena päivänä vuodessa,

esilatauspiiri kestäisi ainakin $5158 * 365 = 14,13$ vuotta. Testaus ei sellaisenaan anna täyttä varmuutta mainitusta piirin kestoikästä, mutta antaa hyvää suuntaa.

4.8 IP-luokitus

Virallista IP-luokitusta piirille ei ole, koska sille ei ole suoritettu standardin mukaisia testejä. Piirin voisi kuitenkin ajatella olevan IP-67 tasoa, koska piiri on valuhartsin sisällä. Tällöin IP-luokituksen ensimmäinen numero on 6, koska piiri on täysin pölynkestävä ja luokituksen toinen numero on 7, koska hartsipeite suojaa piiriä vähintään lyhytaikaisesti veteen upotettuna. Tällöin pöly ja vesi eivät pääse hapettamaan piirin komponentteja tai rikkomaan piiriä muilla tavoin. Esilatauspiirin sijoituessa akun sisälle, tarkoittaa se täysin tiivistettyä ympäristöä, jolloin itse esilatauspiirikin on jo valmiiksi täysin vedeltä suojatussa tilassa.

4.9 Valmis piiri

Lopuksi valmista piiriä (kuva 7) testattiin itse järjestelmässä. Akunhallintajärjestelmälle luotiin logiikka, jolloin avainta näytettäessä eli pyörän käynnistämällä akunhallintajärjestelmä ohjaa esilatauspiirin releen kiinni ja esilataus alkaa. Kontaktorit ohjataan kiinni, kun moottorinohjaimen jännitetaso on sama, kuin akun jännitetaso. Tämän seurauksena virta pääsee kulkemaan kontaktoreiden kautta moottorinohjaimelle, ja samalla esilatausrele ohjataan takaisin auki.



Kuva 7. Valmis esilatauspiiri kotelossaan valettuna.

5 TULOKSET

Esilatauspiirin suunnittelulla saatiin aikaan valmis ja varsin hyvin toimiva esilatauspiiri sähkömoottoripyörään. Piirin kustannukset laskivat noin 75 % valmiiksi ostetuista esilatauspiireistä, ja riippumattomuus muista valmistajista parani huomattavasti, koska valmiiden esilatauspiirien valmistajia on huomattavasti vähemmän kuin piirissä käytettyjen komponenttien valmistajia. Piirin fyysinen koko pienentyi huomattavasti aiemmin käytössä olleesta esilatauspiiristä. Tuloksena on piirikaavio sekä suojakotelo, josta CAD-malli ja piirustukset ovat myös tässä tutkimuksessa. Esilatauspiiristä tuli tärinän-, pölyn- ja vedenkestävä valuhartsin valamisen jälkeen. Polyuretaanivaluhartsia valikoitiin tarkasti olemaan elektroniikalle tarkoitettua, mikä takaa komponenttien sekä niiden liitosten kestävyys- ja vesitiiveyden.

Testattava esilatauspiiri kuormitettiin 5158 kertaa lataamalla akkujännite sen läpi moottorinohjaimelle, jonka jälkeen testaus lopetettiin. Piiri jäi testaamisen jäljiltä ehjäksi, eikä tehovastuksen resistanssikaan ollut muuttunut testien aikana. Tämän perusteella voidaan suorittaa laskennan, että jos moottoripyörän käyttäjä käynnistää pyörän keskimäärin kerran päivässä jokaisena päivänä vuodessa, esilatauspiiri kestäisi ainakin $5158 * 365 = 14,13$ vuotta.

Lopuksi valmista piiriä testattiin itse järjestelmässä. BMS:lle luotiin logiikka, jolloin avainta näytettäessä eli pyörän käynnistämällä akunhallintajärjestelmä ohjaa esilatauspiirin releen kiinni, jolloin esilataus alkaa. Esilatauspiiri toimi järjestelmässä juuri niin kuin sen pitikin nostaen moottorinohjaimelle menevän jännitteen samalle tasolle kuin akkujännitteen n. 1,5 sekunnissa, jolloin pääkontaktorit ohjattiin kiinni ja esilatauspiirin rele avattiin.

6 POHDINTA JA YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella toimiva, taloudellinen ja pieni esilatauspiiri sähkömoottoripyörään. Työ aloitettiin tutustumalla teoriaan sekä piirissä käytettäviin komponentteihin. Teorian ja laskennan perustella piiriin valittiin sopivat komponentit, jotka asennettiin suojakoteloon. Tämän jälkeen piirin toimivuus sekä kestävyys testattiin usealla eri menetelmällä. Opinnäytetyön tekijällä oli hieman aiempaa kokemusta kyseisen sähkömoottoripyörän sähköjärjestelmästä, ja se helpotti piirin suunnittelua sekä toteutusta. Työssä haastavaa oli aiheen rajaaminen. Kyseiseen aiheeseen liittyen esimerkiksi akunhallintajärjestelmällä esilatauspiirin releen ohjausta olisi voinut käsitellä toisen opinnäytetyön verran, joten päätimme ottaa siitä vain pintaraapaisun mukaan tähän opinnäytetyöhön.

Opinnäytetyössä päästiin asetettuihin tavoitteisiin. Testattava esilatauspiiri kuormitettiin 5158 kertaa lataamalla akkujännite sen läpi moottorinohjaimelle, jonka jälkeen testaaminen lopetettiin. Piirin testausosio oli piirille huomattavasti rajumpi, mitä piirin käyttö on sen ollessa kiinnitettynä moottoripyörässä, koska piirin lävitse ajettava esilatauskierto on huomattavasti nopeampi kuin paikallaan moottoripyörässä ollessaan ja tällöin piirin komponentit lämpenevät enemmän. Komponentit asennettiin testin ajaksi jäädytys­siilille, jolloin komponenttien tuottama lämpö johtui siilille, jolloin komponentit eivät ylikuumeneet. Myös moottoripyörän esilatauksessa moottorinohjaimen kondensaattoreihin jää jännite, joka laskee hyvin hitaasti, kun taas testauksessa kyseinen jännite purettiin purkuvastukseen, jolloin jännite ladattiin jännitteettömästä tilasta täyteen. Piiri kuitenkin kesti jopa tämän testin hienosti. Piirin kustannukset tippuivat huomattavasti ja myös piirin fyysinen koko pieneni.

Suunniteltua esilatauspiiriä on mahdollista jatkokehittää tulevaisuudessa pienellä vaivalla, koska kaikki tutkimuksessa käytetty ja oivallettu materiaali on tallessa. Piirin taloudellisuutta on mahdollista parantaa ostettaessa isompi määrä komponentteja kerralla, jolloin kappalehinnat ovat pienempiä. Piirissä käytössä olevat komponentit ovat fyysiseltä kooltaan tällä hetkellä jo pienimpiä, joita taloudelliseen hintaan oli mahdollisuus saada, mutta tulevaisuudessa komponenttien koot luultavasti pienenevät. Tällöin on mahdollista saada piirin kokoa vieläkin pienemmäksi. Excel-taulukkolaskentaohjelmaan luodun muuttuvan taulukon perusteella on helppo määrittää komponenttien arvoja, jos esimerkiksi esilatausaikaa haluttaisiin tulevaisuudessa muuttaa tai akuston jännite muuttuisi.

LÄHTEET

- Ahonen, J., Haiko, T., & Salonen, K. (2016). *Elektroniikka*. Sanoma Pro.
- Ahoranta, J. (2012). *Sähkötekniikka*. (11.painos). Sanoma Pro.
- Battle Born Batteries. (14.4.2021). *Battery Management System*. <https://battlebornbatteries.com/battery-management-system/>
- Calculator Academy. (1.11.2021). Capacitor Charge Time Calculator. <https://calculator.academy/capacitor-charge-time-calculator/>
- DS New Energy. (21.2.2019). BMS. <https://fi.dsnsolar.com/info/bms-battery-management-system-32667898.html>
- Electrolube. (4.9.2019). *Effective Resin Chemistries for the Protection of Electronic Components*. https://electrolube.com/knowledge_base/effective-resin-chemistries-for-the-protection-of-electronic-components/
- Engineer educators. (i.a.). The RC Time Constant. <https://engineer-educators.com/topic/the-rc-time-constant/>
- Haiko, T. (2009). *Analoginen elektroniikka*. WSOYpro.
- Hienonen, R., & Lahtinen, R. (2007). *Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa*. VTT.
- Hämeri, K., Jokinen, R., Ketolainen, P., Sallinen, M., & Sloan, M. (2011). *Empiria 6*. Otava.
- Manufacturing Tomorrow. (5.10.2021). *How to Protect Electric Components from Water and Corrosion*. <https://www.manufacturingtomorrow.com/news/2021/05/10/how-to-protect-electronic-components-from-water-and-corrosion/16973/>
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., & Öistämö, J. (2010). *Tekniikan kaavasto*. (8.painos). Tammertekniikka.
- Sensata. (12.11.2020). *Sensata Precharge Circuit for Hybrid and Electric Vehicles*. <https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-how-to-design-precharge-circuits-evs-whitepaper.pdf>
- Silvonen, K. (2018). *Elektroniikka ja sähkötekniikka*. Otatieto.
- Stek. (i.a.). *Ip-luokitus*. <https://stek.fi/perustietoa-sahkosta/sahkojarjestelmat/ip-luokitus/>
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2013). *EMC-standardieja*. (2.painos). SFS.

Synopsys. (i.a.). *What is a Battery Management System?* <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>

Walden, D., Roedler, G., Forsberg, K., Hamelin, R., & Shortell, T. (2015). *Systems Engineering Handbook - A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. (4.painos). John Wiley & Sons.

Zauner, C. (13.7.2021). *Electromagnetic Interference*. KEB America. <https://www.kebamerica.com/blog/electromagnetic-interference-vfds/>

LIITTEET

Liite 1. Vastuksen oikosulkukestävyyden sekä valuhartsin paloturvallisuuden testaamista

Liite 2. Valuhartsin paloturvallisuus

Liite 3. Vastuslangan katkeaminen vikatilanteessa

**Liite 1. Vastuksen oikosulkukestävyden sekä valuhartsin paloturvallisuuden testaa-
mista**



Liite 2. Valuhartsin paloturvallisuus



Liite 3. Vastuslangan katkeaminen vikatilanteessa

