



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LARI KARVINEN
RADIO-OHJATTAVA PANSSARIVAUNU ARDUINO-ALUSTALLA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Erja
Sipilä

TIIVISTELMÄ

Lari Karvinen: Radio-ohjattava panssarivaunu Arduino-alustalla
Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 26 sivua
Kesäkuu 2018
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Elektroniikka
Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Erja Sipilä

Avainsanat: Elektroniikka, Arduino, Mikrokontrollerijärjestelmä, I²C, Panssarivaunu

Työn tavoite oli suunnitella ja rakentaa radio-ohjattava tela-alusta, joka voidaan jatkokehittää täysin toimivaksi radio-ohjatuksi panssarivaunuksi. Tavoite oli tarkoitus saavuttaa yhdistelemällä valmiina saatavilla olevia yksinkertaisia ja pienikustannuksisia moduuleja monimutkaisemmaksi kokonaisuudeksi. Näin ollen järjestelmän suunnittelussa painotettiin laajennettavuutta ja modulaarisuutta. Järjestelmä käyttää prosessointiresurssina Arduino Nano-mikrokontrollerialustaa. Järjestelmän tärkein toiminnallisuus oli työn yhteydessä tela-alustan moottorien ohjaaminen radioyhteydellä.

Varsinainen moottorienohjaus toteutettiin kahdella itserakennetulla H-silta-kytkennällä ja niitä ohjaavalla Arduino Nanolla, jotka yhdessä muodostavat moottorinohjauslohkon. Vaunun laajennettavuus taataan ottamalla vaunun järjestelmille käyttöön master-slave -arkkitehtuuri, jossa yksi master Arduino ottaa radioteitse vastaan komentoja kauko-ohjaimelta, ja säätää slave alijärjestelmien tilaa niiden mukaisesti. Alijärjestelmien ja master Arduinon välinen kommunikatio toteutettiin I²C-väylällä. Ainut työssä toteutettu älykäs alijärjestelmä on moottorinohjaus. Työssä toteutettiin myös tarvittavat tukijärjestelmät; Teholähde moottoreille ja elektroniikalle sekä yksinkertainen runko, jonka avulla järjestelmän toimivuutta voitiin tutkia.

Toiminnallisesti järjestelmä täyttää kokonaisuudessaan edellisessä luvussa määritellyt vaatimukset. Vaunun moottoreita voidaan ohjata säädettävällä teholla molempiin suuntiin ja radioyhteys on luotettava.

Vaunun suunnittelu- ja rakennusprosessit sujuivat suoraviivaisesti ja ilman suurempia ongelmia. Kokonaisuudessaan työtä voidaan pitää hyvin onnistuneena. Seuraava askel panssarivaunuprojektissa on järjestelmän laajentaminen vaunun tornilla ja asejärjestelmällä.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on kirjoittajan pitkäaikaisen haaveen ja Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnan opiskelijoiden omia projekteja tukevan linjan tulos. Haave radio-ohjattavan panssarivaunun rakentamisesta syntyi, kun eräänä päivänä tajusin, että sähkötekniikan opintojen ja itsenäisen elektroniikkaharrastuksen pohjalta kartutetun osaamisen avulla projekti olisi täysin toteutettavissa. Kun kandidaatintyöseminaarissa tulivat ilmi mahdollisuudet omaan aiheeseen ja tiedekunnan osittain rahoittamaan rakenteluosuuteen, oli päätös haaveeni toteuttamisena kandidaatintyöni muodossa selviö.

Tahtoisin kiittää kandidaatintyöni ohjaajaa Erja Sipilää avusta ja ohjauksesta työn valmiiksi saattamiseksi ja luottamuksesta kykyyni toteuttaa tämä projekti, sekä koko Tampereen teknillisen yliopiston opetushenkilökuntaa, jotka ovat olleet mukana projektiin vaadittua osaamista rakentamassa. Tunnustusta ansaitsee myös kansainvälinen elektroniikan harrastelijoiden yhteisö, joka on liian laaja yksittäisten tahojen nimeämiseksi, mutta, jota ilman projekti ei olisi ollut mahdollinen.

Tampereella 14.4.2018

Lari Karvinen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 2. | JÄRJESTELMÄN ARKKITEHTUURI | 2 |
| 2.1 | Järjestelmän yleiskuvaus ja jako alijärjestelmiin | 2 |
| 2.2 | Mikroprosessorit – Arduino | 3 |
| 2.3 | Ohjain | 4 |
| 2.4 | Radiolinkki – HC-12-moduuli | 5 |
| 2.5 | Kommunikaatio – I2C | 5 |
| 2.6 | Moottorikäyttö..... | 6 |
| 2.7 | Muu – Akusto, runko, moottorit ja lohkokaavio | 7 |
| 3. | RAKENNUSPROSESSI..... | 9 |
| 3.1 | Käytetyt menetelmät, suunnittelu ja komponenttien hankinta | 9 |
| 3.2 | Radiolinkki ja moottorinohjausprototyyppi | 10 |
| 3.3 | Ohjainprototyyppi | 12 |
| 3.4 | Akusto | 14 |
| 3.5 | Moottorinohjaus | 16 |
| 3.6 | Vaunun käyttöjännitteet | 17 |
| 3.7 | Ohjaimen viimeistely | 19 |
| 3.8 | Alijärjestelmien yhdistäminen kokonaisuudeksi..... | 20 |
| 4. | YHTEENVETO | 22 |
| | LÄHTEET | 25 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|--------|---|
| A/D | Analog-to-digital, analogisesta digitaaliseksi |
| BMS | Battery management system, akunvalvontajärjestelmä |
| GPIO | General-purpose input/output, yleiskäyttöinen sisään-/ulosmeno |
| I2C | Inter-Integrated Circuit, integroitujen piirien välinen (kommunikatio) |
| IDE | Integrated development environment, ohjelmointiympäristö |
| LED | Light emitting diode, valoa emittoiva diodi |
| MISO | Master In Slave Out, master vastaanottaa, slave lähettää |
| MOSFET | Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, Metallioksidikanavatransistori |
| MOSI | Master Out Slave In, master lähettää, slave vastaanottaa |
| PWM | Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio |
| SCL | Serial Clock Line, sarjamuotoisen liikenteen kellolinja |
| SCLK | Serial Clock, sarjakello |
| SDA | Serial Data Line, sarjamuotoinen datalinja |
| SS | Slave Select, slaven valinta |
| SPI | Serial Peripheral Interface, sarjamuotoinen oheislaiteliitäntä |
| UART | Universal asynchronous receiver-transmitter, universaali asynkroninen lähetinvastaanotin. |
| USB | Universal Serial Bus, universaali sarjaväylä |

1. JOHDANTO

Jokainen elektroniikkalaitte on jaettavissa lohkoihin ja alijärjestelmiin, jotka yhdessä mahdollistavat laitteen toiminnan. Tietyt yleiset lohkot ja alijärjestelmät toistuvat lähes jokaisessa elektroniikkalaitteessa, laite tarvitsee tehonsyötön ja usein myös kyvykkyyden suorittaa laskutoimenpiteitä, prosessoida dataa. Näiden toimintojen päälle rakentuu suurin osa nykyajan elektroniikkalaitteista. Televisiota suunniteltaessa lisätään näyttöpaneeli ja moduuli ohjaamaan paneelia. Kaukosäädin saadaan aikaan lisäämällä järjestelmään fyysisiä kytkimiä, joiden tilaa prosessori voi mitata, sekä jokin television kanssa kommunikation mahdollistava moduuli. Pesukone tarvitsee prosessorin alaisuuteen moduulit, joilla ohjata pumppuja ja rummun moottoria. Samoja moottorinohjausmoduuleja voidaan hyödyntää teoriassa missä tahansa pesukoneessa, television paneelia ohjaavaa moduulia voidaan uudelleen käyttää eri erikokoisissa ja tasoisissa televisioissa. Näin ollen on luonnollista, että sen sijaan, että sama toiminnallisuus suunniteltaisiin aina uutta laitetta suunniteltaessa alusta asti uudestaan, on saatavilla valmiita moduuleja, joita yhdistelemällä voidaan saavuttaa paljon toiminnallisia ominaisuuksia hyvin vähäisellä matalan tason laitesuunnittelulla.

Valmismoduulien pienet kustannukset ja kansainvälisen verkkokaupan kasvu ovat tuoneet valmismoduulit kaikkien saataville. Tämän kandidaatintyön sisältö on suunnitella ja toteuttaa radio-ohjattava panssarivaunun tela-alusta hyödyntämällä näitä saatavilla olevia valmismoduuleja. Työ on aloitus laajemmalle projektille, joka tähtää kokonaisen radio-ohjattavan panssarivaunun toteutukseen niin ikään valmismoduuleihin pohjaten. Valmis panssarivaunu sisältää mobiilin tela-alustan, jonka päälle on rakennettu ohjattava torni sekä heikkotehoinen asejärjestelmä, joka kykenee välittämään maalitelemetriaa takaisin käyttäjälle. Jotta kandidaatintyön laajuus ei ylittyisi, rajataan tämä työ käsittelemään vain itse tela-alustaa sekä sen radio-ohjausta. Näin ollen torni, aseistus ja muut edistyneemmät järjestelmät rajataan työn ulkopuolelle. Työssä painottuu kuitenkin projektin laajennettavuus tulevaisuudessa. Tela-alusta käsittää vaunun alarungon, moottorit käyttöineen, akuston regulointeineen sekä vaunun eri järjestelmien vaatiman arkkitehtuurin pohjan luomisen laajennettavuus huomioon ottaen. Pääasiallisena prosessointialustana työssä tullaan käyttämään Arduino-mikrokontrollerialustaa.

Työn kirjallinen osuus jakautuu kahteen osioon. Ensin käsitellään vaunun toteutusta ja vaatimuksia teoreettisista näkökulmista, esitellään mahdollisia toteutustapoja eri järjestelmille ja käydään läpi valittujen ratkaisujen toiminta. Toisessa osuudessa käsitellään laitteen rakennusprosessia työtapojen ja etenemisen muodossa ja lopuksi tutustutaan työn tuloksiin analysoiden samalla niiden onnistuneisuutta.

2. JÄRJESTELMÄN ARKKITEHTUURI

Työn tavoite on suunnitella ja rakentaa radio-ohjattava tela-alusta, joka voidaan jatkokehittää täysin toimivaksi radio-ohjatuksi panssarivaunuksi. Tavoite on tarkoitus saavuttaa yhdistelemällä valmiina saatavilla olevia yksinkertaisia ja pienikustannuksisia moduuleja monimutkaisemmaksi kokonaisuudeksi. Suunnittelun ja toteutuksen helpottamiseksi on järkevää jakaa järjestelmä useisiin pienempiin alijärjestelmiin, jotka ovat jokainen vastuussa vain pienestä osasta kokonaisuuden toimintaa. Toinen syy alijärjestelmiin jakamiseen on näin saavutettava helppo laajennettavuus. Tässä osiossa asetetaan ensin tarkemmat toiminnalliset vaatimukset toteutettavalle järjestelmälle, minkä jälkeen käydään läpi järjestelmien tärkeimpien osien toteutus.

2.1 Järjestelmän yleiskuvaus ja jako alijärjestelmiin

Tela-alustan välttämättömät toiminnot ovat ohjaukomentojen vastaanottaminen ja moottorien käyttö komentojen mukaisesti. Yksinkertaisimmillaan molemmat toiminnot voitaisiin toteuttaa yhdellä mikrokontrollerilla, mutta tämä rajoittaisi järjestelmän laajennettavuutta. Jotta järjestelmää on mahdollista laajentaa myöhemmin lisäämällä muun muassa panssarivaunun torni, asejärjestelmät, videokuvan lähettäminen ohjaajalle, on syytä suunnitella järjestelmä alusta lähtien laajennettavaksi. Tässä työssä laajennettavuus taataan käyttämällä useita keskenään kommunikoivia mikrokontrollereita. Tela-alustan mikrokontrollereille muodostetaan niin sanottu master – slave -hierarkia, jossa yksi mikrokontrolleri, tästä eteenpäin master, ohjaa muiden slave-mikrokontrollerien, alijärjestelmien, toimintaa. Jotta usean mikrokontrollerin arkkitehtuuria voidaan hyödyntää tehokkaasti, on järkevää pyrkiä minimoimaan master-mikrokontrollerin työmäärä. Näin ollen tässä työssä master-kontrollerilla suoritettavia toimintoja ovat vain radiokommunikaatio ohjaimen kanssa sekä ohjaukomentojen välittäminen alijärjestelmille. Radiolinkin on kyettävä luotettavasti ja riittävällä nopeudella välittämään tela-alustan ohjaukseen vaadittava informaatio ohjaimelta masterille, jonka on edelleen kyettävä välittämään informaatio moottorinohjausjärjestelmälle.

Toinen välttämättömistä toiminnoista on moottorienohjaus, joka on ainut tässä työssä toteutettava alijärjestelmä, jonka toteutuksessa käytetään mikrokontrolleria. Moottorienohjauksen on kyettävä ohjaamaan kahta harjallista DC-moottoria säädettävällä teholla molempiin pyörimissuuntiin.

Älykkäiden järjestelmien lisäksi tarvitaan runko, voimansiirto, moottorit sekä tehonlähde moottoreille ja tela-alustan elektroniikalle. Teholähteen on kyettävä syöttämään riittävä määrä tehoa moottoreille, mutta oltava myös riittävän kompakti ja kevyt, jotta tela-alustaa voidaan liikuttaa moottoreilla.

2.2 Mikroprosessorit – Arduino

Työssä on tarve usealle mikroprosessorille. Osana työn määrittelyä on toteutus Arduino-mikroprosessorialustalla, näin ollen tässä kappaleessa keskitytäänkin Arduinon esittelyyn eikä esitetä sille vaihtoehtoja. Wheat esittelee Arduinoa kirjassaan *Arduino Internals*. Arduino on avoin Atmelin AVR-tuoteperheelle pohjautuva mikrokontrollerialusta. Arduino-projekti on lähtöisin Italiasta ja se julkaistiin vuonna 2005. Itse Arduino nimi viittaa sekä mikrokontrollerialustaan, että sille kehitettyyn C-kieleen pohjautuvaan ohjelmointiympäristöön. Arduino on julkaisunsa jälkeen jatkanut kehittymistään ja vuoteen 2017 mennessä markkinoilla on useita kymmeniä eri laitemalleja. Projektin ympärille on kasvanut huomattavan suuri yhteisö, joka osallistuu aktiivisesti projektin kehittämiseen. [1][2]

Työn toteuttamiseen valittiin laitemalli Arduino Nano. Valintaan vaikuttivat mallin pieni koko, pieni hinta ja niihin nähden hyvä suorituskyky. Taulukkoon 1 on kerätty Arduino Nanon oleelliset tekniset tiedot.

Taulukko 1. *Arduino Nanon tekniset tiedot [2].*

| Ominaisuus | Arvo |
|-------------------|-----------|
| Mikrokontrolleri | ATmega328 |
| Käyttöjännite | 5 V |
| Flash-muisti | 32 kB |
| Kellotaajuus | 16 MHz |
| Analoginen GPIO | 8 kpl |
| Digitaalinen GPIO | 22 kpl |
| PWM-kanavia | 6 kpl |
| Virrankulutus | 19 mA |

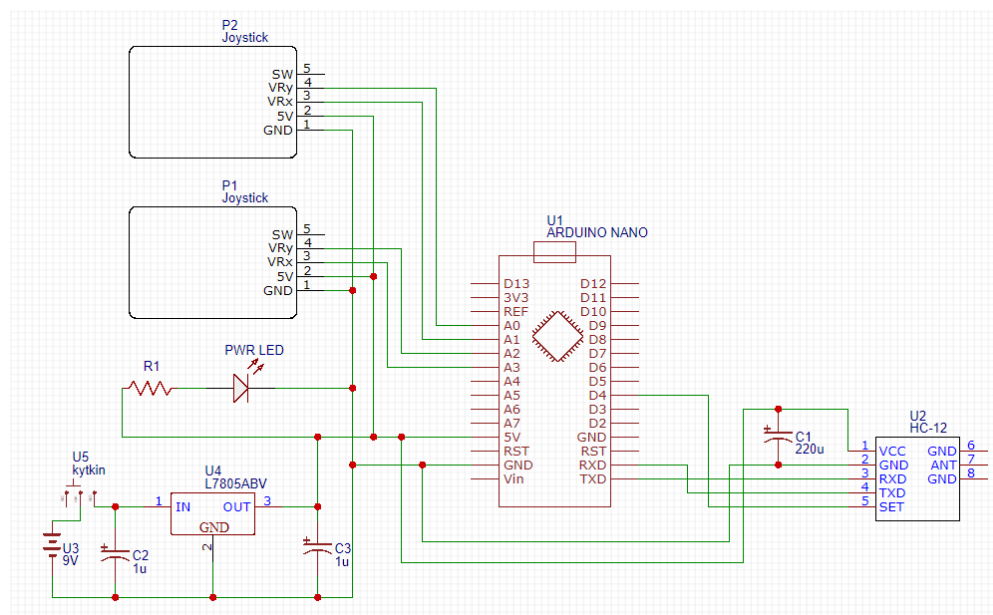
Arduino-alusta on hyvin helppokäyttöinen. Tämä perustuu osittain laajaan Arduinolle kirjoitettujen kirjastojen valikoimaan. Monet mikrokontrollerien tyypilliset toiminnallisuudet kuten 5 V:n RS232-, SPI (Serial Peripheral Interface, sarjamuotoinen oheislaite-liitäntä) - ja I2C (Inter-Integrated Circuit, integroitujen piirien välinen) -kommunikaatio sekä ajastimien käyttö, Pulssinleveysmodulaatio (PWM, pulse width modulation) ja servomoottorien ohjaus, on implementoitu Arduinon valmiiksi. Arduino Nanon ohjelmointi Arduino IDE:llä (Integrated development environment, integroitu kehitysympäristö) voidaan suorittaa joko alustaan integroidulla USB (Universal Serial Bus, universaali sarjaväylä) - tai UART (universal asynchronous receiver-transmitter, universaali asynkroninen lähetinvastaanotin) -yhteydellä. [2][3] Tästä eteenpäin sanalla Arduino viitataan Arduino Nano -laitteeseen.

2.3 Ohjain

Ohjaimen tehtävä on tarjota käyttäjälle kontrollirajapinta järjestelmän ohjausta varten. Ohjain koostuu kahdesta analogisesta sauvasta ja kytkimestä, niiden tilaa tarkkailevasta Arduinosta, radiomoduulista ja tehollähteestä. Tela-alustaa ohjataan pääasiallisesti ohjaimen kahdella keskiasemaansa palaavalla sauvalla, yksi sauva ohjaa kumpaakin telaa. Sauvoissa on sisäänrakennetut potentiometrit, jotka säätävät sauvojen asennon mukaan. Kun potentiometrin yli kytketään Arduinon käyttöjännite, toimii potentiometri jännitteenjakaajana, jonka keskimmäisen jalan jännite riippuu sauvan asennosta. Kytkemällä tämä jännite Arduinon analogiseen sisäänmenoon, voidaan se mitata mikroprosessorin sisäisellä A/D (Analogisesta digitaaliseksi, analog-to-digital) -muuntimella ja muuttaa näin digitaaliseksi informaatioksi, jota voidaan käyttää moottorien ohjaukseen. Arduinon digitaalisia sisäänmenoja voidaan vastaavasti käyttää päällä/pois-signaalien lukuun yksinkertaisilta kytkimiltä.

Jotta master-Arduinon suorittama työmäärä pysyisi mahdollisimman pienenä, suoritetaan mitatun ohjausdatan prosessointi ohjauskomennoiksi ohjaimen Arduinolla. Päällä/pois-kytkimet ohjaimessa mahdollistavat kontrollirajapinnan laajentamisen tulevaisuudessa kattamaan tornin ja asejärjestelmän ohjauksen. Kun ohjausdata on prosessoitu, ohjaimen Arduino lähettää ohjauskomennot radiomoduulilla master-Arduinolle. Tämän jälkeen mittauskierros aloitetaan uudestaan.

Ohjaimen tehonlähteenä käytetään yhtä 9 V:n paristoa, jonka jännite lasketaan 5 V:n ON Semiconductorin NCP7805TG-lineaariregulaattorilla. Ohjaimen tarkka rakenne selviää Kuvasta 1.



Kuva 1. Ohjaimen piirikaavio.

2.4 Radiolinkki – HC-12-moduuli

Radiotaajuinen kommunikaatio on olennainen osa työn toiminnallisuutta. Mahdollisia vaihtoehtoja ohjaimen ja tela-alustan välisen radiolinkin taajuusalueelle ja protokollalle on lukuisia [4]. Tärkeimpiä valintakriteereitä olivat kantama, luotettavuus ja ennen kaikkea valmiin moduulin saatavuus markkinoilta. Eräs näissä kategorioissa hyvin menestyvä taajuusalue on 433 MHz -kaista [5]. Saatavilla olevista moduuleista valittiin HC-12 nimellä kulkeva radiomodula. Moduulin alkuperäisen valmistajan selvittäminen ja siten datalehden löytäminen osoittautuivat haastavaksi, mutta moduulista on tarjolla runsaasti kolmansien osapuolien koostamaa tietoa. Taulukkoon 2 on kerätty HC-12-moduulin oleelliset tekniset tiedot.

Taulukko 2. HC-12 tekniset tiedot [6].

| Ominaisuus | Arvo |
|--------------------|---------------------|
| Käyttöjännite | 3,2V-5,5V |
| Taajuusalue | 433,4 – 473,0 MHz |
| Kanavien määrä | 100 kpl |
| Suurin lähetysteho | 100 mW |
| Rajapinta | Sarja-protokolla |
| Radiokaistanleveys | 5 000 – 236 000 bps |
| Sarjakaistanleveys | 1 200 – 115 200 bps |

HC-12-moduulia voidaan ohjata mikrokontrollerilla suoraan sarjaprotokollalla. Moduulilla on kaksi erillistä toimintatilaa, asetustila, jossa moduulin parametrejä ja toimintaa voidaan säätää AT-komennoilla, ja silta-tilaan, jossa moduuli suoraan lähettää kaiken vastaanottamansa sarjaliikenteen vastinmoduulilleen, joka lähettää vastaanotetun liikenteen ulos sarjaportistaan. Näin ollen kaksi samalla kanavalla toimivaa HC-12 moduulia muodostavat langattoman sarjaliikenneyhteyden moduuleihin yhdistettyjen mikrokontrollerien välille.

2.5 Kommunikaatio – I2C

Työssä vaunun toiminnallisuus on jaettu useisiin eri alijärjestelmiin. Näiden järjestelmien on kyettävä kommunikoimaan keskenään, jotta kokonaisuus toimii. Kommunikaation toteutukseen on teoriassa loputtomasti tapoja, joten on syytä kehittää valintaperusteet valitavalle kommunikaatioteknologialle. Yksi työn suunnittelufilosofioista on laajennettavuus. Näin ollen alijärjestelmien välisen kommunikaatioväylän täytyy olla skaalautuva. Kommunikaatioväylä on myös oleellinen osa master – slave -hierarkian toteutuksessa. Toinen työn keskeinen suunnittelufilosofia on valmiiden ratkaisujen ja moduulien käyttö, joten on luonnollista valita protokolla, joka on jo valmiiksi mahdollisimman pitkälle to-

teutettu osana Arduino-alustaa. Harkintaan päätyi kaksi nämä kriteerit täyttävää protokollaa: Serial Peripheral Interface (SPI, sarjamuotoinen oheislaiteliitäntä) ja Inter-Integrated Circuit (I2C, integroitujen piirien välinen). [7][8][9]

SPI on neljää johdinta, Serial Clock (SCLK, sarjakello), Master Out Slave In (MOSI, Master lähettää, slave vastaanottaa), Master In Slave Out (MISO, master vastaanottaa, slave lähettää) ja Slave Select (SS, slaven valinta), käytävä full-duplex -väylä. SPI-väylällä Master on yhteydessä hetkellisesti korkeintaan yhteen slave-laitteeseen, joka valitaan aktiivomalla kyseinen laite siihen liittyvällä Slave Select -johtimella. Master tahdistaa kaksisuuntaisen kommunikaation (MISO ja MOSI) tuottamallaan Serial Clock -signaalilla. [7][8][9]

I2C on kahta johdinta, Serial Data Line (SDA, sarjamuotoinen datalinja) ja Serial Clock Line (SCL, sarjamuotoisen liikenteen kellolinja), käytävä half-duplex -väylä. Kommunikoidakseen I2C-väylällä laite ensin varaa väylän, jonka jälkeen se lähettää väylälle sen laitteen osoitteen, jolle kommunikaatio on osoitettu. Kun tavoiteltu laite kuittaa, voidaan kommunikaatio kumpaan tahansa suuntaan aloittaa. Kaikki kommunikaatio tapahtuu SDA-johtimen läpi ja sen tahdistaa kommunikaation aloittaja SCL-johtimen kautta. [7][9]

Työssä päädyttiin käyttämään I2C protokollaa. Protokollilla ei ole työn toteutuksen kannalta monia merkittäviä suorituskyvyllisiä eroavaisuuksia, yksi tärkeä ero on kuitenkin SPI:n tarve erillisille Slave Select -johtimille, jotka monimutkaistaisivat vaunun johdosta I2C:hen verrattuna.

I2C:n master – slave -arkkitehtuuri vastaa työssä käytettävässä toteutuksessa työn master – slave -arkkitehtuuria. Jokainen vaunun mikroprosessoria käyttävä alijärjestelmä tulaa liittämään samaan I2C-väylään. Master-Arduino toimii I2C-masterina ja välittää käskyt sekä kerää mahdollisen datan alijärjestelmiltä jokaisella ohjelman päivityssyklillä.

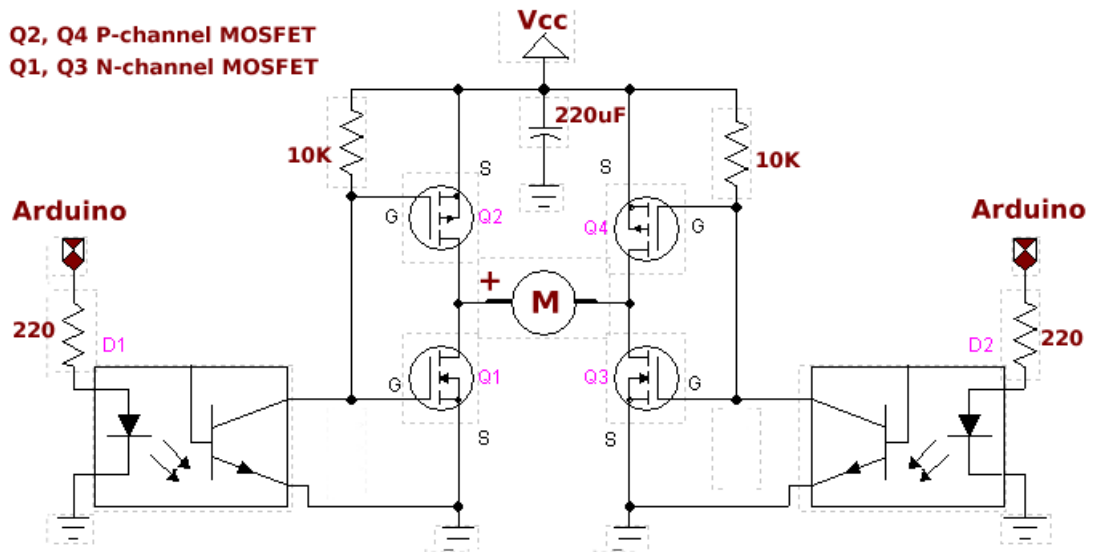
2.6 Moottorikäyttö

Työn tela-alusta sisältää kaksi harjallista tasavirtamoottoria, joita on kyettävä ohjaamaan. Vaatimuksena on moottorin pyörimissuunnan valinnan mahdollisuus sekä moottorille syötettävän tehon takaisinkytkemätön säätö. Moottorinohjaus määritellään työssä omaksi alijärjestelmäkseen.

Työssä tehonsäätö toteutetaan pulssinleveysmoduloinnalla moottorille syötettävää käyttöjännitettä. Moottori saa käyttöjännitteensä suoraan akustolta (nimellisjännite 12.6V). PWM-signaali voidaan tuottaa Arduinolla mutta Arduinon 5V logiikka ei voi suoraan hakkuroida akuston nimellisjännitettä, näin ollen moottoreille tarvitaan erillinen tehonsyöttöpiiri, jota ohjataan Arduinolla.

Eräs sopiva piiritopologia on niin kutsuttu H-silta, joka mahdollistaa PWM-tehonsäädön sekä pyörimissuunnan hallinnan. H-silta koostuu neljästä transistorista, joita ohjaamalla

moottoria kontrolloidaan. [10][11][12] Työssä H-siltaa ei suunniteltu alusta lähtien itse, vaan käytetty piiri jalostettiin valmiin mallin pohjalta. Kuvassa 2 esitetään käytetty kytkentä.



Kuva 2. Mallina käytetty H-silta -toteutus, kuvaa muokattu [13].

Työssä käytetyt MOSFETIT (Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor, Metallioksidi-kanavatransistori) ovat IRF4905LPBF (P-kanava) ja PSMN015-60PS (N-kanava). Kytkenässä kontrollisignaalit on erotettu moottorinohjauspiiristä optoerottimilla. Tämä palvelee kahta tarkoitusta; ensinnäkin transistorien kantaan voidaan johtaa 12 V ohjaussignaali Arduinolta lähetettävän 5 V signaalin sijaan ja toisekseen mahdollinen moottorien aiheuttama häiriö on paremmin eristetty kontrollielektroniikasta.

Työssä tarvitaan kaksi yllä kuvailtua piiriä, yksi kummallekin moottorille. Piirejä ohjataan yhteensä neljällä signaalilla, kahdella piiriä kohti. Toinen piiriin vietävistä signaaleista on joko 0 tai 5 voltia ja määrittää moottorin pyörimissuunnan. Jäljelle jäävä signaali on PWM-signaali, joka määrittää moottorille syötettävän tehon. Nämä signaalit tuotetaan erillisellä Arduinolla, joka vastaa moottorienohjauksesta. Moottorinohjaus-Arduino on liitetty master-Arduinon I2C-väylällä, jonka avulla master välittää kummankin moottorin halutun pyörimissuunnan ja tehoasetuksen. [13]

2.7 Muu – Akusto, runko, moottorit ja lohkokaavio

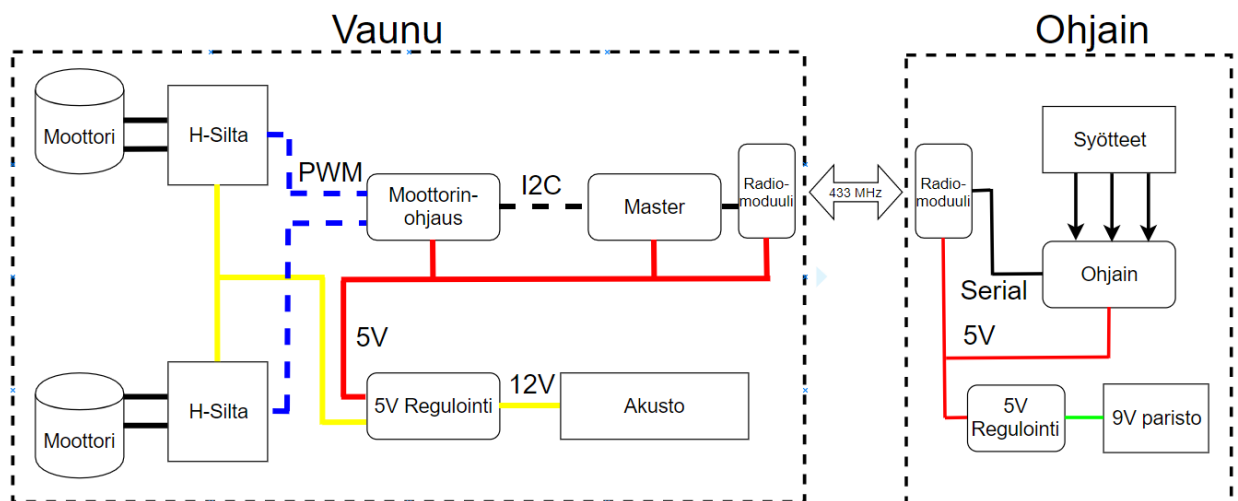
Työssä on luonteensa vuoksi useita osa-alueita, jotka työtä suunnitellessa päätettiin rajata työn pääasiallisen aihepiirin ulkopuolelle. Tällaisia lähes maininnan tasolle jätettäviä järjestelmänosia ovat vaunun akusto, runko, voimansiirto ja käyttöjännitteiden tuottaminen. Tässä kappaleessa käsitellään lyhyesti näiden järjestelmien toteutus

Vaunu tarvitsee toimiakseen 5 V:n käyttöjännitteen kontrollielektronikalle, sekä noin 12 V:n jännitteen moottoreille. Tämän saavuttamiseksi vaunussa on kuusi kappaletta 4,2 V:n litium-ioni -kennoja, jotka on kytketty kolme sarjaan ja kaksi rinnan. Näin ollen muodostuvan akuston nimellisarvo on 12,6 V. Kennojen kytkentä rinnan mahdollistaa suuremman enimmäisvirran. [14][15] Akusto on suojattu valmismoduulilla, joka sijoittuu galvaanisesti akuston ja muun vaunun väliin. Moduuli tarkkailee, ettei akuston yksittäisten kennojen jännite putoa alle 3.6 V sekä moduulin 12 V:n ulostulon päätyessä oikosulkuun katkaisee virran kulun. 5 V käyttöjännite tuotetaan LM2576T-5.0 -hakkuriregulaattorilla komponentin datalehden mukaisella kytkennällä [16].

Kandidaatintyön näkökulmasta runko ei ole oleellinen ja aloitetun panssarivaunu-projektin kannalta runko ei ole ajankohtainen. Näin ollen rungon toteutus pidettiin mahdollisimman yksinkertaisena. Lähinnä testialustaksi tarkoitettu runko koostuu kahdesta vanerilevystä sekä 3D-tulostetuista kiinnikkeistä. Telat koostuvat itse teloista, sekä molemmissa teloissa moottoriin kiinnitetystä vetopyörästä ja kahdesta telapyörästä. Telat hankittiin valmiina edellä mainitut osat sisältäneenä pakettina.

Vaunussa on kaksi kappaletta identtisiä harjallisia DC-moottoreita, yksi per tela. Vaunun käyttöjännitteiden ollessa tasajännitteitä oli tasavirtamoottori luonnollinen valinta. Moottoriksi valittiin harjallinen DC-moottori näiden yksinkertaisemman tehonsäädön ansiosta. Valitun moottorin malli on RS-755PH-3840F. Tässä vaiheessa projektia moottoreiden ja telojen välissä ei ole erillistä vaihteistoa, joten moottorivalinnassa painottui suuri vääntö ja pieni kuormaton pyörimisnopeus.

Tässä luvussa tehtyjen suunnittelupäätösten ja määrittelyjen pohjalta voidaan nyt muodostaa yleiskuva suunnitellusta järjestelmästä. Tämän pohjalta järjestelmästä voidaan laatia Kuvan 3 mukainen lohkokaavio. Lohkokaaviossa on katkoviivoin rajatuilla alueilla eroteltu toisistaan tela-alustan ja ohjaimen sisältämät lohkot.



Kuva 3. Suunnitellun järjestelmän lohkokaavio.

3. RAKENNUSPROSESSI

Tässä luvussa käydään läpi edellisessä luvussa suunnitellun ja määritellyn laitteen-rakennusprosessi. Prosessia tarkastellaan sitä dokumentoivien valokuvien avulla. Tarkastelun järjestys vastaa projektin osa-alueiden kronologista etenemisjärjestystä. Luvussa ei käsitellä yksityiskohtaisesti elektroniikan ohjaamiseen käytetyn ohjelmakoodin kehitys-prosessia.

3.1 Käytetyt menetelmät, suunnittelu ja komponenttien hankinta

Projektissa käytettiin elektroniikan perustyökaluja kuten yleismittaria, kolvia ja oskiloskooppia. Työtilana toimi pääosin työn kirjoittajan asunto.

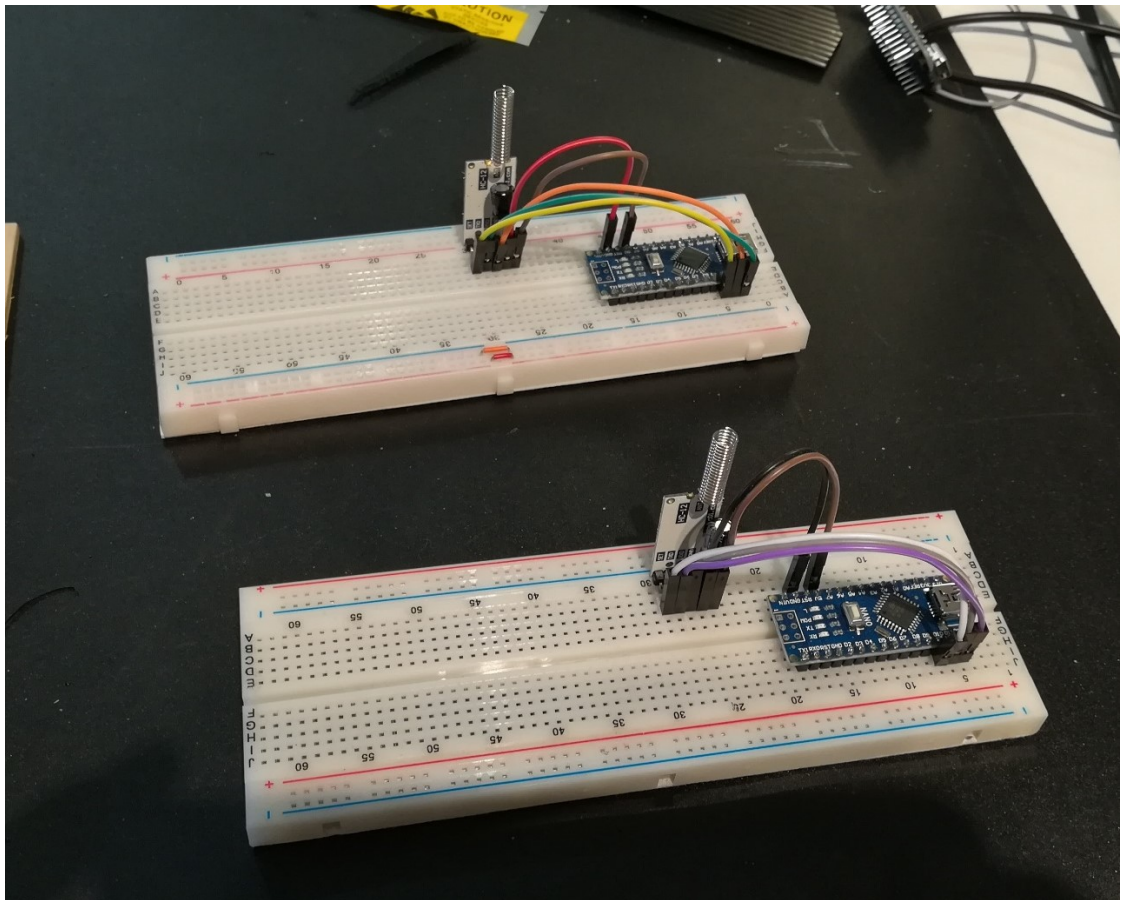
Kytkeäntöjen yksinkertaisuuden vuoksi kytkentöjen simulointia ei nähty tarpeelliseksi ja näin ollen työssä ei käytetty simulointiohjelmistoja. Ohjelmakehitys tapahtui Arduino IDE ohjelmakehitysympäristössä ja piirikaaviot piirrettiin selainpohjaisella EasyEDA-työkalulla.

Projektin toteuttamiseen tarvittava tietotaito on kertynyt sähkötekniikan yliopisto-opintojen sekä omatoimisen elektroniikkaharrastuksen myötä. Projektin liittyvän uuden tiedon haku toteutettiin pääasiassa sähköisesti. Käytettyjen tietolähteiden valikoima on laaja ja moninainen. Tietoa löydettiin niin tieteellisistä julkaisuista kuin datalehdistä ja teknisistä dokumenteistakin, unohtamatta verkossa erinäisten ohjeiden ja projektien muodossa jaettavaa alan tietoa.

Työn toteutus aloitettiin suunnittelemalla toteutettava kokonaisuus. Kokonaisuuden laatimisen jälkeen suunniteltiin yksittäisten alijärjestelmien toiminta. Kun suunnittelu-prosessi oli valmis, koottiin lista tarvittavista komponenteista. Osa työn komponenteista tilattiin yliopiston kautta, osa yksityishenkilönä ja osa oli jo valmiiksi hallussa.

3.2 Radiolinkki ja moottorinohjausprototyyppi

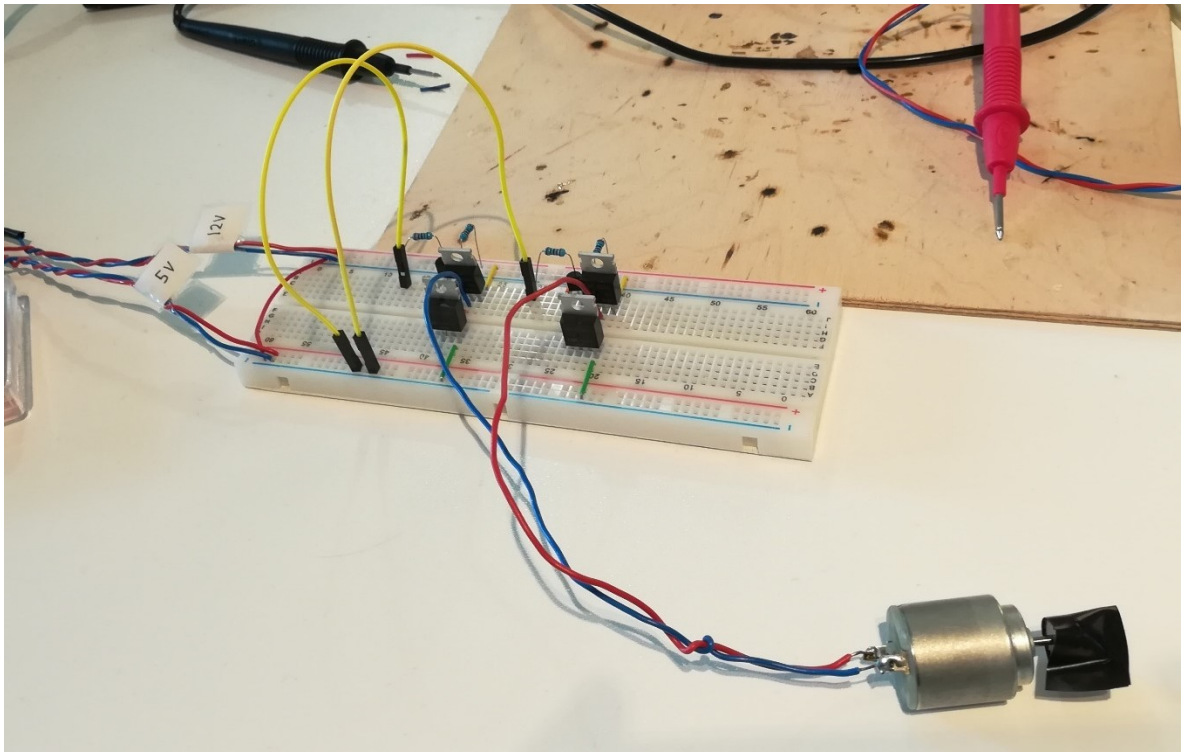
Rakennusprosessi aloitettiin tutustumalla käytettävien HC-12-radiomoduulien toimintaan ja käyttöön. Ensimmäinen tavoite oli muodostaa yksinkertainen sarjaprotokollayhteys kahden Arduinon välille radiomoduulien avulla. Tätä tarkoitusta varten koekytkentälevyille rakennettiin Kuvan 4 mukaiset kaksi identtistä Arduino-HC-12-kytkentää. Kytkenät yhdistettiin Arduinon USB-porttien avulla tietokoneeseen, jonka avulla mikrokontrollereihin otettiin yhteys Arduino IDE:n Sarjamonitori-työkalulla. Työkalun avulla voitiin lähettää sarjamuotoisia viestejä kahden Arduinon välillä radiomoduuleja käyttäen. Kokeilut osoittivat HC-12 moduulin toimivaksi toteutusalustaksi työn kauko-ohjausosuudelle.



Kuva 4. Kaksi HC-12-radiomoduulia kytkettyinä Arduinoihin.

Työssä moottorinohjauspiirit päätettiin rakentaa itse valmismoduulien käytön sijaan. Topologiaksi valittiin H-silta ja kytkennän suunnittelun pohjana käytettiin bristolwatch.com-sivustolla esiteltyä H-silta-toteutusta. [13]

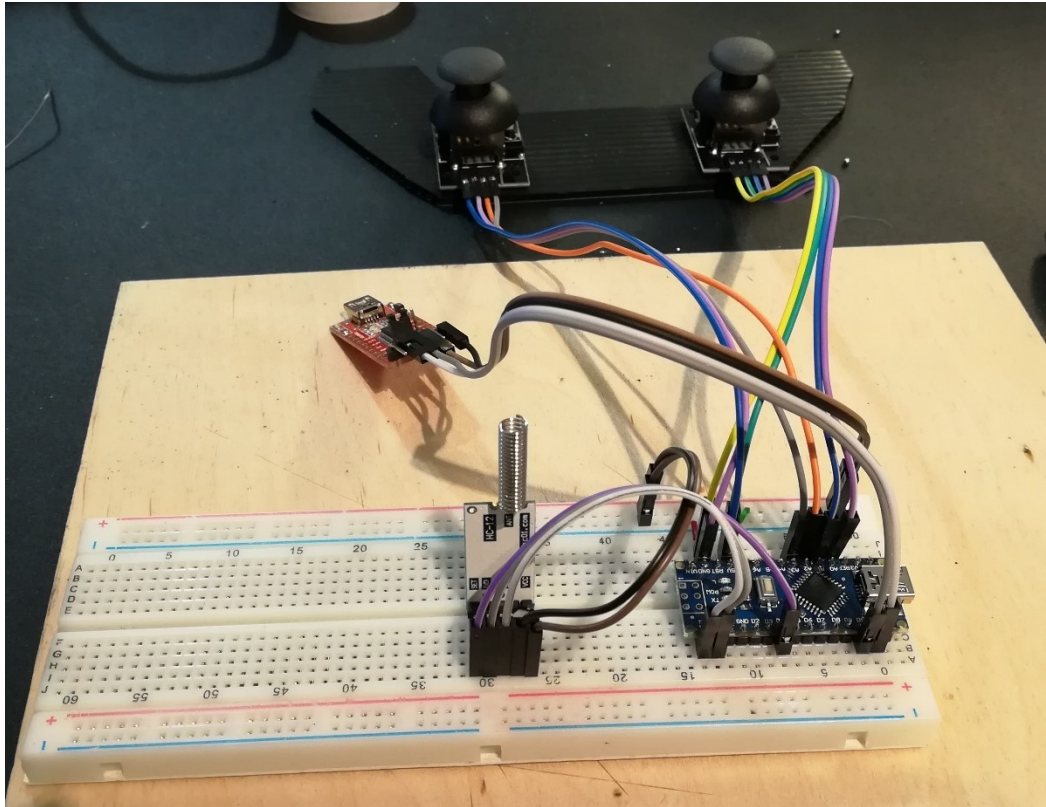
Tavoitteena oli testata pohjana käytettävän kytkennän toimivuus, sekä tarkastella H-silta-topologian soveltuvuutta työhön. Kytkentä todettiin Kuvassa 5 esiteltävän prototyypin pohjalta toimivaksi ja H-silta soveltuvaksi.



Kuva 5. H-sillan ensimmäinen prototyyppi rakennettuna koekytentälevylle.

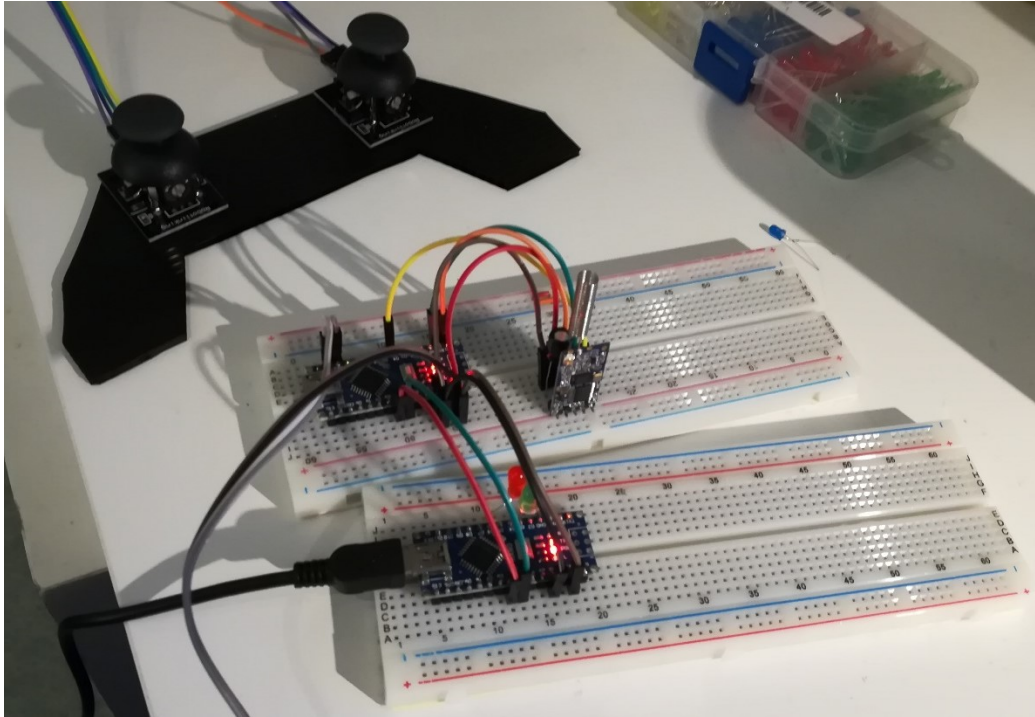
3.3 Ohjainprototyyppi

Työssä toteutettavaa vaunua ohjataan kannettavalla radio-ohjaimella. Ohjaimen rakennusprosessi aloitettiin toteuttamalla prototyyppi, jonka avulla elektroniikan ohjaukseen tarvittava ohjelmakoodi voitiin kirjoittaa.



Kuva 6. Ohjaimen prototyyppiversio.

Prototyyppiohjaimen rakentaminen oli suoraviivainen prosessi ilman teknisiä haasteita. Ohjain koostuu kahdesta analogisesta sauvasta, radiomoduulista, sekä sauvojen asennon radiomoduulin avulla vaunulle kommunikoivasta Arduinosta. Kuvassa 6 esitellyssä prototyyppiversiossa on näiden lisäksi ylimääräinen USB (Universal Serial Bus, universaali sarjaväylä) -sarjamoduuli, jonka avulla Arduinolta voitiin lähettää dataa myös tietokoneelle. Tätä käytettiin apuna kirjoittaessa ohjaimen ohjelmakoodia.



Kuva 7. *Yläreunassa ohjaimen käsiosa (elektroniikka kuvan ulkopuolella), koekytkentälevyillä prototyypit master- ja moottorinohjauslohkoista.*

Toimivan ohjainprototyypin avulla rakennettiin ensimmäinen versio vaunun ohjausjärjestelmästä. Kuvan 7 taaemmalla koekytkentälevyllä on master-lohkon prototyyppi, joka vastaanottaa radiomodulilla kuvan ulkopuolella olevan ohjaimen elektroniikan lähettämiä ohjauskomentoja. Master välittää saadut ohjauskomennot edelleen etummaisella koekytkentälevyllä olevalle moottorinohjauslohkon prototyypille. Prototyyppiin on kytketty kaksi LEDiä (Valoa emittoiva diodi) simuloimaan vaunun moottoreita. Moottorinohjauslohko säätelee LEDeille syötettävää jännitettä saatujen ohjauskomentojen mukaisesti.

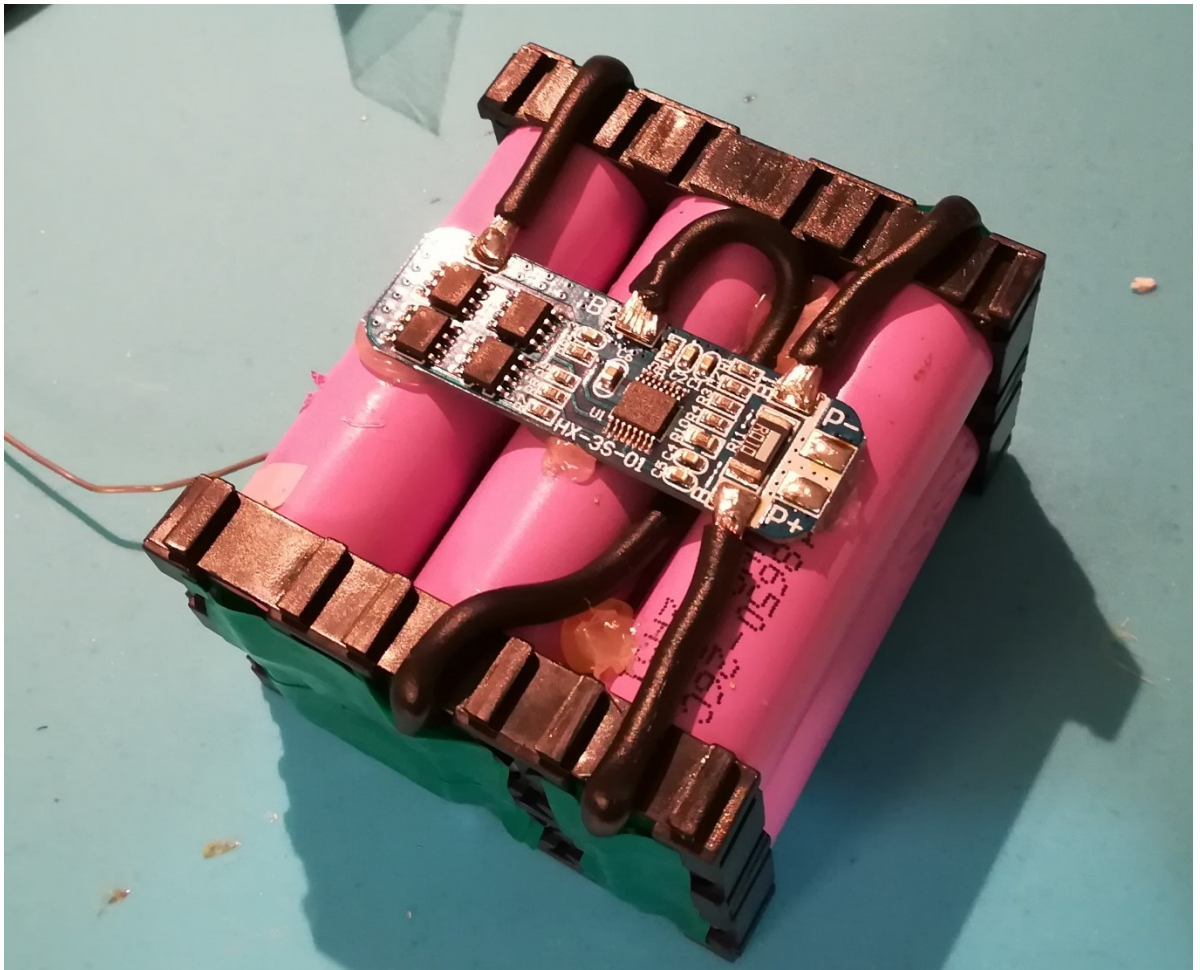
Esiteltyä järjestelyä käytettiin lohkojen kytkentöjen toimivuuden tutkimiseen ja tarvittavan ohjelmakoodin kehittämiseen. Suurin osa työn ohjelmakehityksessä tapahtui tässä vaiheessa. Suunnitellut kytkennät havaittiin toimiviksi ja tarvittava ohjelmakoodi saatiin kehitettyä.

3.4 Akusto

Akusto koottiin käytetyistä ICR18650 26C -kennoista. Kuva 8 esittelee akun rakennetta. Kennojen yhdistämiseen käytettiin paksua monisäikeistä kuparijohtinta. Pistehitsausmahdollisuuden puuttuessa liitokset tehtiin juottamalla. Juotettaessa kennojen kuumeneminen pyrittiin minimoimaan.



Kuva 8. Vaunun akusto rakennusvaiheessa.

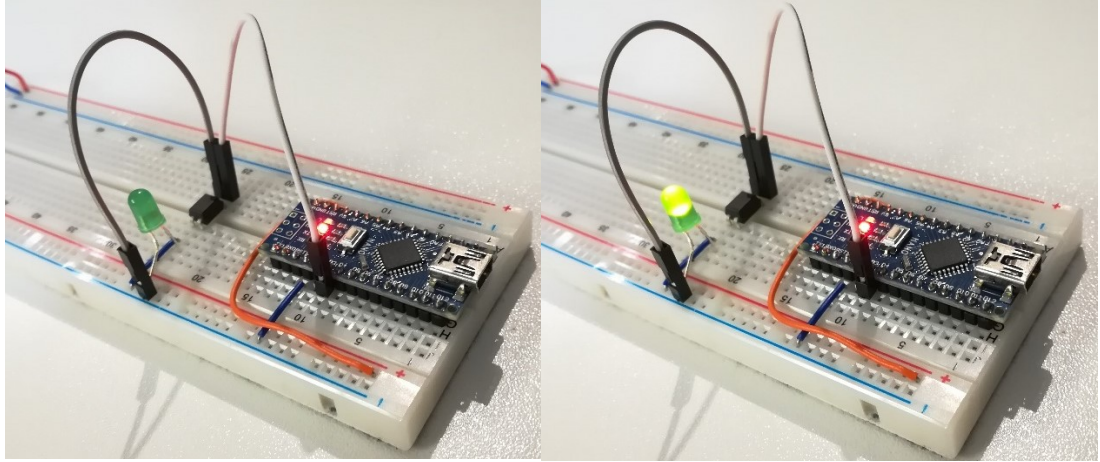


Kuva 9. Valmis akusto Battery Management system -moduulilla.

Kuvassa 9 on esitettyä valmis akusto. Kuvassa nähdään teoriaosuudessa mainittu akustoja valvova akunvalvontajärjestelmä (BSM, Battery Management system) -moduuli. Akustoa koekäytettäessä havaittiin, että äkilliset muun muassa vaunun nopeasta kiihdytyksestä syntyvät virtapiikit aiheuttavat BMS-moduulin oikosulkusuojauksen laukeamisen ja näin ollen akuston irtikytkennän. Jotta näin ei tapahtuisi, moduulin virranmittausominaisuus poistettiin käytöstä ylikytkemällä piirin virranmittausvastus.

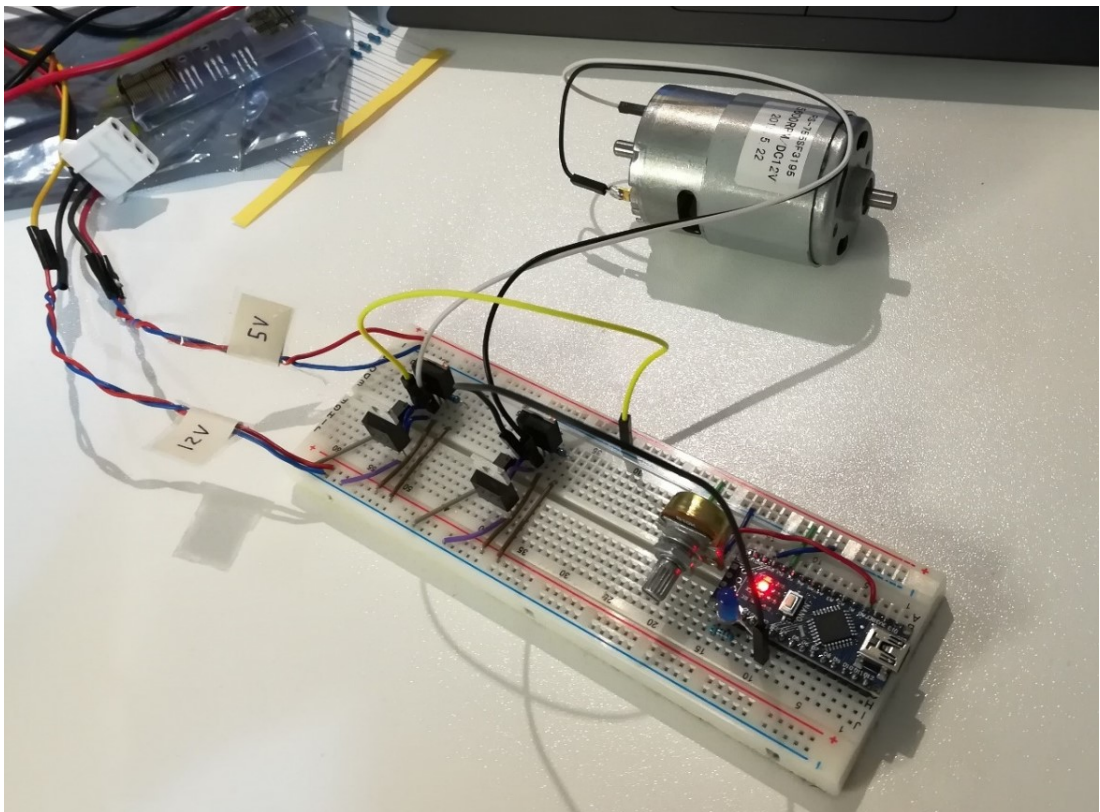
3.5 Moottorinhjaus

Moottorinhjauksen viimeistely oli viimeinen vaunun viimeisteltävistä järjestelmistä. Piirinä käytettiin bristolwatch.com -sivustolla esitellyn piirin opteroitettua versiota alku-
peräisestä poikkeavilla transistoreilla.



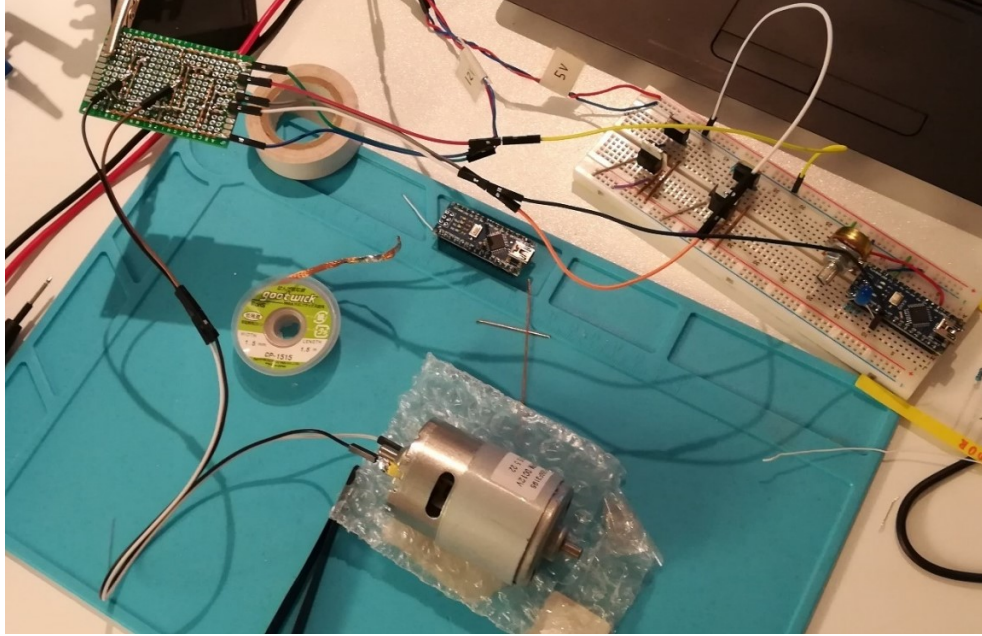
Kuva 10. Optoerotin testikytkentä.

Moottorinhjauksen lopullisen piirin rakentaminen alkoi optoerottimien toimintaan tutustumisella Kuvan 10 mukaisen kytkennän avulla. Tämän jälkeen rakennettiin koekytkentälevylle prototyyppi lopullisesta piiristä. Kytkentä esitellään Kuvassa 11.



Kuva 11. Moottorinhjaupiirin lopullinen versio koekäytössä.

Samalle koekytkentälevylle lisättiin Arduino, jonka avulla moottorille syötettävää tehoa kyettiin säätämään PWM:llä. Koekäytössä säädön sisäänmenona käytettiin aluksi Kuvassa 11 koekytkentälevyllä näkyvän potentiometrin asentoa. Piiri havaittiin toimivaksi.

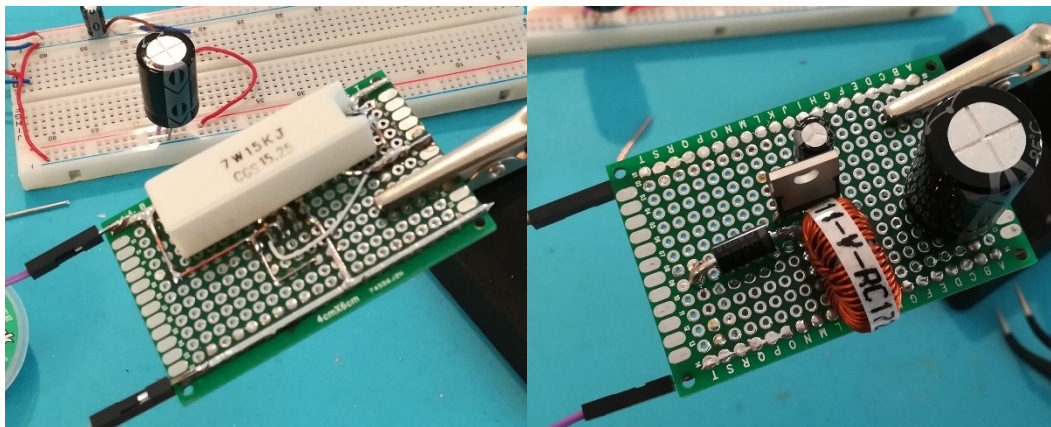


Kuva 12. Reikälevylle rakennettu moottorinohjauspiiri koekäytössä.

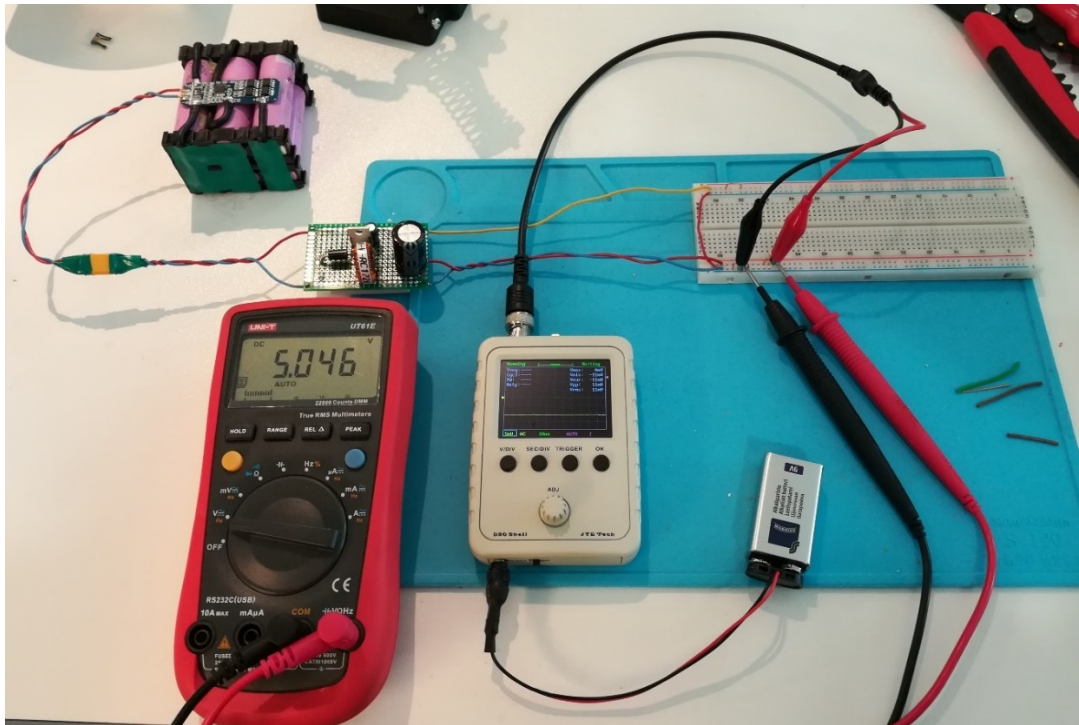
Piiristä rakennettiin kaksi identtistä kopiota reikälevylle, yksi kummallekin moottorille. Piirit testattiin Kuvan 12 mukaisella koejärjestelyllä. Piirit todettiin toimiviksi.

3.6 Vaunun käyttöjännitteet

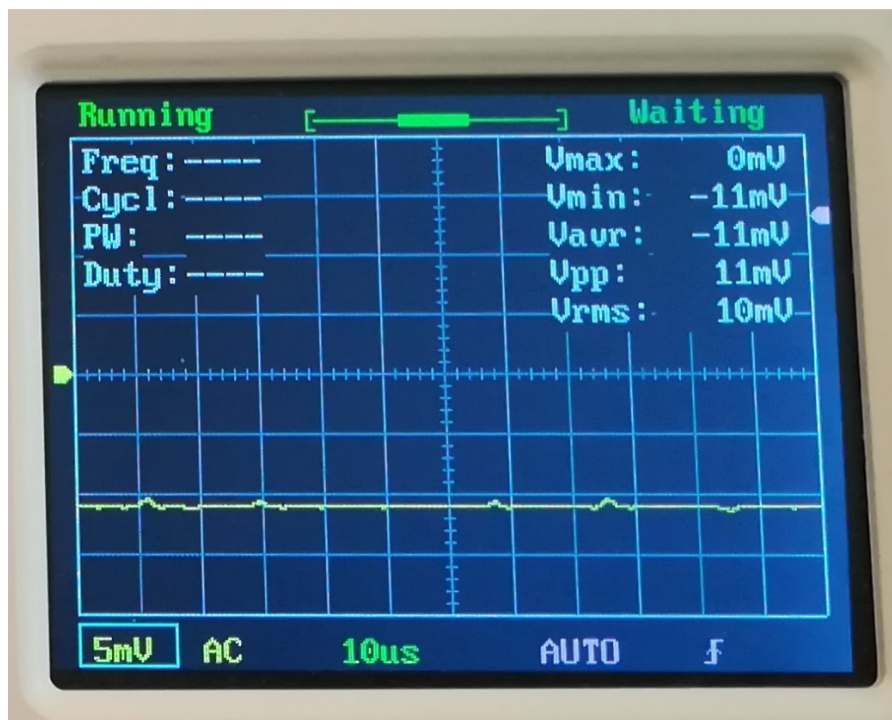
Toteutettiin kappaleen 2.7.2 esittelemä käyttöjännitelohko tuottamaan vaunun tarvitsema 5 V käyttöjännite. Toteutettu piiri Kuvassa 13.



Kuva 13. Valmis käyttöjännitelohko.



Kuva 14. Käyttöjännitelohkon toiminnan mittausjärjestely.

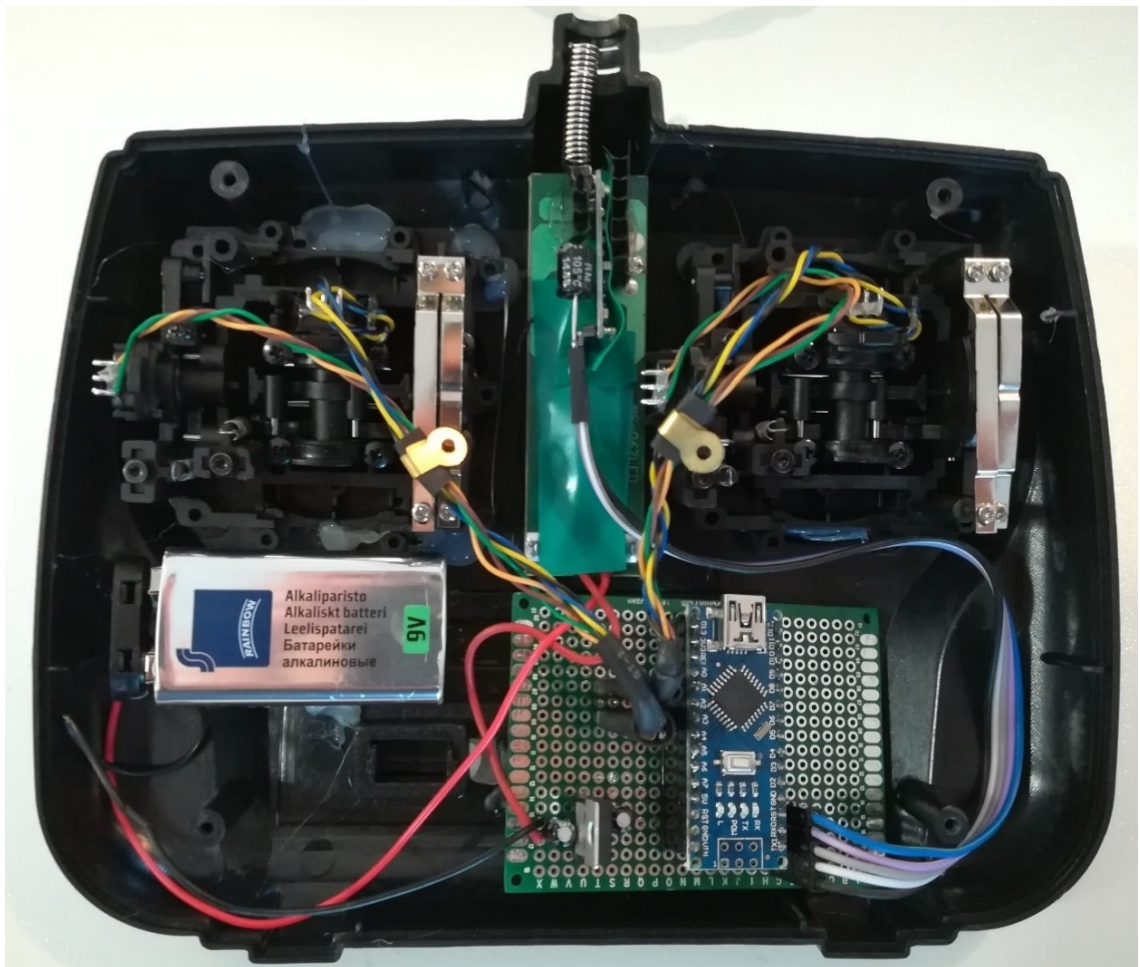


Kuva 15. Oskilloskooppimittaus käyttöjännitelohkon tuottamasta 5 V jännitteestä.

Käyttöjännitelohkon tuottaman jännitteen laatua tutkittiin Kuvan 14 mukaisella koejärjestelyllä. Käyttöjännitelohko todettiin toimivaksi. Kuvassa 15 oskilloskooppimittaus käyttöjännitteestä. Tuotetun 5 V käyttöjännitteen laatu on hyvä.

3.7 Ohjaimen viimeistely

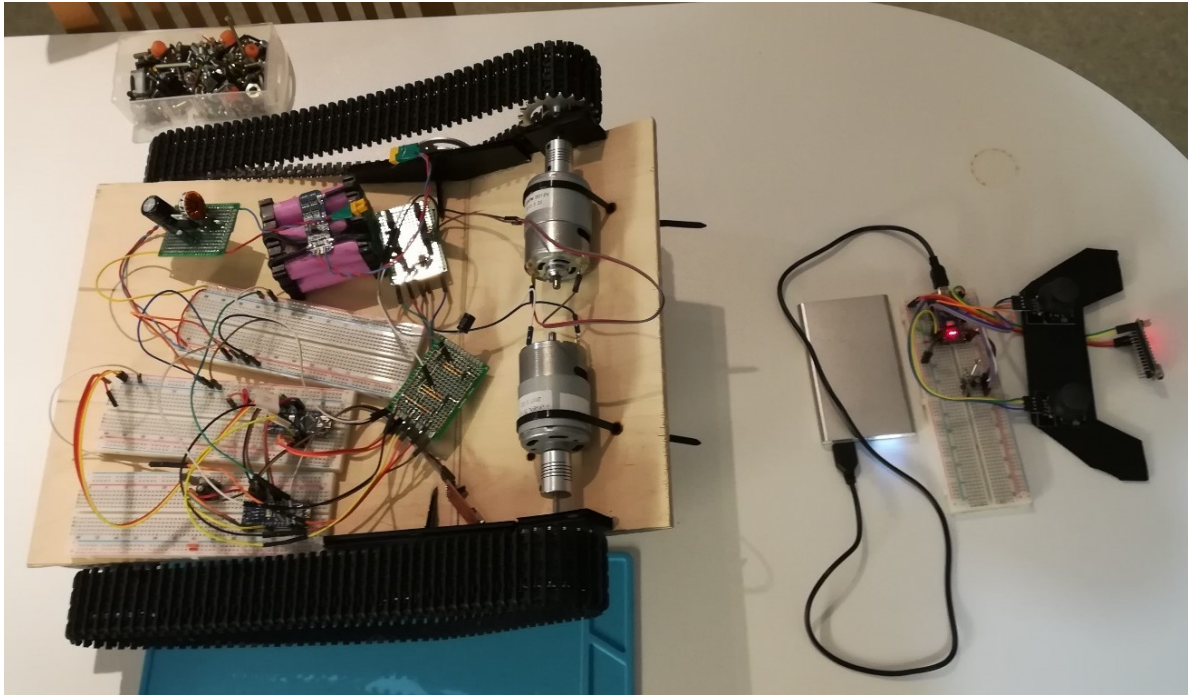
Ohjaimen kotelona uusiokäytettiin vanhaa radio-ohjainta, jonka syötelaitteet korvattiin laadukkaammilla sauvaohjaimilla. Radio-ohjaimen vanha elektronikka poistettiin ja sen tilalle asennettiin uusi Kuvassa 16 näkyvä ohjainelektroniikka. Näin valmistettu ohjain täyttää tehtävänsä ja toimii kappaleessa 2.3 määriteltyjen vaatimusten mukaan.



Kuva 16. Ohjain takakansi irrotettuna.

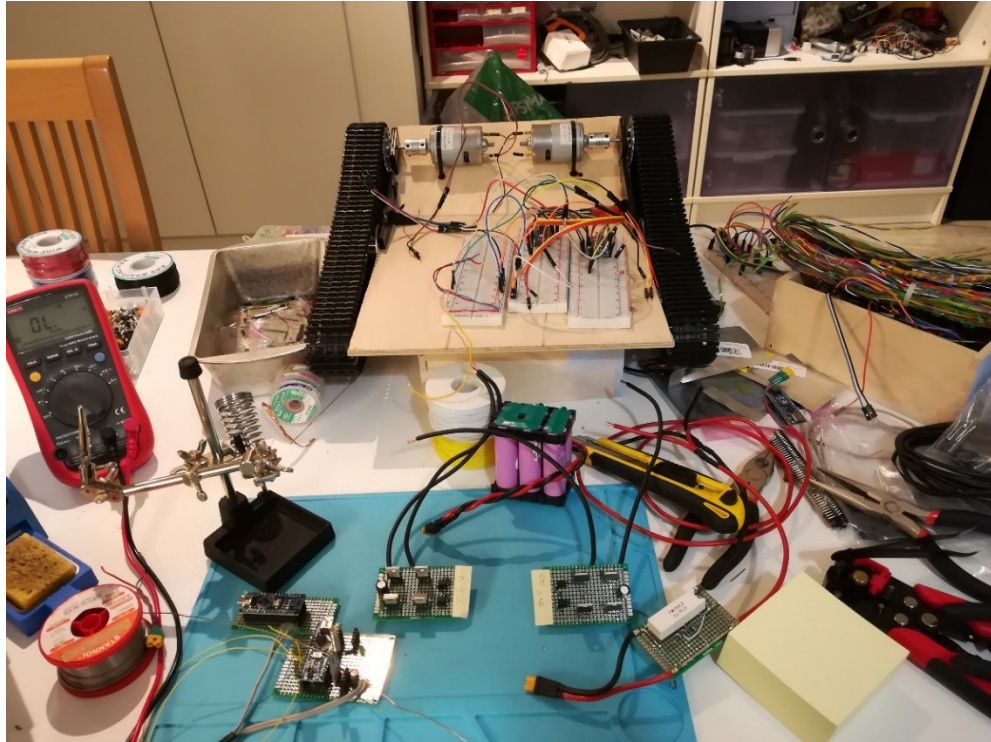
3.8 Alijärjestelmien yhdistäminen kokonaisuudeksi

Kaikkien alijärjestelmien ollessa toimintakuntoisia, ne yhdistettiin yhdeksi toimivaksi koko järjestelmän prototyypiksi. Ensimmäinen koko järjestelmän testi suoritettiin Kuvan 17 mukaisella konfiguraatiolla. Käytetty runko ei ollut lopullinen osittain 3D-tulostettu runko vaan sen prototyypiversio. Järjestelmä havaittiin toimivaksi. Ainut esiin tullut ongelma oli moottorien tilapäisten syöttökaapelien pienestä halkaisijasta johtuva suuri resistanssi, joka rajoitti moottoreille syötettävän tehon pieneksi.

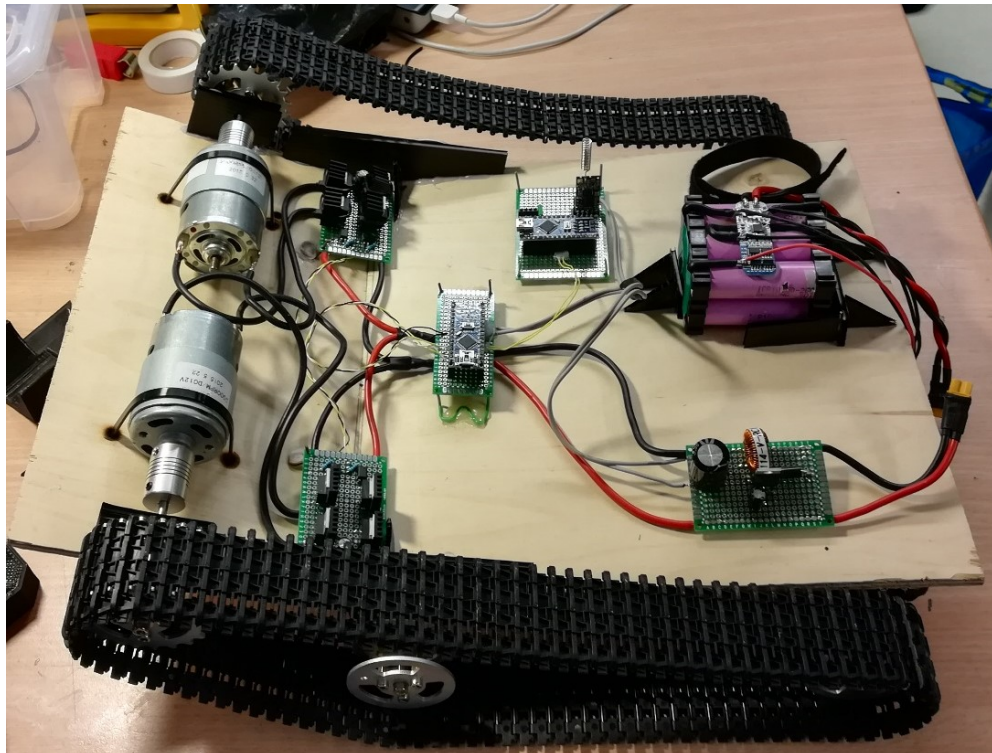


Kuva 17. Koko järjestelmän ensimmäinen toimiva versio.

Kun järjestelmä todettiin toimivaksi, ryhdyttiin kytkentöjä siirtämään koekytentälevyiltä reikälevyille. Kuvassa 18 esillä yksittäiset reikälevyille rakennetut piirit. Kuvassa 19 valmis elektroniikkajärjestelmä asennettu prototyypirunkoon.



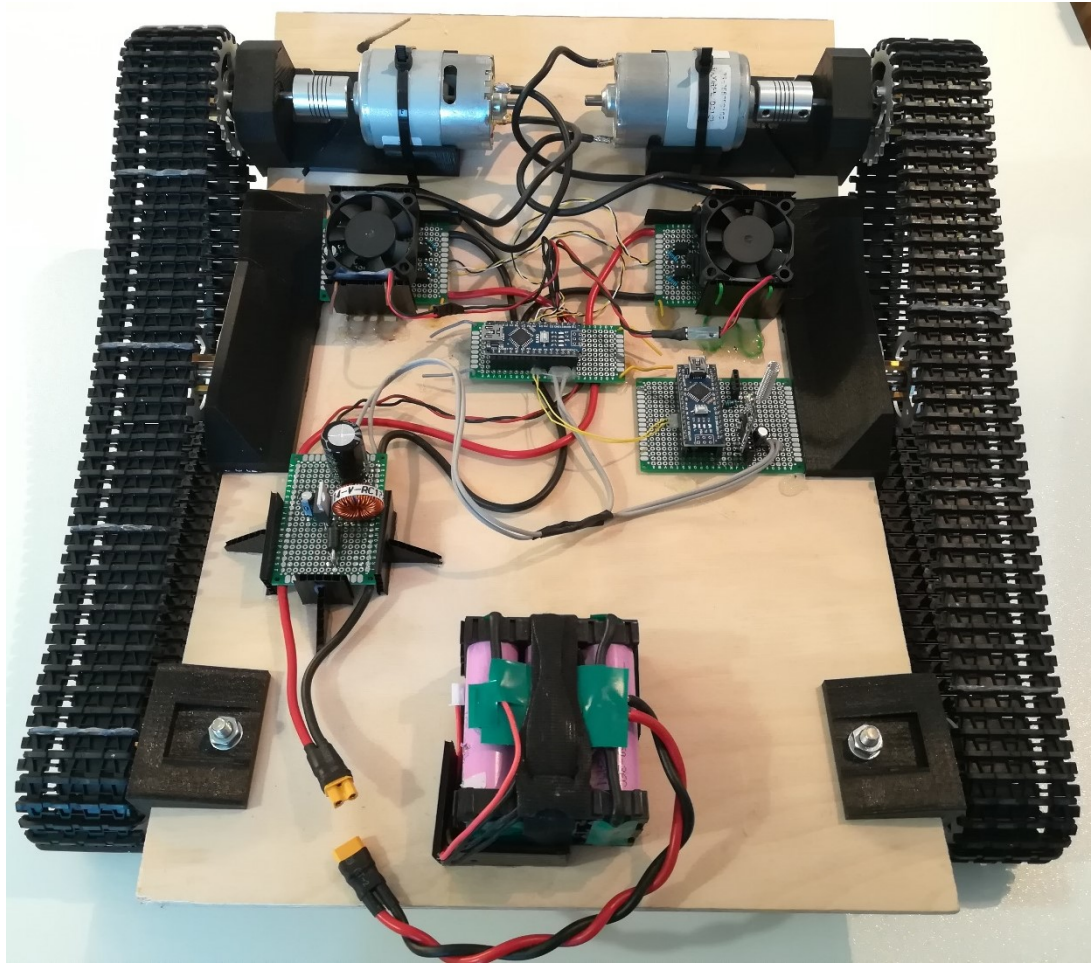
Kuva 18. Testikytkenöillä toteutettu keskeneräinen laite sekä lopulliset kytkennät reikälevyillä.



Kuva 19. Lopullinen elektroniikkajärjestelmä rakennettuna prototyypirunkoon.

4. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tulos on toimiva ja helposti laajennettava Arduino-pohjainen kauko-ohjattava tela-alusta. Kuvassa 20 nähdään valmis vaunu takaa ylhäältä kuvattuna, vaunun sivuprofiili on nähtävissä Kuvassa 22. Vaunun toteutus onnistui suunnitellusti. Elektroniikka mahtui luontevasti sille suunniteltuun runkoon.



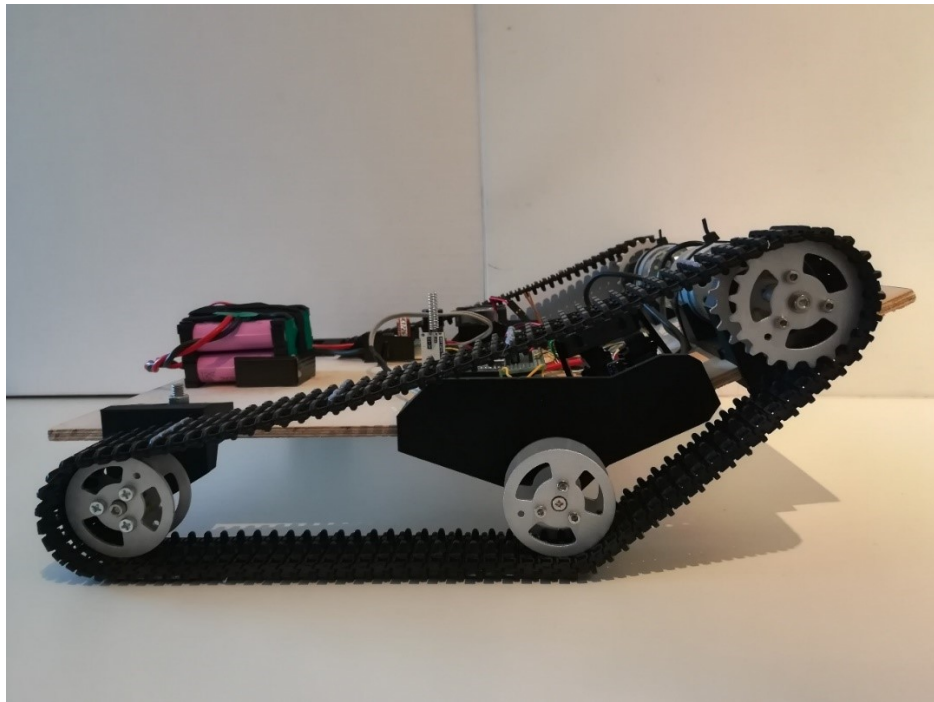
Kuva 20. Valmis vaunu 3D-tulostetuilla rungonosilla.

Kuvassa 21 esiteltynä valmis ohjain edestäpäin kuvattuna. Kuvassa ohjain on pois päältä josta johtuen Kuvan 1 piirikaaviossa esitelty LED ei pala.

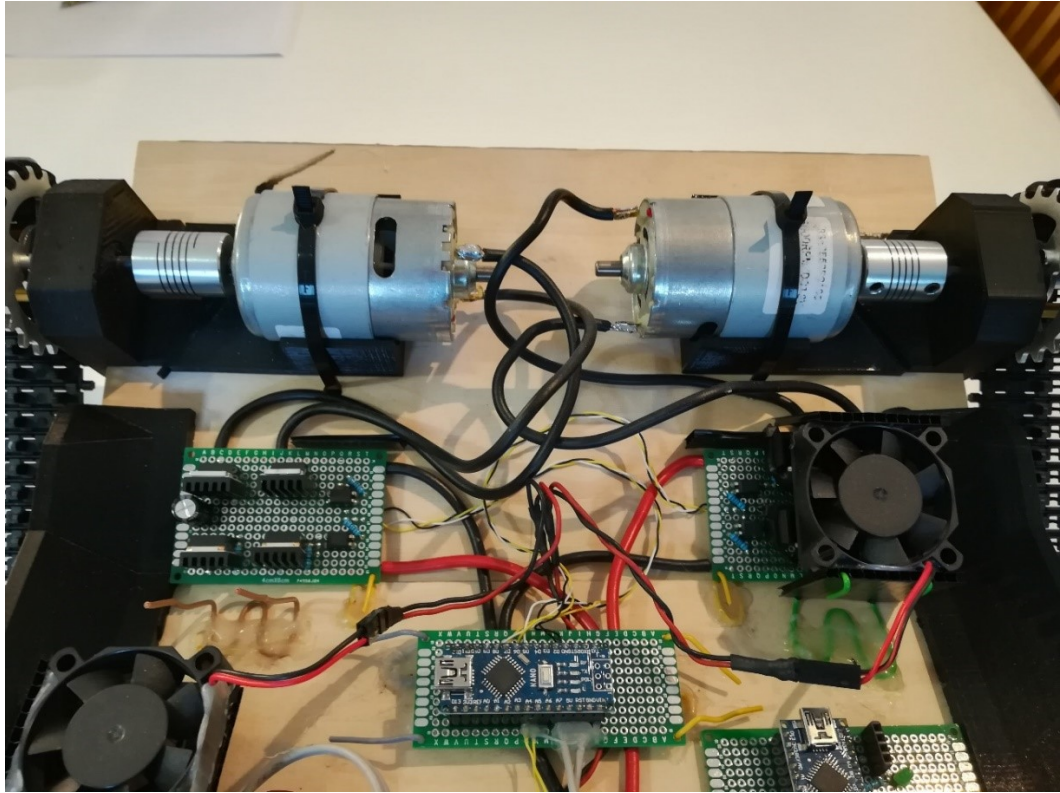


Kuva 21. Valmis ohjain

Tässä vaiheessa panssarivaununprojektia rungon tehtävänä on toimia testialustana vaunun sähköisille järjestelmille. Rungon 3D-tulostetut osat toimivat erinomaisesti, pitäen oikein säädettynä telat paikoillaan lähes kaikissa olosuhteissa.



Kuva 22. Valmiin vaunun sivuprofiili.



Kuva 23. Vaunun valmis moottorinohjaus.

Koekäytössä H-siltojen MOSFET:ien havaittiin kuumenevan huomattavasti. Vaurioitumisen välttämiseksi H-siltoja jäähdyttämään asennettiin pienet tuulettimet, joista toinen on nähtävissä Kuvassa 23 oikealla, sekä jokaiseen MOSFET:iin kiinnitettiin jäähdytys-elementti, joita on nähtävissä Kuvassa 23 vasemmalla. Kokonaisuudessaan moottorinohjauslohko kuitenkin toimii täysin suunnitellusti mahdollistaen moottorien takaisin-kytkemättömän suunta- ja tehosäädön.

Toiminnallisesti järjestelmä täyttää kokonaisuudessaan edellisessä luvussa määritellyt vaatimukset. Vaunun moottoreita voidaan ohjata säädettävällä teholla molempiin suuntiin ja radioyhteys on luotettava. Akustoon voidaan ladata tarpeeksi energiaa pidempiaikaiseen operointiin ja akustosta pystytään ottamaan riittävästi tehoa moottoreiden tarpeeseen ilman, että ohjauselektronikan käyttöjännitteeseen aiheutuu merkittävää häiriötä.

Järjestelmän toteutus noudattaa kappaleessa 2.1 esiteltyjä suunnitteluperiaatteita, laajennettavuutta ja modulaarisuutta. Modulaarisuus on toteutunut järjestelmän useina toisistaan riipputtomina tiettyä rajattua tarkoitusta palvelevina lohkoina. Laajennettavuuden takaa vaunun alijärjestelmien käyttämä master – slave -hierarkia ja sen kommunikaation toteuttava I2C-protokolla.

Vaunun suunnittelu- ja rakennusprosessit sujuivat suoraviivaisesti ja ilman suurempia ongelmia. Kokonaisuudessaan työtä voidaan pitää hyvin onnistuneena. Seuraava askel panssarivaununprojektissa on järjestelmän laajentaminen vaunun tornilla ja asejärjestelmällä.

LÄHTEET

- [1] Wheat, D. (2011) Arduino Internals. Viitattu 4.11.2017. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tut.fi/book/10.1007%2F978-1-4302-3883-6>
- [2] Arduino-projektin kotisivut. Viitattu 4.11.2017. Saatavissa <https://www.arduino.cc>
- [3] D'Ausilio, A. (2012). Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment, Behavior Research Methods, Vol. 44(2), pp. 305-313.
- [4] Kumbhar, A. (2016). Overview of ISM Bands and Software-Defined Radio Experimentation, Wireless Personal Communications, Vol. 97(3), pp. 3743-3756.
- [5] Tuset-Peiró, P., Anglès-Vazquez, A., López-Vicario, J. & Vilajosana-Guillén, X. (2014). On the suitability of the 433 MHz band for M2M low-power wireless communications: propagation aspects, Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, Vol. 25(12), pp. 1154-1168.
- [6] HC-12 Wireless Serial Port Communication Module User Manual V1.18. Viitattu 10.11.2017. Saatavissa: <https://www.elecrow.com/download/HC-12.pdf>
- [7] An introduction to I2C and SPI protocols (2009). in: IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, New York, pp. 8-13.
- [8] Anand, N., Joseph, G., Oommen, S.S. & Dhanabal, R. (2014). Design and implementation of a high speed Serial Peripheral Interface, 2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), IEEE, pp. 1-3.
- [9] Irazabal, J.M., Blozis, S. (2003). I²C Manual. Viitattu 21.1.2018. Saatavissa: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN10216.pdf>
- [10] Rahman, M.F., Patterson, D., Cheok, A. & Betz, R. (2007). 33 - Motor Drives A2 - Rashid, Muhammad H, in: Anonymous (ed.), Power Electronics Handbook (Second Edition), Academic Press, Burlington, pp. 857-933.
- [11] Abdelhamid, T.H. (2000). Performance of single-phase DC drive system controlled by uniform PWM full-bridge DC-DC converter, 2000 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries. Proceedings. MeleCon 2000 (Cat. No.00CH37099), pp. 977 vol.3.

- [12] Wagh, A., Sheth, N. & Joshi, J. (2015). Implementation of MOSFETs in a closed loop H-Bridge motor driver using charge pumps, 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), IEEE, pp. 1-5.
- [13] Loflin. L. (2016). H-Bridge Motor Control with Power MOSFETS, Bristolwatch.com. Viitattu 21.1.2018. Saatavissa http://www.bristolwatch.com/ele/h_bridge.htm
- [14] Horiba, T. (2014). Lithium-Ion Battery Systems, Proceedings of the IEEE, Vol. 102(6), pp. 939-950.
- [15] Scrosati, B., Hassoun, J. & Sun, Y. (2011). Lithium-ion batteries. A look into the future, Energy & Environmental Science, Vol. 4(9), pp. 3287.
- [16] LM2576T-5.0:n datalehti. Viitattu 22.1.2018. Saatavissa: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf>