



Langaton voiman ulosoton pyörimisnopeuden mittaaminen

Janne Laitinen

Opinnäytetyö, AMK

Syyskuu 2021

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka

Laitinen, Janne

Langaton voiman ulosoton pyörimisnopeuden mittaus

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Syyskuu 2021, 72 sivua

Tekniikan ala. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö, AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Tuotettujen työkoneiden testausprosessien standardisoinnin tarve on alati kasvava, sillä tuotteiden laatu ja yhdenmukaisuus täytyy varmistaa yhä kasvavissa tuotantomäärissä. Toimeksiantaja halusi standardisoida työkoneidensa loppukoeajojärjestelmää korvaamalla silmämääräisesti tehty voiman ulosoton pyörimisnopeuden tarkastus konkreettisella mittaustiedolla. Tarve oli selkeä, sillä silmin tehtyä tarkastusta ei voida pitää standardimaisena menetelmänä.

Kehittämistyön tavoitteena oli luoda prototyyppi langattomasta mittalaitteesta, joka toimii yhdessä toimeksiantajan loppukoeajojärjestelmän kanssa todentaen tuotettujen työkoneiden voiman ulosottoakselin pyörimisnopeuden. Prototyypin tarkoituksena on olla kiinni työkoneessa testauksen yhteydessä, mitata pyörimisnopeus työkoneen akselista ja jakaa mittaustieto langattomasti toimeksiantajan ulkoiseen testausjärjestelmään.

Prototyyppi toteutettiin käyttäen induktiivista anturia sekä Arduino UNO Wi-Fi rev2 yhden piirilevyn tietokonetta. Prototyypin runko ja sen kiinnitys suunniteltiin toimeksiantajan työkoneille sopivaksi ja se valmistettiin PLA-muovista käyttäen 3D tulostinta.

Langattomana yhteytenä käytettiin Bluetooth Low Energyä. Yhteyden muodostamiseksi mittalaitteen prototyypin lisäksi suunniteltiin myös vastaanottimen prototyyppi, jossa käytettiin langattoman yhteensopivuuden varmistamiseksi samaa perustaa kuin mittalaitteessa. Vastaanotin jakoi vastaanotetun tiedon jänniteviestinä toimeksiantajan ulkoiseen järjestelmään.

Markkinoilta löytyy useita ratkaisuja pyörimisnopeuden mittaamiseen. Kehitetty mittalaitteen prototyyppi ja sen vastaanotin ovat kuitenkin räätälöityjä erityisesti toimeksiantajan käyttöympäristöön ja työkoneisiin. Täten opinnäytetyön tavoitteet saavutettiin, sillä se muodosti yksilöidyn ratkaisun pyörimisnopeuden mittaamiseen ja antoi toimeksiantajalle jalostuskelpoisen prototyypin taustatietoineen.

Avainsanat (asiasanat)

Arduino, Raspberry Pi, Bluetooth, Induktiiviset anturit, Mittauslaitteet, Prototyypit, Pyörimisnopeus

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liitteet 1, 5, 6, 7, 8, 9 sekä 11 ovat salassa pidettäviä, ja ne on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 21, teknologista taikka muuta kehittämistyötä ja niiden arviointia koskevat tiedot. Salassapitoaika on kaksikymmentäviisi (25) vuotta, salassapito päättyy 6.9.2036.

Laitinen, Janne

Wireless rotational speed measurement of power take-off

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, September 2021, 72 pages

Engineering and technology. Degree Programme in electrical engineering and automation technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The need to standardize testing processes of manufactured machines is ever-increasing because the quality and consistency must be ensured with increasing production volumes. The client wanted to standardize their final testing system processes by replacing visual inspection of the rotational speed of power take-off shaft with actual measurement data. The need was clear because the visual inspection could not be considered as a standard method.

The development project was aiming for a prototype of a wireless measuring device which would work together with their final test drive system by verifying the rotational speed of the power take-off shafts of the machines produced. The prototype is meant to be attached to the machine during the final test run, so it can measure the rotational speed from the axis of the machine and share the measurement data wirelessly to the client's external testing system.

The prototype was based on an inductive sensor and an Arduino UNO Wi-Fi rev2 single circuit board computer. The body of the prototype and its fastening were designed specifically for the client's machines, and it was made with a 3D printer out of PLA plastic.

The prototype uses Bluetooth Low Energy as a wireless connection. In addition to the measuring device prototype, a receiver prototype was also designed for forming the wireless connection. To ensure wireless compatibility, the receiver was based on the same layout as the measuring device. The receiver shared the received information as a voltage message to the client's external system.

Many solutions for measuring rotational speed can be found on the market. Nevertheless, the developed prototype of the measuring device and its receiver were customized for the client's operational environment and machines. Thus, the goal of the thesis was achieved, because it formed an individualized solution for measuring the rotational speed and produced a processable prototype with background information for the client.

Keywords/tags (subjects)

Arduino, Raspberry Pi, Bluetooth, Inductive sensors, Measuring devices, Prototypes, Rotational speed

Miscellaneous (Confidential information)

Annexes 1, 5, 6, 7, 8, 9 and 11, are confidential and have been removed from the public thesis. The basis for secrecy is the Publicity law 621/1999 24§, section 21, technological or other development project, or the assessment of the same. Period of the secrecy is twenty-five (25) years, secrecy ends 6.9.2036.

Sisältö

1	Johdanto	5
1.1	Opinnäytetyön lähtökohdat.....	5
1.2	Tavoitteet ja rajaus.....	5
2	Tutkimusasetelma	7
2.1	Tutkimusote	7
2.2	Tutkimusmenetelmä	7
2.3	Tietoperusta	8
3	Pyörimisnopeuden mittaaminen anturilla	9
3.1	Yleistä	9
3.2	Antureiden tuottama mittaustieto	9
4	Anturityyppien vertailu ja valinta	11
4.1	Induktiiviset anturit	11
4.1.1	Perinteiset induktiiviset anturit	11
4.1.2	Induktiiviset lähestymiskytkimet	12
4.2	Hall-anturit	13
4.3	Optiset anturit.....	16
4.4	Valintaperuste	16
5	Mittaustiedon käsittely ja jakaminen	19
5.1	Yleistä	19
5.2	Arduino.....	19
5.2.1	Arduino UNO Wi-Fi rev2	20
5.3	Raspberry Pi.....	21
5.3.1	Raspberry PI 4 Model B.....	22
5.4	Logiikan valintaperuste	23
5.5	Langaton yhteys	25
6	Mittalaitteen toteutus	28
6.1	Sähköpiirin suunnittelu	28
6.1.1	Anturin kytkentä	29
6.1.2	LEDien kytkentä	30
6.1.3	Virtalähde ja lataus	31
6.2	Ohjelman toteutus	33
6.2.1	Käytetyt kirjastot ja muuttujat	33
6.2.2	Ohjelman ja mainostustilan määrittely	33

6.2.3	Ohjelman silmukan määrittely	34
6.3	Rungon toteutus.....	35
6.3.1	Kiinnitys työkoneeseen ja rungon pohjalevy	36
6.3.2	Komponenttien kiinnitys ja rungon keskiosa.....	36
6.3.3	Rungon yläosa ja käyttökahva	37
7	Vastaanottimen toteutus	38
7.1	Sähköpiirin suunnittelu	38
7.1.1	DA-muunnin ja sen kytkentä	39
7.2	Ohjelman toteutus	40
7.2.1	Käytetyt kirjastot ja muuttujat	40
7.2.2	Ohjelman ja hakutilan määrittely	40
7.3	Rungon toteutus.....	45
8	Mittalaitteen ja vastaanottimen testaus	46
8.1	Pyörimisnopeuden mittaus	46
8.2	Langaton yhteys	47
8.2.1	Yhteyden muodostaminen ja tiedonsiirto	47
8.2.2	Yhteyden kantama ja häiriöherkkyys.....	49
8.3	Mittalaitteen akun kesto	51
8.4	Vastaanottimen muodostama jänniteviesti.....	53
9	Pohdinta	55
	Lähteet	57
	Liitteet.....	59
	Liite 1. 3D – Mallinnukset kiinnitysadaptereista ja pohjalevystä (salassapidettävä)	59
	Liite 2. 3D – Mallinnukset rungon keskiosasta ja yläosasta	60
	Liite 3. 3D – Mallinnus käyttökahvasta	61
	Liite 4. 3D – Mallinnukset vastaanottimen ja jännitemuuntimen rungoista	62
	Liite 5. Ensimmäinen prototyyppi työkoneen rungossa (salassapidettävä)	63
	Liite 6. Valmis mittalaite työkoneen rungossa (salassapidettävä).....	64
	Liite 7. Valmis mittalaite kahdesta eri näkökulmasta (salassapidettävä)	65
	Liite 8. Valmiin mittalaitteen sähkökytkennät (salassapidettävä)	66
	Liite 9. Mittalaitteen kiinnitysadapterit ja pohjalevy (salassapidettävä).....	67
	Liite 10. Valmis vastaanotin ja jännitemuunnin.....	68
	Liite 11. Yhteyden kantaman testaus työkoneiden läheisyydessä (salassapidettävä)	69

Kuviot

Kuvio 1. Antureiden integraatiotasot	10
Kuvio 2. Perinteisen induktiivisen anturin toimintaperiaate	11
Kuvio 3. Induktiivisen lähestymiskytkimen pääosat	13
Kuvio 4. Hall-ilmiö	14
Kuvio 5. Hall-anturien toteutus passiivisella ja aktiivisella roottorilla.....	15
Kuvio 6. Baumer IR12.P04F-11111236	18
Kuvio 7. Arduino UNO Wi-Fi rev2.....	21
Kuvio 8. Raspberry Pi 4 Model B	23
Kuvio 9. BLE laitteiden roolit.....	26
Kuvio 10. Mittalaitteen kytkentäkaavio.....	28
Kuvio 11. IR12.P04F-11111236 kytkentäkaavio.....	29
Kuvio 12. Mittalaitteen anturin kytkentä Arduinoon	30
Kuvio 13. Mittalaitteen LEDien ja mitoitetujen etuvastuksien kytkentä	31
Kuvio 14. Mittalaitteen akun ja virtakytkimen kytkentä	32
Kuvio 15. Mittalaitteen ohjelman kirjastot ja muuttujat.....	33
Kuvio 16. Mittalaitteen ohjelman ja mainostustilan määrittely.....	34
Kuvio 17. Mittalaitteen ohjelman silmukka	35
Kuvio 18. Vastaanottimen kytkentäkaavio	38
Kuvio 19. Vastaanottimen DA-muuntimen kytkentä Arduinoon.....	39
Kuvio 20. Vastaanottimen ohjelman kirjastot ja muuttujat	40
Kuvio 21. Vastaanottimen ohjelman ja yhteyden hakuehtoien määrittely.....	41
Kuvio 22. Vastaanottimen ohjelman ja yhteyden hakuehtoien määrittely.....	42
Kuvio 23. Vastaanottimen ohjelman määrittely yhteyden aikana	43
Kuvio 24. Vastaanottimen DA-muuntimen muuntoperiaate	44
Kuvio 25. Vastaanottimen ohjelman määrittely yhteyden katkeamisen jälkeen.....	44
Kuvio 26. Valmis vastaanotin ja jännitemuunnin	45
Kuvio 27. Mittalaitteen tuottama mittaustieto työkoneen kiihdytyksen aikana	47
Kuvio 28. Mittalaitteen päällekytkentä ja yhdistäminen vastaanottimeen	48
Kuvio 29. Mittalaitteen virrankulutus valmiustilassa	51
Kuvio 30. Mittalaitteen virrankulutus lähetystilassa	52
Kuvio 31. DA-Muuntimen tarkkuuden arviointi.....	53

Taulukot

Taulukko 1. Antureiden vertailu	17
Taulukko 2. Logiikkojen vertailu	24
Taulukko 3. Yhteyden kantaman testaus.....	49
Taulukko 4. DA-Muuntimen tuottaman jänniteviestin vertailu laskettuihin arvoihin	54

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat

Opinnäytetyön toimeksiantaja on merkittävä työkoneiden valmistaja, jolla on käytössä erityinen loppukoeajojärjestelmä tuotettujen työkoneiden testaamiseen. Monivaiheisen testauksen tarkoituksena on tuotantoprosessin laadunvalvonta sekä valmistettujen työkoneiden varustelutason mukaisten ominaisuuksien toiminnan testaus.

Yksi loppukoeajon tarkastuksen kohteista on työkoneen voiman ulosottoakselin pyörimisnopeuden todentaminen. Työkoneen edessä ja takana olevien voiman ulosottoakselien pyörimisnopeudet ovat säädettävissä työkoneen moottorin kierrosten mukaan, mutta lisävarusteena edessä olevan voiman ulosottoakselin pyörimisnopeuden todentaminen loppukoeajossa on vain silmämääräistä. Silmämääräinen tarkastus ei ole standardinomainen menetelmä, mikä tuo epävarmuutta testausprosessiin ja tekee mahdollisten eroavaisuuksien huomaamisen tuotettujen työkoneiden välillä vaikeaksi. Näistä syistä toimeksiantajan tarpeena oli korvata voiman ulosoton pyörimisnopeuden silmämääräinen tarkastus erillisellä mittalaitteella.

Opinnäytetyön aihevalintaan vaikuttivat henkilökohtainen kiinnostus mittaustekniikkaan sekä toimeksiantajan aihepiiriin. Lisäksi opinnäytetyön aihe tarjosi monipuolisen mahdollisuuden sähkösuunnittelun, ohjelmoinnin sekä teknisen suunnittelun soveltamiseen yhdessä, mikä on hyvin tyypillistä alan tuotekehitykseen liittyvissä työtehtävissä. Kyky luoda eri osa-alueista muodostuva kokonaisuus on hyödyllistä myös itse alan kehittämisen kannalta.

1.2 Tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena on työkoneen voiman ulosottoakselin pyörimisnopeuden mittalaitteen prototyyppin kehitystyö sekä sen toiminnan dokumentointi. Kehitettävän mittalaitteen tarkoitus on tuottaa konkreettista mittaustietoa akselin pyörimisnopeudesta ja jakaa nopeustieto toimeksiantajan mittausjärjestelmään, josta pyörimisnopeutta voidaan tarkastella. Täten mittalaite mahdollistaa jokaisen tuotetun työkoneen voiman ulosoton tarkastamisen standardinomaisella tavalla, mikä nostaa loppukoeajojärjestelmän varmuustasoa ja standardisoi testausprosessia.

Opinnäytetyö rajataan mittalaitteen kehitystyöhön. Työhön sisältyy tarvittavan elektroniikan määrittäminen perusteluineen sekä laitteiston ohjelmoinnin toteuttaminen. Toimeksiantajan näkökulmasta on keskeistä myös laitteen helppokäyttöisyys ja kiinnitys työkoneeseen, joten prototyypin rungon ja kiinnityksen suunnittelu ja toteutus sisältyvät myös työhön.

Toimeksiantajan toiveena on, että mittalaite toimii langattomasti vaaditun kantaman sisällä, joka on mitattavan työkoneen ja testausjärjestelmän välinen etäisyys. Tällöin työhön sisällytetään myös mittatiedon jakaminen langattomasti sekä erillisen vastaanottimen toteutus, joka yhdistetään johtimin toimeksiantajan järjestelmään. Vaikka vastaanotin yhdistetään ulkoiseen järjestelmään, niin kyseiseen ulkoiseen testausjärjestelmään sekä mitattavaan voiman ulosottoon liittyvät aihekokonaisuudet rajataan opinnäytetyön aihealueen ulkopuolelle.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tutkimusote

Toimeksianto perustui mittalaiteratkaisun kehittämisen tarpeeseen yksittäisessä kohteessa, jolloin tutkimusotteeksi soveltui parhaiten kehittämistyö.

Kehittämistyölle ominaista on hyödyntää saatavilla olevaa tutkimustietoa ja käytännön kokemusta uuden menetelmän, tuotteen tai järjestelmän luomiseen tai parantamiseen. Tutkijan rooli on ulkopuolinen osallistuja, jolloin tutkija ei ole osa tutkittavaa kohdetta tai ryhmää, vaan pyrkii vaikuttamaan ilmiöön ulkoa päin. Tyypillisiä esimerkkejä ovat yritysprojektit sekä sopivan ratkaisun aikaansaaminen yksittäiseen ongelmaan, jolloin työn tavoitteena on muutos ja toiminnan parantuminen. Kehittämisen tarve muotoillaan kehittämistyössä ongelmaksi, minkä perusteella pystytään esittämään tutkimuskysymykset. Työn tarkoituksena on etsiä vastaukset näihin kysymyksiin, jolloin ongelma saadaan ratkaistua. (Kananen 2012.)

Opinnäytetyössä ratkaistava ongelma oli työkoneen voiman ulosottoakselin pyörimisnopeustiedon puuttuminen toimeksiantajan loppukoeajojärjestelmästä. Keskeisimmiksi tutkimuskysymyksiksi muodostuivat; *”Miten pyörimisnopeus mitataan?”* ja *”Miten mittaustieto jaetaan toimeksiantajan järjestelmään?”*.

2.2 Tutkimusmenetelmä

Työ keskittyi yksittäiseen kohteeseen, johon tarjottua ratkaisua ei voida yleistää. Tästä johtuen opinnäytetyössä hyödynnettiin kvalitatiivista, eli laadullista tutkimusmenetelmää.

Laadullisessa tutkimusmenetelmässä tutkittavana olevaa ilmiötä pyritään ymmärtämään käyttäen pientä määrää tutkittavia kohteita. Käytettävä aineisto on yleensä hyvin rajattu, jolloin sen aikaansaamia tuloksia voidaan yleistää vain tutkimuskohteessa. Pienestä otannasta johtuen tutkija joutuu perustelemaan valintojaan ja olemaan kriittinen, jotta tutkimuksen tuloksia voidaan pitää luotettavina. (Kananen 2012.)

Menetelmä perustuu neljään vaiheeseen, joita ovat suunnittelu, tiedonkeruu, sisällön analysointi sekä tulkinta (Kananen 2012). Tässä opinnäytetyössä suunnittelu koostuu tutkimusongelman ja tarvittavan taustatiedon määrittämisestä. Tiedonkeruu perustuu havainnointiin paikan päällä, työntekijöiden haastatteluihin sekä kirjallisiin lähteisiin. Kerättyä tietoa analysoidaan ja tulkitaan, minkä perusteella tehdään johtopäätökset oikeanlaisen mittalaitteen ja vastaanottimen suunnittelun perustaksi ja toteuttamiseksi. Tämän jälkeen toteutettua mittalaitetta ja vastaanotinta testataan käytännössä ja saatuja testaustuloksia käytetään tausta-aineiston kanssa yhdessä työn luotettavuuden arvioimiseen.

2.3 Tietoperusta

Opinnäytetyön tietoperustan tavoitteena on auttaa hahmottamaan muodostetun tutkimusongelman kannalta keskeinen teoreettinen viitekehys sekä perustella työn aikana tehtyjä ratkaisuja ja olettamuksia (Kananen 2012).

Tietoperustan luomisessa käytettiin kotimaista sekä vieraskielistä kirjallisuutta, aihealueeseen keskeisesti liittyviä opinnäytetöitä sekä laitevalmistajien tarjoamia oppaita sekä teknisiä tiedotteita. Lähdekriittisyyttä noudatettiin käyttämällä yleisesti luotettavaksi todettuja lähteitä sekä lähteiden luotettavuutta analysoitiin varmistamalla saatu tieto käyttäen monilähteisyyttä. Myös toimeksiantajan edustajan sekä opinnäytetyön ohjaajan ohjeistukset huomioitiin ja niitä hyödynnettiin tiedonhaussa.

Tutkimuksessa ja sen tietoperustassa otettiin huomioon eettiset periaatteet, joita noudattaen tutkimus toteutettiin niin, ettei siitä aiheutunut merkittäviä haittoja tai riskejä tutkimuskohteelle tai siihen liittyvälle yhteisölle.

3 Pyörimisnopeuden mittaaminen anturilla

3.1 Yleistä

Pyörimisnopeutta voidaan mitata monella erilaisella menetelmällä, joista yleisin käytetty menetelmä on sähköinen anturi. Anturilla tarkoitetaan laitetta, joka muuntaa sähköisen, kemiallisen tai fyysisen suureen sähköiseksi suureksi, jota voidaan lukea oikeanlaisilla menetelmillä. (Automotive Handbook 2014.)

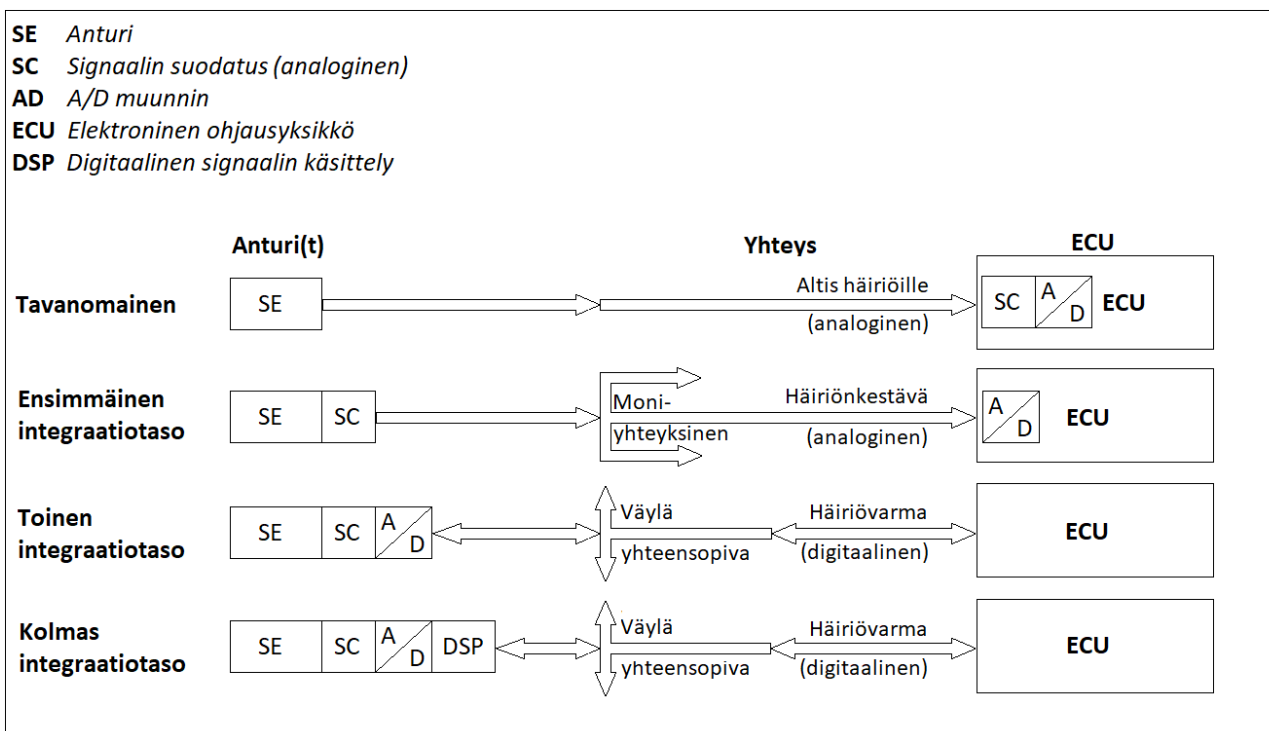
Pyörimisnopeutta mitattaessa mitattava suure on fyysinen liike eli esimerkiksi akselin pyöriminen. Pyörimisnopeusanturi mittaa aikaa, joka kuluu tiettyyn kulma-asennon muutokseen pyörimisliikkeen aikana. Toisin sanoen, pyörimisnopeusanturit tuottavat pyörimisliikkeestä sähköisiä pulsseja, joiden esiintymistäajuus ilmaisee kohteen pyörimisnopeuden. Pulssin synnyttää muutos mitattavassa kohteessa, jonka anturi tunnistaa. Muutos voi olla esimerkiksi muuttuva etäisyys anturin ja pyörivän kappaleen välillä, jonka voi toteuttaa esimerkiksi erilaisilla kappaleen pinnan muodoilla. Mitattavia kohteita voivat olla muun muassa koneiden akselien sekä kulkuneuvojen renkaiden pyörimisnopeudet. (Automotive Handbook 2014.)

Pyörimisnopeusantureille on olemassa useita erilaisia suorituskykyvaatimuksia, joita ovat muun muassa erittäin hitaan nopeuden tunnistuskyky, mitattavan kohteen ja anturin välinen suurin ilmaväli sekä värinän ja liian vaikutus tarkkuuteen (Automotive Handbook 2014). Erilaisten suorituskykyvaatimusten sekä käyttökohteiden vuoksi pyörimisnopeuden mittaamiseen soveltuvia anturityyppejä on useita erilaisia, minkä johdosta tässä työssä vertaillaan erilaisia antureita mittalaitteelle soveltuvimman tyyppin löytymiseksi.

3.2 Antureiden tuottama mittaustieto

Antureiden tuottama mittaustieto voidaan jakaa kärkeä jaksittain kahteen eri osaan; analogiseen sekä digitaaliseen signaaliin. Analoginen signaalimuoto on kaikista yksinkertaisin tuottaa ja se onkin perinteinen signaalimuoto vanhemmille sekä halvemmille antureille. Yksinkertaisuudesta huolimatta analogisen signaalimuodon haittapuolena on häiriöherkkyys sekä epätarkkuus, mikä tekee siitä epäkäytännöllisen nykyajan sovelluksissa, jotka vaativat korkeata tarkkuutta. (Automotive Handbook 2014.)

Tehokas tapa anturin tuottaman mittaussignaalin tarkkuuden parantamiseksi on digitaalinen signaalimuoto, jota on lähtökohtaisesti helpompi tulkita kuin analogista signaalia. Mittaussignaali voidaan muuntaa digitaaliseen muotoon jo itse anturissa integroimalla siihen elektroniikkaa, joka kykenee A/D muunnokseen, eli muuntamaan tiedon analogisesta digitaaliseen muotoon. Integroidun elektroniikan määrä antureissa on kasvanut alati ja nykyaikaiset anturit kykenevätkin A/D muunnoksen lisäksi vahvistamaan ja suodattamaan mittaussignaalia. Kehittyneimmät ”älykkäät anturit” jopa prosessoivat mittaussignaalia tarpeen mukaan ja kommunikoivat vastaanottavan järjestelmän kanssa. Anturit voidaan jakaa karkeasti seuraaviin luokkiin niiden ominaisuuksien perusteella. Alla oleva kuvio perustuu Boschin autojen käsikirjaan. (Automotive Handbook 2014.)



Kuvio 1. Antureiden integraatiotasot

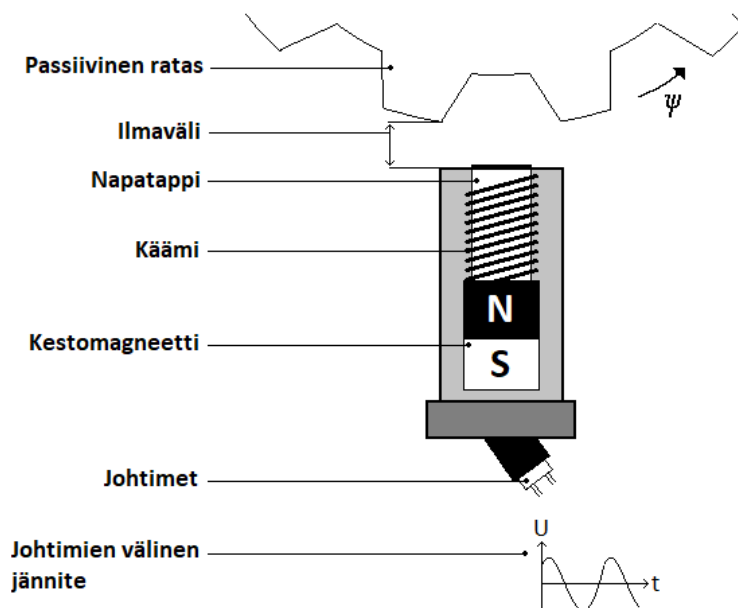
4 Anturityyppien vertailu ja valinta

4.1 Induktiiviset anturit

4.1.1 Perinteiset induktiiviset anturit

Induktiiviset anturit ovat olleet käytössä jo pitkään ja perinteisiä induktiivisia antureita kutsutaan *passiivisiksi* antureiksi, sillä ne eivät tarvitse ulkoista sähkölähdettä sähköisen mittaustiedon tuottamiseen. (Automotive Handbook 2014.)

Perinteinen induktiivinen anturi koostuu kestmagneetista, käämistä sekä sen sisällä olevasta navasta, joka muodostaa anturin mittauspään. Anturin tuottama mittaustieto perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Anturissa oleva kestmagneetti muodostaa käämin ja navan ympärille muuttumattoman magneettikentän. Metallin lähestyessä anturin mittauspäätä kestmagneetin tuottama magneettikenttä muuttuu, mikä indusoi anturissa olevaan käämiin jännitteen. Tämä jännite johdetaan johtimin anturista ulos ja sitä voidaan lukea mittalaittein. Indusoituneen jännitteen taajuus kertoo mitattavan kohteen pyörimisnopeuden. Alla oleva Boschin autojen käsikirjaan perustuva kuvio havainnollistaa perinteisen induktiivisen anturin toimintaperiaatteen. (Automotive Handbook 2014.)



Kuvio 2. Perinteisen induktiivisen anturin toimintaperiaate

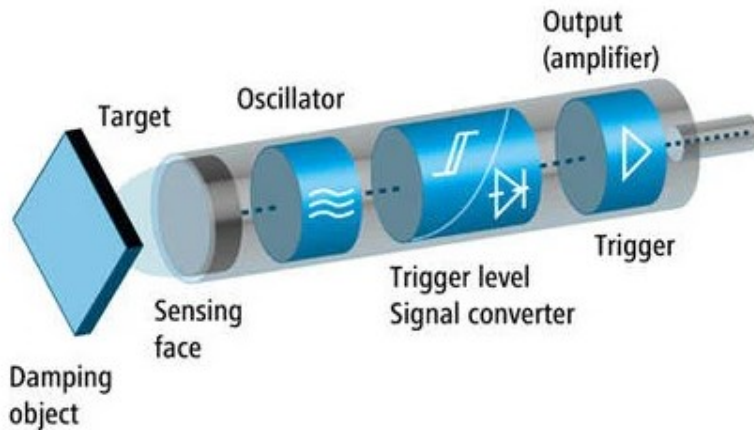
Perinteiset induktiiviset anturit ovat usein epäkäytännöllisiä pyörimisnopeuden mittaamiseen, sillä pyörimisliikkeen muutoksien lisäksi mitattavan kohteen etäisyyden muutokset vaikuttavat mitaustietoon. Lisäksi pyörimisnopeuden suuruus vaikuttaa mittaustiedon jännitteen amplitudiin; korkea pyörimisnopeus muodostaa korkean jännitteen ja matala pyörimisnopeus muodostaa matalan jännitteen. Tästä syystä perinteiset induktiiviset anturit eivät sovellu hyvin matalien pyörimisnopeuksien mittaamiseen tai mittaushetkeisiin, joissa pyörimisnopeus vaihtelee suuresti. (Automotive Handbook 2014.)

4.1.2 Induktiiviset lähestymiskytkimet

Induktiiviset anturit ovat kehittyneet ajan saatossa ja nykyaikaiset induktiiviset anturit sisältävätkin huomattavasti enemmän elektroniikkaa kuin perinteiset induktiiviset anturit. Nykyaikaisia induktiivisia antureita kutsutaan yleisesti induktiivisiksi lähestymiskytkimiksi. Niiden pääosat ovat tunnistusalue, oskillaattori, A/D-muunnin sekä ulostulo. (Functionality and technology of inductive sensors 2021.)

Induktiivisten lähestymiskytkimien toiminta perustuu oskillaattoriin, joka tuottaa korkeataajuisen magneettikentän, mikä ympäröi anturin mittapäässä olevaa tunnistusaluetta. Kun johtava metallipinta lähestyy tunnistusaluetta, sen läpi kulkeva magneettikenttä aiheuttaa metallissa pyörrevirtoja, jotka aiheuttavat muutoksen oskillaattorin tuottamaan magneettikenttään. Tämä muutos havaitaan jännite-erona oskillaattorin ulostulossa, jolloin anturin sisältämä A/D-muunnin vaihtaa tilaansa. A/D-muunnin muodostaa digitaalisen signaalin, jota vahvistetaan anturin ulostulossa olevalla vahvistimella halutun suuruiseksi.

Näiden antureiden sisältämä elektroniikka lisää induktiivisten antureiden käytettävyyttä, sillä niiden tuottaman digitaalisen mittaussignaalin amplitudi on riippumaton pyörimisnopeuden suuruudesta. Alla oleva kuvio havainnollistaa induktiivisen lähestymiskytkimen pääosat. (Functionality and technology of inductive sensors 2021.)



Kuvio 3. Induktiivisen lähestymiskytkimen pääosat

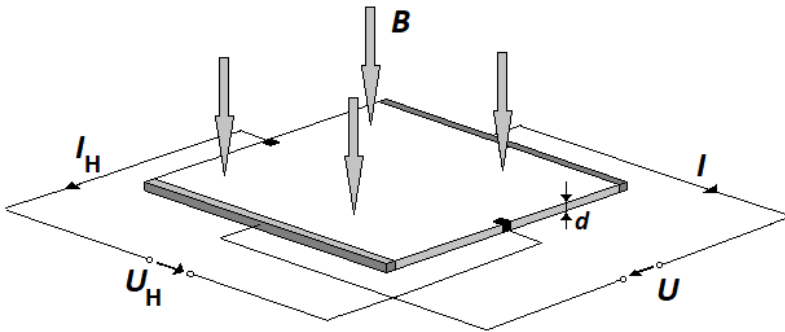
4.2 Hall-anturit

Hall-antureiden käyttötarkoitus on hyvin samankaltainen kuin induktiivisten antureiden ja niitä käytetäänkin hyvin yleisesti pyörimisnopeuden mittaamiseen. Ne ovat kuitenkin rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan erilaisia. (Automotive Handbook 2014.)

Induktion sijaan hall-anturin toiminta perustuu hall-ilmioon, joka ilmenee anturissa olevassa ohuessa puolijohtavassa sirussa. Siru on muodoltaan suorakulmiomainen ja hall-ilmio muodostuu, kun siru altistetaan kohtisuorasti ulkoiselle magneettikentälle B sekä siihen johdetaan jännite U ja virta I . Magneettikenttä aiheuttaa sirun puolijohtavassa materiaalissa olevien varauksenkuljettimien poikittaisen jakautumisen sirun molemmille reunoille. Jakauman ansiosta reunojen väliltä pystytään lukemaan jännite U_H , jonka suuruus noudattaa alla olevaa yhtälöä. Yhtälön d on puolijohtavan materiaalin paksuus ja R_H on hall-kerroin, joka vaikuttaa osaltaan merkittävästi sirun mittausherkkyyteen. (Automotive Handbook 2014.)

$$U_H = \frac{R_H * I * B}{d}$$

Boschin autojen käsikirjaan perustuva kuvio 4 havainnollistaa hall-ilmioon liittyviä suureita. (Automotive Handbook 2014.)



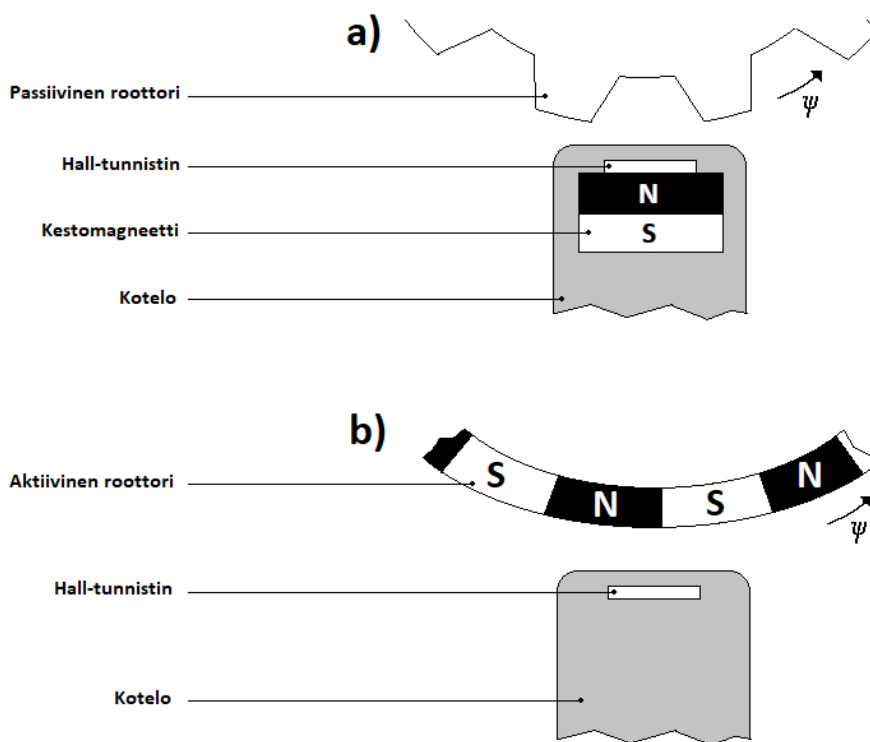
Kuvio 4. Hall-ilmio

Edeltävässä kuviossa näkyvä jännite U_H syötetään hall-anturissa olevaan erilliseen sähköpiiriin, joka yksinkertaisimmillaan voi olla Schmitt-liipaisimen tyyppinen kytkentä. Schmitt-liipaisimella tarkoitetaan elektronista komparaattoria, eli vertailijaa, joka vertaa kahden eri jännitteen tasoa toisiinsa. Jännitteen U_H ylittäessä tietyn rajan, eli toisin sanoen, kun anturiin kohdistuva magneettikenttä on tarpeeksi suuri, Schmitt-liipaisin muodostaa signaalin, joka vastaa digitaalista viestiä "1". Mikäli magneettikentän voimakkuus on alle vaaditun rajan, Schmitt-liipaisin muodostaa signaalin, joka vastaa digitaalista viestiä "0". (Automotive Handbook 2014.)

Yksinkertaiseen Schmitt-liipaisimeen perustuvan hall-anturin haittapuolena on sen herkkyyys mekaanisille tekijöille, kuten pietsosähköiselle ilmiölle. Pietsosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan ilmiötä, jossa kappaleen rakenteen mekaaninen jännitys aiheuttaa sen materiaalin sähköisen polarisoinnin. Ilmiö aiheuttaa ei-toivottuja muutoksia mittaustuloksiin lämpötilavaihtelujen sekä antureiden kuoren valmistuksen yhteydessä. Tämä ongelmakohta on ratkaistu käyttämällä hall-antureissa muun muassa "kiertävän virran" toimintoa, jossa puolijohtavan sirun läpi menevä virta ikään kuin kiertää sirulla kahdessa eri vaiheessa. Syötettyjen virtojen vaihe-erot tasoittavat anturin tuottamaa signaalia, jolloin muun muassa pietsosähköisen ilmiön aiheuttamat häiriöt eivät enää vaikuta merkittävästi mittaustuloksiin. (Automotive Handbook 2014.)

Muun muassa kiertävän virran menetelmän ansiosta hall-antureista on tullut varteenotettava mitausmenetelmä analogisiin anturisovelluksiin. Hall-anturit ovat kuitenkin parhaimmillaan sovelluksissa, joissa mittausetäisyydet, eli ilmvälit, ovat pieniä. (Automotive Handbook 2014.)

Hall-anturit voivat tunnistaa sekä ferromagneettisen metallin että ulkoisen magneettikentän, mutta tunnistaminen vaatii rakenteeltaan erilaisia hall-antureita. Ferromagneettisen metallin tunnistava hall-anturi muistuttaa rakenteeltaan induktiivista anturia, sillä sen sisällä on kestmagneetti. Metallin läheisyys aiheuttaa muutoksen kestmagneetin muodostamassa magneettikentässä, joka tunnistetaan hall-ilmion tuottaman jännitteen U_H muutoksena. Ulkoisen magneettikentän tunnistava hall-anturi ei sisällä kestmagneettia, vaan sen toiminta perustuu edellä mainittuun hall-ilmion tuottamaan jännitteeseen U_H . Boschin autojen käsikirjaan perustuva kuvio 5 havainnollistaa mainittujen hall-antureiden eroavaisuudet. (Automotive Handbook 2014.)



Kuvio 5. Hall-anturien toteutus passiivisella ja aktiivisella roottorilla

4.3 Optiset anturit

Optiset anturit ovat toimintaperiaatteeltaan hyvin erilaisia kuin induktiiviset anturit tai hall-anturit, sillä ne perustuvat magneettikentän vuon muutoksen sijaan valosähköiseen ilmiöön. Erilaisen toimintaperiaatteen vuoksi optiset anturit soveltuvat pyörimisnopeuden mittaamisen lisäksi myös moniin muihin käyttötarkoituksiin, joita voivat olla esimerkiksi kulunvalvonta, sekä muut sovellukset, joissa vaaditaan pitkiä tunnistusetaisyysia. (Meriläinen 2003.)

Optisien anturien toimintaperiaate pohjautuu kahteen pääosaan; valoa lähettävään lähettimeen ja sitä vastaanottavaan vastaanottimeen. Lähetin lähettää valonsäteen joko suoraan tai peilin kautta vastaanottimeen, jossa lähetetyn valon tilan muutos aistitaan anturin avulla. Ympäristön valaistusolosuhteiden vaikutusten vähentämiseksi lähetettävänä valona käytetään tavallisen valon sijaan infrapunavaloa, joka tuotetaan lähettimen valokennossa olevalla infrapuna-LEDillä. Myös moduloitua, eli vaihtelevaa, valoa käytetään useissa sovelluksissa, jolloin valonlähteenä toimii moduloitu LED. (Meriläinen 2003.)

Lähetin ja vastaanotin voivat sijaita joko samassa kotelossa tai erillisinä. Jälkimmäisessä menetelmässä lähetin lähettää valonsäteen yleensä suoraan vastaanottimeen, jolloin mitattava kohde katkaisee valonsäteen, mikä aiheuttaa tilanmuutoksen vastaanottimessa. (Meriläinen 2003.)

Peiliä hyödyntävässä versiossa valonsäde heijastetaan peilin kautta takaisin vastaanottimeen, jolloin lähetin ja vastaanotin voivat sijaita samassa kotelossa. Heijastavana pintana voidaan käyttää peilin lisäksi muita heijastavia pintoja, kuten valoa heijastavaa teippiä. Tämä on hyödyllistä monissa sovelluksissa, sillä teippi voidaan sijoittaa vaivatta erilaisiin mitattaviin kohteisiin. (Meriläinen 2003.)

4.4 Valintaperuste

Toimeksiantaja edellytti, ettei mitattavaan akseliin kiinnitetä mitään ylimääräistä ja mittaustiedon täytyy olla tarkka koko kierroslukualueen ajan. Lisäksi mitattavan akselin ja anturin välinen sallittu ilmaväli pitää olla tarpeeksi suuri, jotta mittalaitteen kiinnityksessä esiintyvät välilyökset eivät vaikuttaisi mittaukseen.

Edeltäviin kappaleisiin ja toimeksiantajan vaatimuksiin perustuen voidaan todeta, että ulkoiseen magneettikenttään perustuvat hall-anturit eivät sovellu käytettäväksi, sillä ne vaativat kestmagneetin kiinnittämisen mitattavaan akseliin. Suuren ilmavälin mahdollisuudesta huolimatta myöskään optiset anturit eivät sovellu käytettäväksi anturityypiksi, sillä ne vaativat heijastavan pinnan asettamisen mitattavaan akseliin.

Edeltävissä kappaleissa mainituista antureista tarkempaan vertailuun valittiin induktiiviset lähestymiskytkimet, sillä ne tunnistavat ferromagneettisen metallin sekä tuottavat luotettavan mittausignaalin läpi kierroslukualueen. Induktiivisten lähestymiskytkimien vertauskohteeksi valittiin sisäiseen kestmagneettiin perustuvat hall-anturit, sillä ne omaavat samat edellä mainitut ominaisuudet. Näistä kahdesta anturityypistä etsittiin kaikista soveltuvimmat mallit, jotka ovat ke-
rättyyn taustatietoon ja toimeksiantajan edustajan (Sokero 2021) kanssa käytyihin keskusteluihin perustuen Baumerin induktiivinen lähestymiskytkin IR12.P04F-11111236 sekä ZF Electronicsin hall-anturi GS100701. Alla olevan taulukon vertailutiedot saatiin antureiden teknisistä tuoteselosteista. (Induktive Näherungsschalter 2015, GS1005–GS1007 Sensors 2015.)

Taulukko 1. Antureiden vertailu

	Baumer induktiivinen lähestymiskytkin	ZF Electronics hall-anturi
Toimintajännite	5–36 VDC	5–24 VDC
Nimellisvirta	12 mA	3–6 mA
KytKentätaajuus	< 2 kHz	< 15 kHz
Tunnistusetäisyys	< 4 mm	< 1.5 mm
Ulostulopiirin virta	< 200 mA	< 20 mA

Taulukon arvoista voidaan päätellä, että ZF Electronicsin valmistama hall-anturi on monelta osin parempi vaihtoehto kuin Baumerin tarjoama induktiivinen anturi. ZF Electronicsin hall-anturin tunnistusetäisyys on kuitenkin yli kaksi kertaa pienempi kuin Baumerin induktiivisessa lähestymiskytkimessä.

Tunnistusetäisyys on ratkaisevassa asemassa mittalaitteen kannalta, minkä takia mittalaitteessa käytettäväksi anturiksi valittiin lopulta alla olevassa kuvassa näkyvä Baumerin induktiivinen lähestymiskytkin. Sen suurin tunnistusetäisyys on jopa 4 millimetriä, mikä edesauttaa laitteen luotettavaa toimintaa myös tärisevissä olosuhteissa sekä sallii pienet välykset laitteen kiinnityksessä. Lähestymiskytkimen laaja 5–36 voltin toimintajännitealue on myös eduksi mittalaitteen suunnittelussa, sillä se mahdollistaa anturin kytkemisen suoraan mikrokontrollereihin, joiden piirin toimintajännite on 5 voltia. Näitä mikrokontrollereita käsitellään seuraavissa kappaleissa. Alla kuva valitusta Baumerin lähestymiskytkimestä. (Induktive Näherungsschalter 2015.)



Kuvio 6. Baumer IR12.P04F-11111236

5 Mittaustiedon käsittely ja jakaminen

5.1 Yleistä

Valitun induktiivisen lähestymiskytkimen tuottama mittaussignaali täytyy vastaanottaa, käsitellä ja jakaa eteenpäin, jotta sen sisältämää mittaustietoa voidaan hyödyntää käytännössä. Edellä mainittu prosessi toteutetaan tyypillisesti ohjelmoitavalla logiikalla, joka voi olla esimerkiksi tietokone, mikrokontrolleri tai muu vastaava kokoonpano, joka kykenee käsittelemään mittaussignaalia ja muuntamaan sen helposti luettavaan muotoon.

Toimeksiantajan edustajan (Sokero 2021) kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella tähän työhön parhaiten soveltuvia logiikoita ovat yhden piirilevyn tietokoneet / mikrokontrollerit, sillä ne ovat perinteisiin tietokoneisiin verrattuna kompakteja sekä kuluttavat suhteellisen vähän virtaa. Täten esiteltäviksi logiikoiksi valittiin kaksi tuoteperhettä, jotka ovat peräisin kahdelta yleisesti tunnetulta laitevalmistajalta.

5.2 Arduino

Arduino on avoimeen lähdekoodiin perustuva yhden piirilevyn mikrokontrolleri, joka kehitettiin alun perin Italiassa sijaitsevassa Interaction Design Institute Ivreassa (IDII) vuonna 2005. Kehittäjien tarkoituksena oli luoda monipuolinen ja helposti lähestyttävä oppimisalusta elektroniikan opiskelijoille. Arduinon laaja soveltuvuus eri projekteihin sekä avoimeen lähdekoodiin perustuva tuotetietojen jakaminen nostivat Arduinon suosiota erityisesti harrastajien keskuudessa. Suosion johdosta Arduino mikrokontrollereista on muodostunut laaja tuoteperhe, jonka eri versiot soveltuvat monipuolisiin käyttötarpeisiin. (Maxwell 2016.)

Erilaisista ominaisuuksista huolimatta kaikkien Arduino mikrokontrollereiden peruseriaate on sama. Piirilevy sisältää mikroprosessorin, jota ohjelmoidaan käyttäen ohjelmistoa nimeltä Arduino IDE, joka on Arduinon kehittäjien erityisesti tähän tarkoitukseen luoma ohjelmisto. Mikroprosessorin lisäksi mikrokontrolleri sisältää analogiset tuloportit sekä digitaaliset tulo- ja lähtöportit, joita voidaan käyttää tiedon vastaanottamiseen sekä erilaisten lähtöjen ohjaamiseen mikroprosessorin syötetyn ohjelmakoodin perusteella. (Maxwell 2016.)

Fyysisten tulo- ja lähtöporttien lisäksi Arduinosta on luotu versioita, jotka kykenevät langattomaan tiedonsiirtoon. Näitä ovat muun muassa UNO Wi-Fi rev2, NANO 33 IOT sekä MKR Wi-Fi 1010, jotka sisältävät mikroprosessorin lisäksi itsenäisen u-bloxin valmistaman NINA-W102 Wi-Fi moduulin. (Maxwell 2016.)

Arduino mikrokontrollereiden etuina ovat kompakti koko sekä pieni virrankulutus. Kokoonsa ja hintaansa nähden niiden soveltuvuus erilaisiin käyttökohteisiin on ensiluokkaista. Fyysisten ominaisuuksien lisäksi mikrokontrollerin ohjelmointi Arduino IDEllä on johdonmukaista, sillä avoimen lähdekoodin ansiosta esimerkkejä sekä ohjeistusta ohjelmointiin on helposti saatavilla. (Maxwell 2016.)

5.2.1 Arduino UNO Wi-Fi rev2

Arduino tuoteperheestä valittiin toimeksiantajan edustajan (Sokero 2021) kanssa käytyjen keskusteluiden perusteella tähän työhön parhaiten soveltuva tuote yksityiskohtaisempaa tarkastelua varten. Valinta kohdistui Arduino UNO Wi-Fi rev2 malliin sen monipuolisuuden sekä sisäänrakennetun NINA-W102 Wi-Fi moduulin vuoksi (ks. kuvio 7). (Arduino UNO Wi-Fi rev2 2021.)

UNO Wi-Fi rev2 on UNO tuoteperheen malli, joka on kehitetty erityisesti oppimisalustaksi erilaisiin teknisiin projekteihin. Näitä projekteja voivat olla esimerkiksi erilaiset IoT (Internet of Things) laitteistojen kehittämiset, joissa laitteet kommunikoivat keskenään ja jakavat esimerkiksi mittaustietoa laitteelta toiselle. Laittevalmistaja mainostaakin UNO Wi-Fi rev2:en soveltuvuutta esimerkiksi anturitietojen vastaanottoon, käsittelyyn ja langattomaan jakamiseen Wi-Fi verkon tai Bluetooth Low Energyn (BLE) kautta. (Arduino UNO Wi-Fi rev2 2021.)

UNO Wi-Fi rev2:n langattoman yhteyksien ydin on u-bloxin valmistama NINA-W102 Wi-Fi moduuli, joka mahdollistaa 2.4GHz taajuisen Wi-Fi verkon luomisen tai sellaiseen yhdistämisen. Sen lisäksi moduuli tukee Bluetooth 4.2:ta ja siihen sisältyvää Bluetooth Low Energyä (BLE), joissa laite voi toimia sekä ”oheislaitteena” että ”keskuslaitteena”. Wi-Fi moduulin suomien mahdollisuuksien ansiosta Wi-Fi rev2 soveltuu hyvin langattoman mittalaitteen vastaanottimeksi sekä lähettimeksi. (NINA-W10 series 2019.) Langatonta yhteyttä käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.5. Langatton yhteys.



Kuvio 7. Arduino UNO Wi-Fi rev2

5.3 Raspberry Pi

Raspberry Pi, puhekielessä “raspi”, on Iso-Britannialaisen Raspberry Pi Foundationin vuonna 2012 julkaisema yhden piirilevyn tietokone. Raspi on saavuttanut suuren suosion vuosien saatossa, minkä johdosta alkuperäistä versiota on päivitetty useaan otteeseen ja täten erilaiset raspit ovat muodostaneet oman tuoteperheen. (Raspberry Pi 4 Computer 2021.)

Rasprien käyttökohteet ovat hyvin samankaltaisia kuin Arduinojen, mutta ne kykenevät monipuolisempiin tehtäviin suuremman prosessointitehon sekä monipuolisempien liitännöiden ansiosta. Raspit ovat muutoinkin monipuolisempia, sillä niille on kehitetty oma käyttöjärjestelmä Raspberry Pi OS, vanhalta nimeltään Raspbian, jonka avulla raspilla voidaan käyttää ja siihen voidaan asentaa erinäisiä sovelluksia. Raspiin voidaan asentaa muukin käyttöjärjestelmä, mutta edellä mainittu on kaikista suosituin sekä valmistajan suosittelema. (Raspberry Pi 4 Computer 2021.)

Raspin käyttöä varten käyttöjärjestelmä ladataan erilliselle MicroSD- muistikortille, joka toimii samalla raspin tallennustilana. Muistikortin lisäksi raspeissa on valmiina RAM-muisti, jota on viimeisimmässä mallissa jopa 8GB. Suuren muistikapasiteetin lisäksi raspeissa on muun muassa USB-, HDMI-, Ethernet-lähtöjä sekä sisäänrakennetut näytön-, sekä äänenohjaimet, jolloin raspilla voi korvata tavallisen tietokoneen. Tästä kaikesta huolimatta rasprien suorituskyky ei kuitenkaan yllä

nykyisten tietokoneiden tasolle, joten ne soveltuvat tällä saralla lähinnä kevyisiin käyttötarpeisiin, kuten selainkäyttöön. (Raspberry Pi 4 Computer 2021.)

Raspit sisältävät 40 logiikka I/O:ta, eli lähtöä ja tuloa, joita voidaan ohjelmoida asentamalla käyttöjärjestelmään erillinen sovellus ohjelmointia varten. Suosituin ohjelma on Python, joka muistuttaa Arduino IDEä. Ohjelmoitavat logiikkaportit yhdistettynä raspien suureen prosessointitehoon tekevät niistä hyvin soveltuvia moniin eri käyttökohteisiin, joita voivat olla esimerkiksi usean eri anturitiedon luenta, moottorinohjaus, kodin automaatio sekä muut vastaavat sovellukset. (Raspberry Pi 4 Computer 2021.)

5.3.1 Raspberry PI 4 Model B

Raspin viimeisin versio on vuonna 2019 julkaistu Raspberry Pi 4 Model B. Sen suorituskykyä on parannettu edeltäviin versioihin nähden reippaasti ja valmistaja lupaakin sen yltävän samalle tasolle vanhojen 32-bittisten tietokoneiden kanssa. PI 4 Model B on muutoinkin verrattavissa tietokoneeseen, sillä se sisältää nykyaikaisten tietokoneiden tapaan 64-bittisen prosessorin, sisäänrakennetut näytön- ja äänenohjaimet sekä parhaimmillaan 8GB RAM-muistia. Fyysisenä tallennustilana toimii edeltävässä kappaleessa mainittu erillinen MicroSD-kortti. (Raspberry Pi 4 Computer 2021.)

Monipuolisten komponenttien lisäksi PI 4 Model B sisältää runsaasti fyysisiä liitännöitä, joista olennaisimmat ovat USB-3.0/-2.0/-C-portit, 2x micro-HDMI- sekä 1x HDMI-portit, Gigabit-internet portti sekä 4-napainen 3,5 mm jakkiliitin video- ja äänentoistolle. Näiden lisäksi piirilevyiltä löytyy 40 ohjelmoitavaa digitaalista GPIO-porttia. Fyysisten liitännöiden lisäksi PI 4 Model B tukee useita langattoman tiedonsiirron muotoja. Yhteensopivuus taataan kaksikaistaiselle 2.4GHz/5.0GHz IEEE 802.11ac WLANille sekä Bluetooth 5.0:lle ja Bluetooth Low Energyille (BLE). (Raspberry Pi 4 Computer 2021.)

Edeltäviin tietoihin vedoten voidaan todeta, että PI 4 Model B on yhden piirilevyn tietokone, joka pienen kokonsa ja monipuolisuutensa ansiosta soveltuu moniin eri sovelluksiin. Alla oleva kuva havainnollistaa Pi 4 Model B:en yläpuolelta katsottuna. (Raspberry Pi 4 Computer 2021.)



Kuvio 8. Raspberry Pi 4 Model B

5.4 Logiikan valintaperuste

Raspberry Pi 4 Model B on ylivoimainen prosessointitehon, liitännöiden sekä ohjelmitavuuden saralla verrattuna Arduino UNO Wi-Fi rev2:een. Raspissa on myös monipuolisemmat langattomat yhteydet, sillä Pi 4 Model B kykenee toimimaan myös 5.0GHz taajuudella.

Raspin ominaisuudet ovat kuitenkin jopa yliampuvat kierrosnopeutta lukevan mittalaitteen tarpeisiin nähden. Lisäksi suurempi virrankulutus, isompi fyysinen koko sekä hitaampi käyttöjärjestelmän käynnistyminen eivät ole haluttuja ominaisuuksia kannettavalle mittalaitteelle, jolta vaaditaan kompaktia kokoa, nopeaa käynnistymistä sekä pitkää akunkestoa.

Näistä syistä mittalaitteen logiikaksi valikoitui Arduino UNO Wi-Fi rev2. Perusteena valinnalle olivat toimeksiantajan vaatimuksiin perustuen erityisesti UNO Wi-Fi rev2:en kompakti koko, pieni virrankulutus sekä hyvin nopea käynnistyminen. Lisäksi UNO Wi-Fi rev2:een integroitu jännitemuunnin on eduksi, sillä se sallii laajemman 5-12V syöttöjännitteen käytön verrattuna raspin kiinteään 5 voltin jännitteeseen. Tämä yhdessä pienen virrankulutuksen kanssa tuo lisää vapauksia muun muassa virtalähteen valintaan sekä merkitsee pidempää akunkestoa.

Mittalaitteen vaatima prosessointiteho on verrattain pieni, joten myöskään Arduinon pienempi suorituskkyky ei ole haitallinen tekijä suunnittelun kannalta. Lisäksi Arduino IDE todettiin helposti lähestyttäväksi ohjelmointiympäristöksi, jonka käyttöä Arduinon avoin lähdekoodi ja siitä johtuva suuri tiedonlähteiden määrä helpottavat entisestään. Alla näkyvässä taulukossa näkyvät tämän työn kannalta kaikista olennaisimmat vertailtavat ominaisuudet. Taulukon tiedot perustuvat Raspberryn tekniseen tiedotteeseen (Raspberry Pi 4 Computer 2021), tekniseen artikkeliin Raspberry Pi 4:stä (Pounder 2020) sekä Arduino UNO Wi-Fi rev2:en tuoteselosteeseen (Arduino UNO Wi-Fi rev2 2021).

Taulukko 2. Logiikkojen vertailu

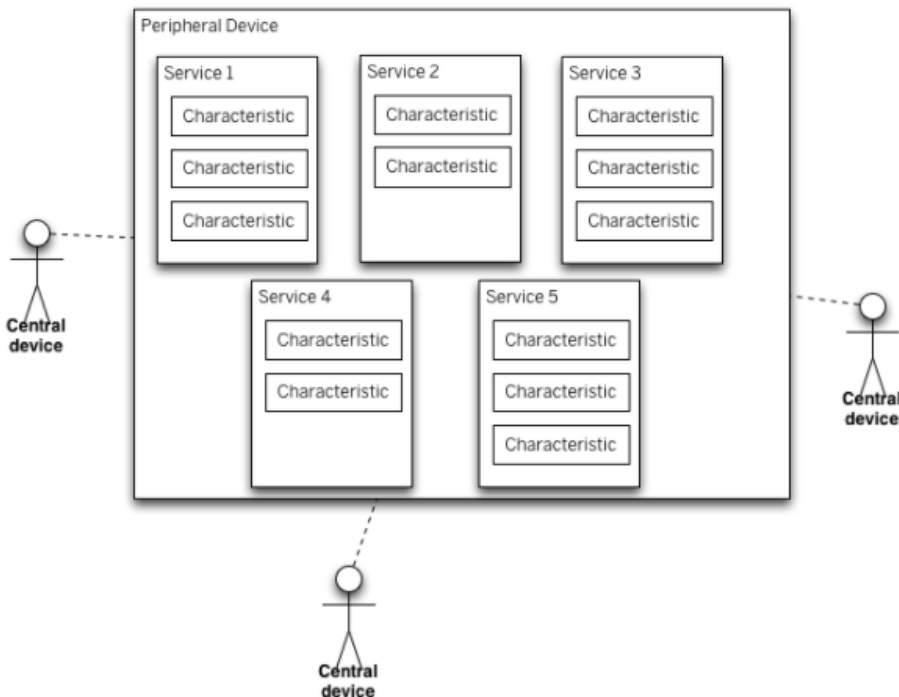
	Arduino UNO Wi-Fi rev2	Raspberry PI 4 Model B
Ohjelmointiympäristö	Arduino IDE	muun muassa Python
Mikrokontrolleri	ATmega4809, AVR 16Mhz	Broadcom BCM2711, Cortex-A72 1.5GHz
Muisti	6kb SRAM, 48 kb FLASH	max. 8Gb SDRAM MicroSD muistikorttipaikka
Analogiset I/O	6 / -	- / -
Digitaaliset I/O	14	20
I/O max. virta	5V / 20mA 3.3V / 50mA	5V / ? 3.3V / 16mA
Langaton yhteys	2.4GHz WLAN, Bluetooth 4.2, BLE	2.4GHz / 5.0GHz WLAN, Bluetooth 5.0, BLE
Tarvittava virtalähde	5-12V DC	5V / min.2.5A DC
Ulkoiset mitat	68.6mm x 53.4mm	85mm x 56mm

5.5 Langaton yhteys

Mittalaitteeseen valittu logiikka, Arduino UNO Wi-Fi rev2 tukee 2.4GHz taajuuksista Wi-Fi yhteyttä, Bluetooth 4.2:ta sekä Bluetooth Low Energyä (BLE). Mittalaitteen logiikka mahdollistaa siis langattoman yhteyden tyypiksi kolme erilaista vaihtoehtoa. (NINA-W10 series 2019.) Langattoman yhteyden tyypiksi valittiin Bluetooth Low Energy, sillä valittu logiikka tuki tätä yksinkertaista yhteyden muotoa jo valmiiksi, jolloin suunnittelutyö pysyi johdonmukaisena. Lisäksi Bluetooth Low Energyn virrankulutus on hyvin alhainen, mikä parantaa mittalaitteen akunkestoa. Täten tarkempaan käsittelyyn valittiin Bluetooth Low Energy, jatkossa *"BLE"*.

BLE on Bluetooth 4.0 kokonaisuuteen kuuluva pelkistetty tiedonsiirtomuoto, jota on optimoitu vähän energiaa vaativaksi sekä soveltumaan parhaiten sovelluksiin, joissa langattomasti siirrettävän tiedon määrä on alhainen. BLE perustuu laitteiden erilaisiin rooleihin, joita on neljä; lähettäjä, vastaanottaja, oheislaitte sekä keskuslaitte. Lähettäjän ja vastaanottajan tehtävät ovat selvät; ne vain joko vastaanottavat tai lähettävät tietoa. Oheislaitte ja keskuslaitte taas kommunikoivat keskenään, jolloin molemmat laitteet sekä lähettävät, että vastaanottavat tietoa. (Nikupetteri 2020.)

Oheislaitteen ja keskuslaitteen välisessä kommunikaatiossa tietoa jakava osapuoli on oheislaitte, joka toimii ikään kuin ilmoitustauluna, jonka sisältävän informaation keskuslaitteet pystyvät lukemaan. Oheislaitteen jakama tieto jaotellaan ilmoitustaululle erinäisinä *"Palveluina"* / *"Services"*, jotka jaetaan edelleen *"Ominaisuuksiksi"* / *"Characteristics"*. Keskuslaitte toimii kuuntelijana, joka muodostaa yhteyden oheislaitteeseen sekä lukee haluamansa *"palvelun"* sisältämät *"ominaisuudet"*. Alla oleva kuvio havainnollistaa BLE laitteiden rooleja. (ArduinoBLE library 2019.)



Kuvio 9. BLE laitteiden roolit

Yhteyden muodostus oheislaitteen ja keskuslaitteen välillä tapahtuu seuraavasti; oheislaite aloittaa mainostustilan, jolloin se lähettää mainostusviestejä sisältämistään tiedoista ja palveluista alueella oleville keskuslaitteille. Keskuslaite etsii tiettyä palvelua ja se yhdistää oheislaitteeseen, kun kyseinen palvelu on tarjolla mainostusviestissä. (Nikupetteri 2020.) Oheislaite määrittelee jakamiensa palveluiden ominaisuuksien oikeudet ja mikäli oheislaitteen mainostamalle palvelulle ja ominaisuudelle on annettu luku- ja kirjoitusoikeudet, myös keskuslaite kykenee lukemaan ja muokkaamaan oheislaitteen ominaisuuden sisältämää tietoa (ArduinoBLE library 2019).

Yhteyden muodostuksen jälkeen keskuslaite alkaa lukemaan oheislaitteen ominaisuutta, jonne oheislaite päivittää aina uuden tiedon arvon. Tiedon lukemiseen on olemassa omat asetuksensa, jotka määrittävät kuinka usein päivittynyt tiedon arvo kirjataan ominaisuuteen ja kuinka usein tiedon uusi arvo luetaan. BLEn ominaisuudet sisältävät asetuksen nimeltä *“Notify” / “Ilmoita”*. Ilmoitusasetuksen ollessa päällä keskuslaitteelle ilmoitetaan tiedon päivittämisestä joka kerta kun oheislaitteen ominaisuuteen on kirjattu tiedon uusi arvo. Tällöin keskuslaitteen ei tarvitse erikseen lukea uutta arvoa oheislaitteelta, vaan uusi arvo päivittyy automaattisesti myös keskuslaitteelle.

Tästä asetuksesta on myös toinen versio nimeltä *"Indicate"*, jolloin uudesta tiedon arvosta ilmoitetaan keskuslaitteelle, mutta keskuslaitteen täytyy erikseen lukea päivittynyt arvo. (ArduinoBLE library 2019.)

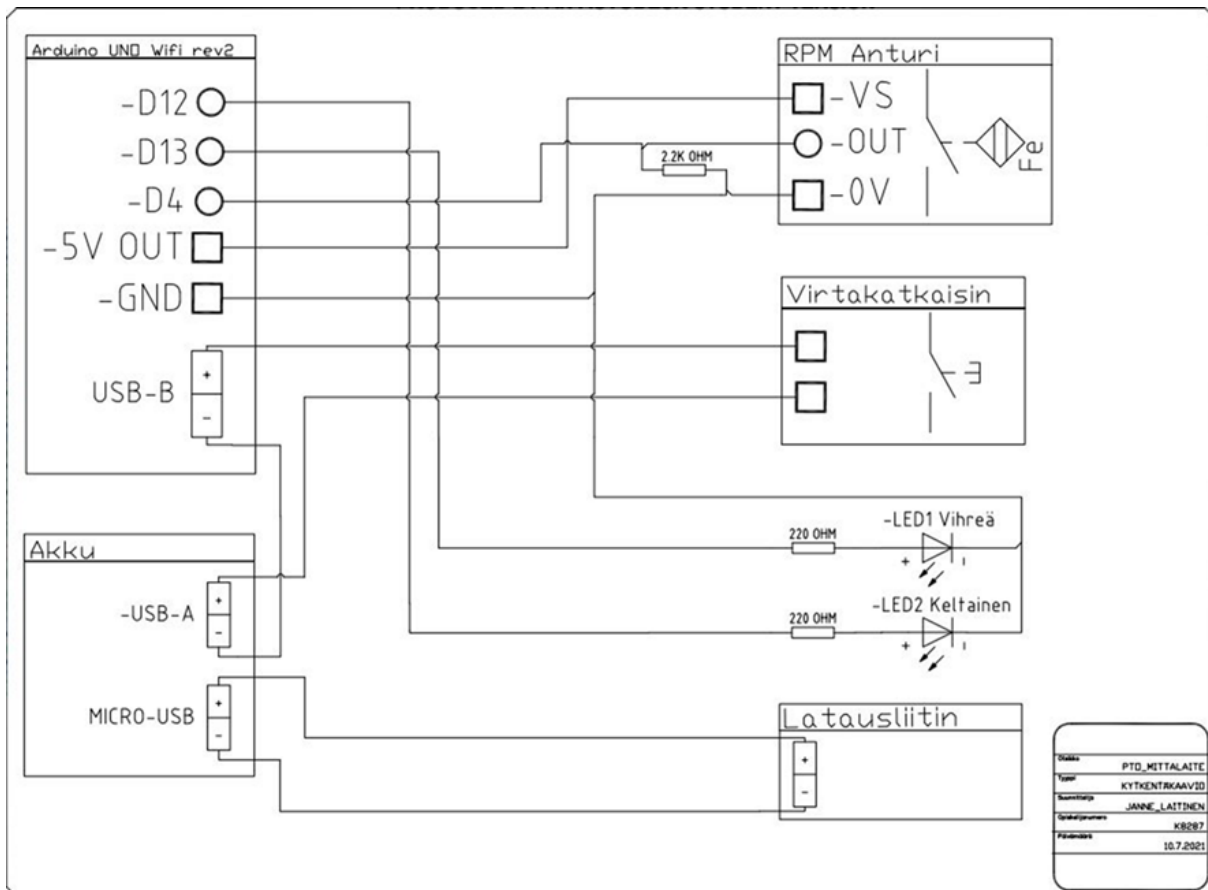
Jokainen palvelu ja ominaisuus yksilöidään Bluetooth standardin mukaisesti omalla 16-bit UUID:llä, joka on lyhenne sanasta Universally Unique Identifier. UUID kertoo minkälaista informaatiota palvelu tai ominaisuus sisältää. Esimerkiksi BLE palvelun koodi *"0x27A8"* merkitsee kulmanopeutta ja palvelun ominaisuuden koodi *"2AE8"* merkitsee kerrointa. Standardisointi helpottaa erilaisten Bluetooth laitteiden yksilöintiä ja varmistaa langattomien laitteiden sekä niiden tuottamien palveluiden yhteensopivuuden. (16-bit UUID Numbers Document 2021.)

6 Mittalaitteen toteutus

Mittalaitteen toteutus aloitettiin tarvittavan taustatiedon hankkimisen ja käytettävien komponenttien valinnan jälkeen. Toteutus koostuu kolmesta pääosiesta, jotka ovat ”sähköpiirin suunnittelu”, ”ohjelmoinnin toteutus”, sekä ”rungon toteutus”. Toteutus aloitettiin sähköpiirin suunnittelulla, sillä se sisältää merkittävän osuuden koko laitteen toiminnasta sekä vaikuttaa ohjelmoinnin sekä rungon suunnitteluun.

6.1 Sähköpiirin suunnittelu

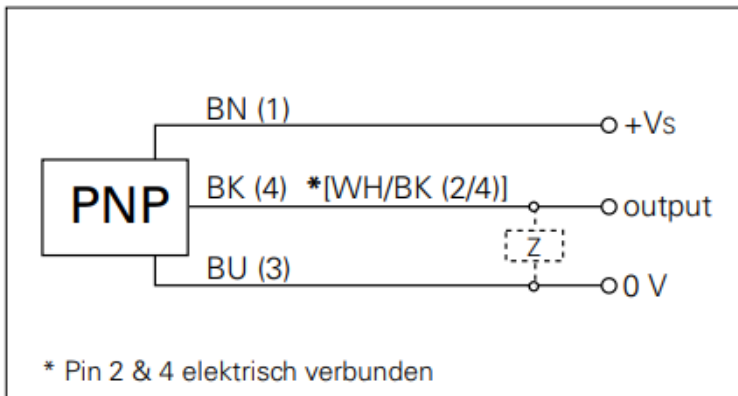
Kuten osioissa 5 ja 4 todettiin, sähköpiirin pääkomponentteina toimivat Arduino UNO Wi-Fi rev2, viitataan jatkossa nimellä ”Arduino”, sekä Baumer IR12.P04F-1111236, viitataan jatkossa nimellä ”anturi”. Mittalaitteen oli toimittava langattomasti, joten näiden lisäksi tarvittiin kolmas pääkomponentti, joka on virtalähde. Alla oleva kuvio esittää mittalaitteen kytkentäkaavion.



Kuvio 10. Mittalaitteen kytkentäkaavio

6.1.1 Anturin kytkentä

Anturin kytkentäkaavio on esitetty alla. Kyseisen anturin kytkentä perustuu kolmeen napaan, jotka ovat syöttöjännite $+V_s$, ulostulo *output* sekä nollapotentialiaali $0V$. Baumerin teknisessä tiedotteessa suositellaan alavetovastuksen Z käyttöä napojen *output* ja $0V$ välillä, jotta ulostulon jännite ei jäisi ”kellumaan”. (Induktive Näherungsschalter 2015.)



Kuvio 11. IR12.P04F-11111236 kytkentäkaavio

Baumerin teknisessä tiedotteessa ilmoitettiin napojen *output* ja $0V$ läpikulkevan virran ylärajaksi 200mA. Tämän perusteella laskettiin vastuksen Z pienin sallittu vastusarvo 5 voltin käyttöjännitteellä, joka saatiin seuraavalla kaavalla (Valtanen 2016);

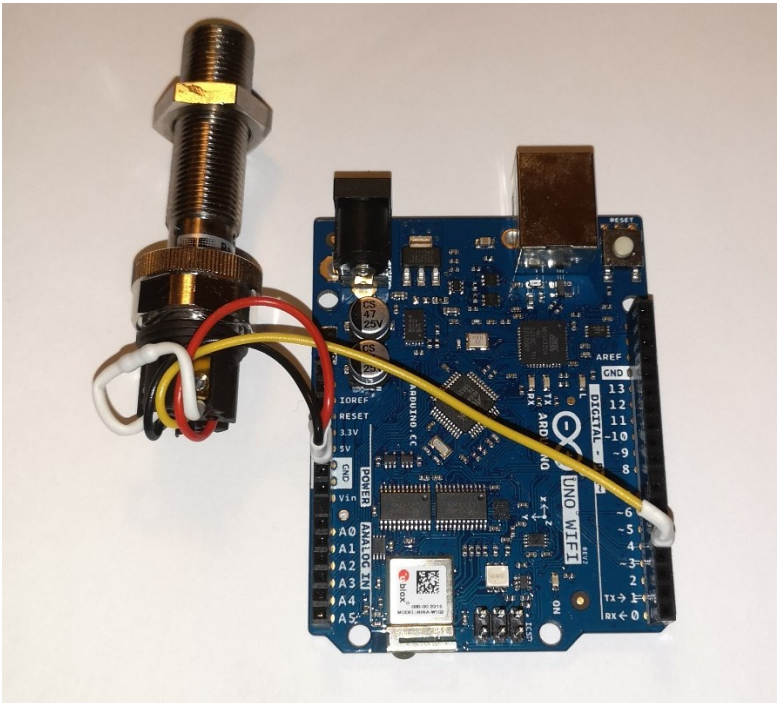
$$Z_{Rmin} = \frac{U}{I} = \frac{5V}{0.2A} = 25\Omega$$

Laskun tuloksen perusteella alavetovastuksen vastusarvoksi valittiin $Z = 2.2k\Omega$. Minimi vastusarvoon nähden suurella vastusarvolla ulostulopiiriin virraksi saadaan samalla kaavalla;

$$I_{output} = \frac{U}{Z} = \frac{5V}{2.2k\Omega} = 2.3mA$$

Mikä riittänee vetämään *output* kanavan nollapotentialiaaliin riittävän nopeasti. Alavetovastus on suojattu valkoisella kutistesukalla (ks. kuvio 12).

Alasvetovastuksen kytkennän jälkeen anturi kytkettiin Arduinoon kiinni. Arduino pystyy syöttämään sekä 3,3 voltin että 5,0 voltin jännitettä. Anturin syöttöjännitealue on 5 ... 36 voltia, minkä perusteella anturin $+Vs$ napa kytkettiin Arduinon $5V_{out}$ napaan. Samaa periaatetta käyttäen anturin $0V$ napa kytkettiin Arduinon GND napaan. Viimeisempänä anturin $output$ napa kytkettiin Arduinon digitaaliseen I/O pinniin numero 4. Alla oleva kuva esittää alasvetovastuksen Z sekä vaadittujen napojen kytkennät.



Kuvio 12. Mittalaitteen anturin kytkentä Arduinoon

6.1.2 LEDien kytkentä

Käytettävyyden lisäämiseksi mittalaitteeseen asennettiin kaksi LEDiä osoittamaan mittalaitteen toimintatiloja. Vihreä LED osoittaa laitteen virran olevan päällä (Oheislaitteen mainostustila) ja keltainen LED ilmaisee BLE yhteyden olevan aktiivinen (Oheislaitteen lähetystila).

LEDien läpi kulkevan virran rajoittamiseksi LEDeille mitoitettiin etuvastukset. Mitoitusvirtana LEDeille käytettiin $I_{LED_TAVOITE} = 15\text{mA}$. Vihreiden ja keltaisten LEDien kynnyksjännitteiksi oletettiin 2,1 voltia, jolloin 5,0 voltin syöttöjännitteellä etuvastuksen navoilla vaikuttaa $U_R = 5,0\text{V} - 2,1\text{V} = 2,9$

volttia. (Huhtama n.d.) Näiden tietojen perusteella etuvastuksen tavoitearvo saadaan seuraavalla kaavalla (Valtanen 2016);

$$R_{ETU_TAVOITE} = \frac{U_R}{I_{LED_TAVOITE}} = \frac{2,9V}{15mA} = 193\Omega$$

Tavoitearvoa lähin saatavilla olevan vastuksen arvo oli $R_{ETU_TODELLINEN} = 220\Omega$, jolloin LEDien todelliseksi virraksi saadaan:

$$I_{LED_TODELLINEN} = \frac{U_R}{R_{ETU_TODELLINEN}} = \frac{2,9V}{220\Omega} = 13,2mA$$

Laskettu todellinen virta on lähellä tavoitearvoa, joten suunnittelusta voidaan edetä käytäntöön (Huhtama n.d.). Alla oleva kuva esittää LEDien sekä etuvastuksien kytkennän.



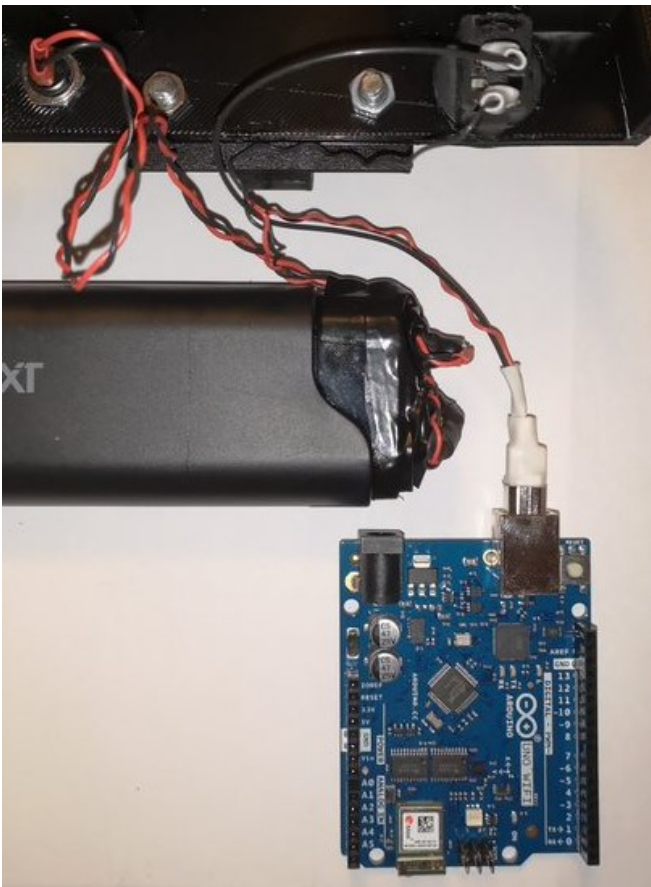
Kuvio 13. Mittalaitteen LEDien ja mitoitettujen etuvastuksien kytkentä

6.1.3 Virtalähde ja lataus

Jotta prototyypin toteutus pysyisi mahdollisimman yksinkertaisena, virtalähteeksi valittiin tavallinen 5 voltin varavirtalähde. Malliksi valikoitui toimeksiantajan suosittama 3SIXT Jetpak LED 4000mAh- varavirtalähde, viitataan jatkossa nimellä ”akku”, joka on kapasiteettiinsa nähden hyvin

kompakti varavirtalähde. Näin ollen mittalaitteen akun kapasiteetiksi määrytyi 4000mAh, mikä oli toimeksiantajan edustajan mukaan riittävä (Sokero 2021).

Akku yhdistettiin Arduinoon virtakytkimellä, jotta mittalaitteen päälle kytkentä olisi yksinkertaista. Akun USB-A portti liitettiin Arduinon USB-B porttiin, jolloin Arduinon sisäinen jännitemuunnin kykenee tasoittamaan akun mahdollisia jännitevaihteluita. Latausta varten akun Micro-USB portti yhdistettiin kaksinapaiseen pyöreään 5,5 mm liittimeen, joka on yksinkertainen ja mekaanisesti kestävä ratkaisu akun lataamiseen. Kytkentöjen tekemisessä käytettiin koottavia USB-liittimiä, jotka mahdollistivat turvallisten liitöntöjen tekemisen. Alla oleva kuva esittää akun, 5,5 mm liittimen, virtakytkimen sekä Arduinon väliset kytkennät.



Kuvio 14. Mittalaitteen akun ja virtakytkimen kytkentä

Edellä mainittujen sähköisten kytkentöjen kokonaisuus ja kiinnitys lopullisen mittalaitteen runkoon on nähtävillä liitteessä numero 8.

6.2 Ohjelman toteutus

Mittalaitteen ohjelma toteutettiin Arduino IDEllä. Ohjelma pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisena, jotta toimeksiantajan on helppo ymmärtää sen toimintaperiaate. Ohjelmoinnin toteutuksessa hyödynnettiin Arduinon virallisia ohjeita (ArduinoBLE library 2019), kirjallisuutta (Maxwell 2016), Bluetooth standardia (16-bit UUID Numbers Document 2021) sekä Arduino IDE ohjelmiston sisältämiä ohjeita sekä esimerkkejä.

6.2.1 Käytetyt kirjastot ja muuttujat

Mittalaitteen ohjelmakoodi alkaa BLE kirjaston sisällyttämällä sekä BLE palvelun ja ominaisuuden määrittelyllä. Palveluksi asetettiin *nopeustieto*, jonka UUID on "27A8" ja sen ominaisuudeksi asetettiin *kerroin*, jonka UUID on "2AE8". Ominaisuudelle annettiin lukuoikeudet sekä ilmoitusasetus asetettiin päälle. Tämän jälkeen määriteltiin ohjelmakoodin muuttujat, jotka on esitelty alla olevassa kuvassa.

```
#include <ArduinoBLE.h> // Kirjasto bluetooth kommunikointiin
BLEService Angular_Velocity("27A8"); // Nopeustiedon palvelu
BLEUnsignedCharCharacteristic Coefficient("2AE8", BLERead | BLENotify);

float REV = 0; // Pulssien määrä
int PPS_VALUE; // Pulssien määrä sekunnissa
int PREVIOUS = 0;
int TIME;
long previousMillis = 0;
int led1 = 13; // Päälläolon ilmaiseva LED
int led2 = 12; // Yhteyden muodostuksen ilmaiseva LED

void INTERRUPT(){ // Pulssitiedon kirjaaminen float -muuttujaan
  REV++;
}
```

Kuvio 15. Mittalaitteen ohjelman kirjastot ja muuttujat

6.2.2 Ohjelman ja mainostustilan määrittely

Muuttujien määrittelyn jälkeen määriteltiin itse ohjelma. Arduino siirtyy automaattisesti setup-osioon, jossa LEDit määriteltiin ulostuloiksi, jolloin Arduino tietää niiden olevan kuormana. Tämän jälkeen asetettiin baudinopeus, joka on tyypillisesti 9600. Anturin tuottama mittaussignaali syöte-

tään I/O pinniin numero neljä, minkä johdosta sille määriteltiin asetukset, joiden perusteella Arduino laskee pinniin tulevan mittaussignaalin nousevat reunat eli muutoksen tilasta nolla tilaan yksi.

Tämän jälkeen määriteltiin BLE:n vaatimat asetukset. While (!Serial) käsky resetoi ohjelman toiston sarjayhteyden muodostuessa, jolloin ohjelmakoodin toimintaa voidaan tarkastella alusta alkaen. Tämän jälkeen Bluetooth-jako aloitetaan. Oheislaitteen, eli mittalaitteen mainostustilalle asetettiin nimi, mainostettava palvelu ja ominaisuus sekä käsketään aloittamaan BLE mainostustila. Mikäli laite on kytketty USB-kaapelilla Arduino IDEen, niin IDEen lähetetään ilmoitus mainostustilan alkamisesta; *"Bluetooth laite valmiustilassa, odotetaan yhteyksiä..."*.

```
void setup() {
  pinMode (led1, OUTPUT); // Asetetaan ledit ulostuloiksi
  pinMode (led2, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);    // Baudi-nopeuden asettaminen
  attachInterrupt (4, INTERRUPT, RISING); // Anturin tuottaman signaalin
  //nousevat reunat mitataan pinnistä 4
  while (!Serial); // Resetoi ohjelman sarjayhteyden muodostuessa
  BLE.begin(); // Bluetooth-jako aloitetaan

  BLE.setLocalName("PTO_MITTALAITTE"); // Asetetaan äärlaitteelle nimi
  BLE.setAdvertisedService(Angular_Velocity); // Asetetaan palvelu
  Angular_Velocity.addCharacteristic(Coefficient); // Asetetaan palvelulle ominaisuus
  BLE.addService(Angular_Velocity); // Lisätään palvelu

  BLE.advertise(); // Tiedotetaan bluetooth palvelusta
  Serial.println("Bluetooth laite valmiustilassa, odotetaan yhteyksiä...");
}
```

Kuvio 16. Mittalaitteen ohjelman ja mainostustilan määrittely

6.2.3 Ohjelman silmukan määrittely

Mainostustilan määrittelyn jälkeen määriteltiin ohjelmakoodin toistettava silmukka. Se alkaa LED1:en sytyttämisellä, mikä osoittaa mittalaitteen olevan päällä. Tämän jälkeen määritellään haluttu vastaanotin, jonka halutaan yhdistävän mittalaitteeseen. Mikäli vastaanotin on yhdistänyt mittalaitteeseen, niin LED2 syttyy osoittaakseen BLE yhteyden olevan aktiivinen. Muutoin LED2 on sammuksissa.

Tämän jälkeen määritellään aikaväli, johon pinniin 4 tulleiden pulssien määrää verrataan. Lähetettäväksi mittaustiedon muodoksi päädyttiin asettamaan pulssia per sekunti, sillä testausten yhteydessä huomattiin, että korkeampia numeroarvoja kuin 255 ei pystytä lähettämään, mikä teki muodon pulssia per minuutti hyvin rajoittuneeksi. Tämä johtuu siitä, että Arduinon lähettämä langaton *unsigned integer*- tietomuoto on 8-bittistä. 8-bit mahdollistaa $2^8-1 = 255$ numeroarvot, eli kaiken väliltä 0–225.

Sekunnin aikana tulleiden pulssien määrä kirjataan *unsigned integer*- muuttujaan PPS_VALUE ja samalla laskenta nollataan. Samanaikaisesti mittaustieto jaetaan Arduino IDEen sekä mittaustiedon uusi arvo kirjoitetaan BLEn kautta langattomasti jaettavaan ominaisuuteen ”kerroin”. Setup-osion määrittelyn jälkeen ohjelma alkaa automaattisesti toistamaan tätä loop- silmukkaa ja päivittää mittaustiedon sekunnin välein.

```
void loop() {
  digitalWrite (led1, HIGH); // Sytytetään led1
  BLEDevice central = BLE.central(); // Määritellään bluetooth vastaanotin

  if (central.connected()){ // Jos vastaanotin on yhdistettynä
    digitalWrite (led2, HIGH); // Sytytä led2
    long currentMillis = millis();
    if (currentMillis - previousMillis >= 1000) { // Jos aikaa on kulunut sekunti
      previousMillis = currentMillis; // Nollaa ajanlaskenta
      PPS_VALUE = REV; // Aseta sekunnissa luettujen pulssien määrä int-muuttujaan
      REV = 0; // Nollaa mitattujen pulssien määrä
      Serial.println(PPS_VALUE); // Kirjaa sekunnissa mitattujen pulssien määrä näytölle
      Coefficient.writeValue(PPS_VALUE); // Jaa pulssien määrä bluetoothin
      //kautta vastaanottimelle
    }
  }
  else{
    digitalWrite (led2, LOW); // Muutoin led2 on sammuksissa
  }
}
```

Kuvio 17. Mittalaitteen ohjelman silmukka

6.3 Rungon toteutus

Mittalaitteen rungon muodon ja kiinnityksen suunnittelussa huomioitiin toimeksiantajan edustajan kanssa käydyt keskustelut sekä toiveet (Sokero 2021). Mittalaitteen rungon täytyi olla sellainen, että laite kestää toistuvaa käyttöä säilyttäen samalla helppokäyttöisyyden ja luotettavan kiinnityksen.

Mittalaitteen rungon suunnittelussa hyödynnettiin toimeksiantajan jakamaa työkoneen voiman ulosotosta luotua 3D pdf-mallia, josta pystyttiin mittaamaan tarvittavat etäisyydet sekä hahmottamaan mittalaitteelle sopiva muoto. Mittauksia suoritettiin työkoneesta myös paikan päällä, mikä vahvisti 3D pdf-mallin luotettavuuden. Mittalaitteen prototyyppi mallinnettiin kolmiulotteisena mallina, joka perustui tehtyihin mittauksiin ja keskusteluihin.

Prototyypin rungon mallintaminen suoritettiin Autodeskin suunnitteluohjelmistolla nimeltä Fusion 360 käyttäen opiskelijalisenssiä. 3D mallinnetut rungon rakenteet 3D tulostettiin käyttämällä Creality Ender 5 3D-tulostinta. Tulostusmateriaalina käytettiin mustaa PLA-muovia sen hyvän kestävyyden sekä edullisuuden vuoksi.

6.3.1 Kiinnitys työkoneeseen ja rungon pohjalevy

Toimeksiantaja halusi, että mittalaite pystytään kiinnittämään erilaisiin työkonemalleihin (Sokero 2021). Keskusteluiden jälkeen parhaaksi toteutustavaksi valikoituivat kiinnitysadapterit, jotka pystytään kääntämään eri asentoihin mitattavan työkoneen mallista riippuen (ks. liite 1).

Kiinnitysadapterit muodostavat kaksi kiinnityspistettä työkoneeseen. Tukevan kiinnityksen aikaansaamiseksi mittalaitteen runkoon suunniteltiin kolmas kiinnityspiste, joka sisältää kaksi voimakasta magneettia. Kolmannen kiinnityspisteen magneetit vetävät mittalaitetta työkoneen metallista runkoa vasten, jolloin mittalaitteen kiinnitys pysyy luotettavana tärinästä huolimatta (ks. liite 9).

6.3.2 Komponenttien kiinnitys ja rungon keskiosa

Mittalaitteen rungon keskiosan muoto täytyi tehdä sellaiseksi, että se mahdollistaa samanaikaisesti tukevan rakenteen sekä kompaktin koon. Ensimmäisessä prototyypissä testattiin pitkittäistä rakennetta, jossa runko sekä komponentit sijoitettiin pitkittäin mittalaitteen pohjalevyn päälle. Toimeksiantajan luona tehtyjen testien aikana huomattiin, että mittalaitteen pitkittäisen rungon alaosa ottaa kiinni työkoneen hydrauliseen nostolaitteeseen (ks. liite 5).

Tehdyn havainnon perusteella rungosta tehtiin päivitetty versio, jossa rungon muoto on vaakatasomainen. Tällöin komponentit pystyttiin sijoittamaan rungon sisälle vaakatasoon, jolloin laitteesta tuli kompaktimpi ja mittalaite mahtui olemaan paikoillaan myös nostolaitteen ollessa yläasennossa (ks. liitteet 2, 6 ja 7).

Anturin kiinnitys pysyi molemmissa versioissa samana. Kiinnityksen toteutuksessa huomioitiin kiinnityspisteen korkeus suhteessa työkoneen runkoon sekä jätettiin pitkittäinen säätövara anturille, jotta ilmaväli mitattavan akselin ja anturin välillä pystytään säätämään oikeanlaiseksi.

6.3.3 Rungon yläosa ja käyttökahva

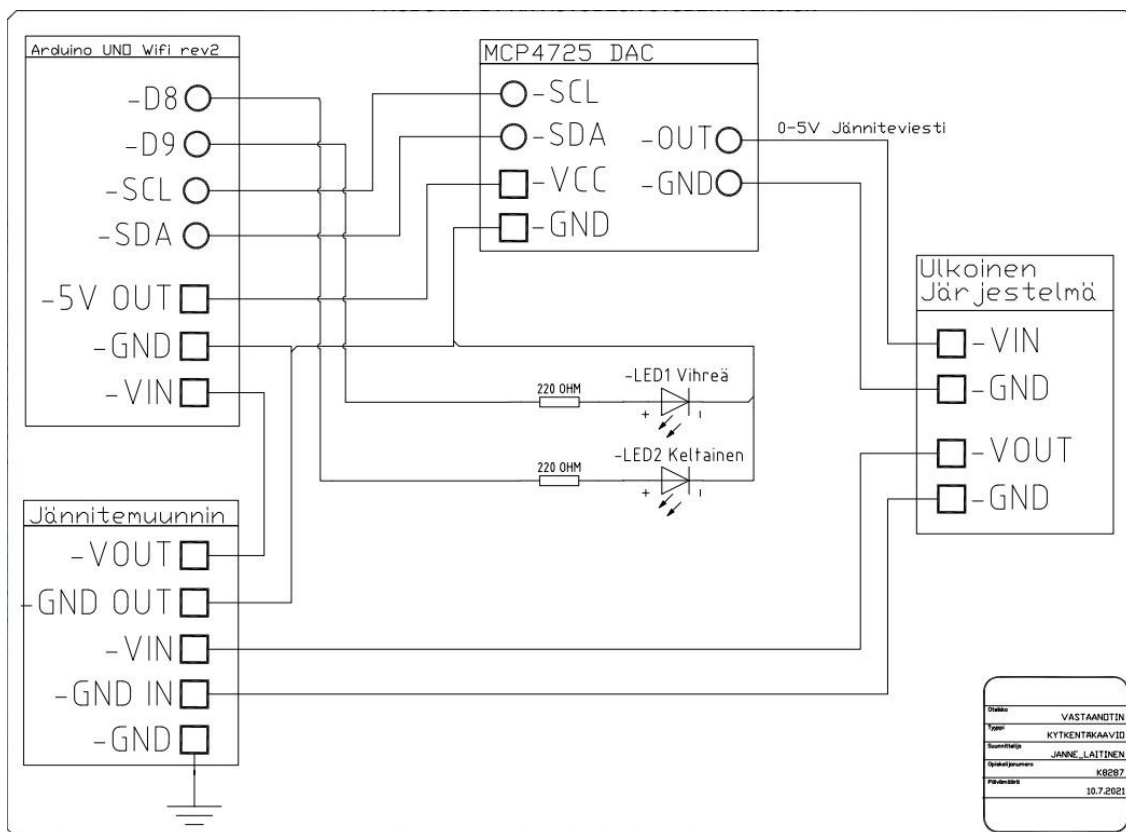
Mittalaitteen sisältämät LEDit, latausliitin ja virtakytkin sijoitettiin rungon yläosaan. Tarvitut reiät huomioitiin jo mallinnusvaiheessa, jolloin reikiä ei tarvinnut erikseen porata. Komponenttien kiinnityksen lisäksi rungon yläosaan kiinnitettiin mittalaitteen käyttökahva. Käyttökahva mallinnettiin sellaiseksi, että se tekee mittalaitteen käytöstä helppoa säilyttäen samalla kompaktin koon (ks. liitteet 2, 3, 7 ja 8).

7 Vastaanottimen toteutus

Toimeksiantajan järjestelmän välittömässä läheisyydessä sijaitsevalla vastaanottimella on merkittävä rooli tämän työn kannalta, sillä mittalaitteen lähettämä langaton mittaussignaali täytyy vastaanottaa sekä jakaa eteenpäin. Mittalaitteesta poiketen vastaanotin ei jaa vastaanotettua signaalia eteenpäin langattomasti, vaan se muuntaa vastaanotetun digitaalisen tiedon analogiseksi jänniteviestiksi käyttäen ulkoista DA-muunninta. Vastaanottimen virtalähteenä toimii ulkoinen jännitemuunnin, joka muuntaa toimeksiantajan järjestelmästä tulevan syöttöjännitteen vastaanottimelle sopivalle tasolle. Eroavaisuuksista huolimatta vastaanottimen toteutuksen vaiheet ovat vastaavanlaiset kuin mittalaitteen, sillä ne pohjautuvat samaan logiikkaan.

7.1 Sähköpiirin suunnittelu

Vastaanottimen sähköpiirin pääkomponentit ovat Arduino, ulkoinen DA-muunnin, ulkoinen jännitemuunnin sekä LEDit, jotka kytkettiin kytkentäkaavion mukaisesti. Alla oleva kuvio esittää kyseisen kytkentäkaavion.



Kuvio 18. Vastaanottimen kytkentäkaavio

7.1.1 DA-muunnin ja sen kytkentä

Arduino kykenee tuottamaan vain digitaalista ulostulosignaalia. Toimeksiantaja halusi mittaustiedon analogisessa muodossa, minkä johdosta Arduinoon lisättiin ulkoinen 12-bittinen DA-muunnin nimeltä MCP4725 DAC, jatkossa nimellä ”muunnin”. (Arduino UNO Wi-Fi rev2 2021, Sokero 2021).

Muuntimen tehtävänä on muuntaa siihen syötetty digitaalinen tieto analogiseksi jännitetiedoksi. Toimiakseen muunnin tarvitsee syöttöjännitteen sekä ohjaustiedon. Kyseisen MCP4725 mallin syöttöjännitealue on 2,7–5,5 voltia, jolloin Arduinon 5V *OUT*- napa soveltuu hyvin muuntimen syöttöjännitteeksi. Tällöin muuntimen tuottama analoginen jännitealue on 0–5 voltia. Ohjaustieto syötetään Arduinon *SCL*-, ja *SDA*- navoista, jotka on tarkoitettu muun muassa tähän tarkoitukseen. Ohjaustieto on 12-bittinen digitaalinen viesti väliltä 0–4095, joka skaalautuu muuntimessa analogiseksi jännitteeksi välille 0–5 voltia. (MCP4725 2007, Arduino UNO Wi-Fi rev2 2021.)

Muuntimen *SCL*-, ja *SDA*- navat kytkettiin suoraan Arduinon *SCL*-, ja *SDA*- napoihin. Vastaavaa periaatetta käyttäen DA-muuntimen *VCC*-, ja *GND*- navat kytkettiin Arduinon 5V *OUT*-, ja *GND*- napoihin. Muuntimen *OUT*-, ja *GND OUT*- navat kytkettiin pyöreään kaksinapaiseen 5,5 mm liittimeen, jolloin vastaanottimen yhdistäminen ulkoiseen järjestelmään on vaivatonta. Alla oleva kuva esittää muuntimen kytkennän Arduinoon sekä 5,5 mm liittimeen.



Kuvio 19. Vastaanottimen DA-muuntimen kytkentä Arduinoon

7.2 Ohjelman toteutus

Vastaanottimen ohjelman toteutuksessa käytettiin samoja periaatteita sekä tietolähteitä kuin mittalaitteen ohjelman toteutuksessa (ks. kappale 6.2.)

7.2.1 Käytetyt kirjastot ja muuttujat

Ohjelman alussa sisällytetään tarpeelliset kirjastot, joita tarvitaan DA-muuntimen ohjaamiseen sekä BLE kommunikaatioon. Tämän jälkeen määritellään LEDejä vastaavat muuttujat ja niiden pinnien sijainnit.

```
#include <Wire.h>    // Kirjasto I2C kommunikaatioon
#include <Adafruit_MCP4725.h> // Kirjasto DAC-muuntimelle
#include <ArduinoBLE.h> // Kirjasto bluetooth kommunikaatioon

Adafruit_MCP4725 dac; // Käytetään kirjastoa DAC-muuntoon

int led1 = 9; // Päälläolon ilmaiseva LED
int led2 = 8; // Yhteyden muodostuksen ilmaiseva LED
```

Kuvio 20. Vastaanottimen ohjelman kirjastot ja muuttujat

7.2.2 Ohjelman ja hakutilan määrittely

Muuttujien määrittelyn jälkeen määritellään LEDit, baudinopeus ja sarjayhteys samaan tapaan kuin mittalaitteen ohjelmassa. Tämän jälkeen aloitetaan DA-muuntaminen määritellyllä asetusarvolla, joka on MCP4725 muuntimelle heksadesimaali 0x60 (MCP4725 2007). Jottei analoginen jännite kelluisi laitteen ollessa hakutilassa, analoginen jännite asetetaan nolaksi ja sen jälkeen vasta mittaustiedon mukaiseksi. Tämän jälkeen aloitetaan BLE kommunikaatio ja BLE haku. Virheistä ilmoitetaan Arduino IDEen.

Edeltävien määrittelyjen jälkeen LED1 sytytetään hakutilan merkiksi ja määritellään oheislaite, johon halutaan yhdistää. Ohjelma toistaa tätä silmukkaa niin kauan kunnes ”PTO_MITTALAITTE” niminen oheislaite on löytynyt.

```

void setup() {
  pinMode (led1, OUTPUT); // Asetetaan ledit ulostuloiksi
  pinMode (led2, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);    // Baudi-nopeuden asettaminen
  while (!Serial);      // Resetoi ohjelman sarjayhteyden muodostuessa
  dac.begin(0x60);      // Aloitetaan DAC määritellyssä osoitteessa
  int ANALOG_VOLTAGE = 0; // Aseta jännitetieto nolllaksi
  dac.setVoltage(ANALOG_VOLTAGE, false); // Aseta analoginen ulostulojännite
  //mittaustiedon mukaiseksi

  if (!BLE.begin()) {   // Ilmoitetaan jos BLE:n aloitus epäonnistui
    Serial.println("BLE:n aloittaminen epäonnistui!");
  }

  Serial.println("Varmista, että PTO mittalaite on päällä.");

  BLE.scan(); // Aloitetaan bluetooth oheislaitteen etsiminen
}

void loop() {
  digitalWrite (led1, HIGH); // Sytytetään led1

  BLEDevice peripheral = BLE.available(); // Määritellään bluetooth oheislaite

  if (peripheral.localName() == "PTO_MITTALAITE") { // Jos äärlaitteen nimi on

    BLE.stopScan(); // Lopeta etsiminen

    PTO_MITTALAITE(peripheral); // Aseta PTO_MITTALAITE oheislaitteeksi

    BLE.scan();
  }
}

```

Kuvio 21. Vastaanottimen ohjelman ja yhteyden hakuehtojes määrittely

Yhteyden muodostamisen jälkeen ohjelmakoodi siirtyy seuraavaan osioon, jossa määritellään mit-
talaiteelta luettava palvelu ja ominaisuus. Vianetsinnän helpottamiseksi tähän yhteyteen kirjoitet-
tiin osio, mikä ilmoittaa sarjayhteyden kautta Arduino IDEen BLE yhteyden onnistumisesta tai mah-
dollisista ongelmista yhteydessä.

```

void PTO_MITTALAITE(BLEDevice peripheral) {

    Serial.println("Yhdistetään mittalaitteeseen...");
    if (peripheral.connect()) {
        Serial.println("Yhdistetty.");
    } else {
        Serial.println("Yhdistäminen epäonnistui!");
        return;
    }

    Serial.println("Etsitään palvelua...");
    if (peripheral.discoverService("27A8")) {
        Serial.println("Palvelu löydetty.");
    } else {
        Serial.println("Palvelua ei löydetty!");
        peripheral.disconnect();
        return;
    }

    BLECharacteristic Coefficient = peripheral.characteristic("2AE8");    // Asetetaan
    //palvelun luettavaksi ominaisuudeksi Coefficient

    Serial.println("Etsitään kierroslukunopeustietoa...");
    if (!Coefficient) {
        Serial.println("Kierroslukunopeustietoa ei löydetty!");
        peripheral.disconnect();
        return;
    } else if (!Coefficient.canSubscribe()) {
        Serial.println("Kierroslukunopeustietoa ei voi tilata!");
        peripheral.disconnect();
        return;
    } else if (!Coefficient.subscribe()) {
        Serial.println("Kierroslukunopeustietoa ei voi lukea!");
        peripheral.disconnect();
        return;
    } else {
        Serial.println("Nopeustieto löydetty.");
    }
}

```

Kuvio 22. Vastaanottimen ohjelman ja yhteyden hakuehtojen määrittely

Kun yhteys mittalaitteeseen on muodostettu, LED2 sytytetään aktiivisen yhteyden merkiksi. Tämän jälkeen määritellään muuttujat, joita ovat pulssitiedot sekä mitattavassa akselissa olevien urien määrä. Ohjelma toistaa seuraavanlaisen käskysarjan aina, kun mittalaite kirjaa uuden arvon ”kerroin” ominaisuuteen;

Vastaanotin lukee pulssitiedon uuden arvon ja jakaa sen 60:llä, jolloin pulssia per sekunti muoto muuttuu pulssia per minuutiksi. Tämän jälkeen pulssitieto jaetaan akselin urien määrällä, jotta saadaan akselin todellinen kierrosta minuutissa- arvo esille. Tämä on tarpeellista, sillä mitattavan akselin urien määrä määrittää sen, kuinka monta pulssia anturi tuottaa yhdellä akselin pyörähdyksellä.

Tämän jälkeen DA-muuntimelle syötettävä ohjaussignaali skaalataan kierrosta per minuutti-tiedon perusteella. Akselin pyörimisnopeuden nopeusalueeksi asetettiin 0-1250 rpm, sillä mitattavan akselin pyörimisnopeus on maksimissaan noin 1200 kierrosta per minuutti (Sokero 2021). DA-muuntimelle lähetettävä tieto on 12-bittistä, jolloin sen mitta-alue on $2^{12}-1 = 4096$ eli 0-4095. Skaalaus toimii siten, että nopeustieto 0 vastaa ohjaustiedon 0:llä ja nopeustieto 1250 vastaa ohjaustiedon 4095:ttä.

```
while (peripheral.connected()) { // Jos ääri-laite on yhdistettynä
  digitalWrite (led2, HIGH); // Sytytetään led2
  if (Coefficient.valueUpdated()) { // Jos ääri-laite jakaa uuden arvon

    int PPS_VALUE; // Pulsseja sekunnissa
    int RPM_VALUE; // Kierroksia minuutissa
    int grooves = 6; // Akselin urien määrä

    Coefficient.readValue (PPS_VALUE); // Lue pulssitiedon uusi arvo

    RPM_VALUE = PPS_VALUE * 60 / grooves; // Muunna luettu arvo kierroksia minuutiksi

    int ANALOG_VOLTAGE = map (RPM_VALUE, 0, 1250, 0, 4095); // Skaalaa jännitteen
    //asetusarvo kierrosnopeuden mukaan
    dac.setVoltage (ANALOG_VOLTAGE, false); // Aseta analoginen ulostulojännite
    //jännitteen asetusarvon mukaiseksi
    Serial.println (RPM_VALUE); //Kirjaa kierrosnopeustieto näytölle
  }
}
```

Kuvio 23. Vastaanottimen ohjelman määrittely yhteyden aikana

Skaalauksen jälkeen nopeustieto lähetetään sarjayhteyden kautta Arduino IDEen sekä DA-muunnin tuottaa 0-5 voltin jännitteen ohjaustiedon mukaisesti. Syöttöjännitteen ollessa 5 voltia ohjaustiedon 0 vastaa 0 voltin jännitettä ja ohjaustiedon 4095 vastaa 5 voltin jännitettä seuraavan kaavan mukaisesti; (MCP4725 2007.)

$V_{OUT} = \frac{(V_{REF} \times D_n)}{4096}$
Where:
$V_{REF} = V_{DD}$
$D_n = \text{Input code}$

Kuvio 24. Vastaanottimen DA-muuntimen muuntoperiaate

Lopuksi määritellään asetukset yhteyden katkeamisen jälkeen, jottei vastaanotin jää toistamaan edellistä silmukkaa ja jottei analoginen jänniteviesti jäisi kellumaan. Näiden lisäksi LED2 sammutetaan ja yhteyden katkeamisesta ilmoitetaan Arduino IDEen.

```

if (!peripheral.connected()){ // Jos yhteys katkeaa
  digitalWrite (led2, LOW); // Sammuta led2
  int ANALOG_VOLTAGE = 0; // Aseta jännitetieto nolaksi
  dac.setVoltage(ANALOG_VOLTAGE, false); // Aseta analoginen ulostulojännite
  //jännitetiedon mukaiseksi
  Serial.println("Yhteys mittalaitteeseen katkaistu.");
}
}

```

Kuvio 25. Vastaanottimen ohjelman määrittely yhteyden katkeamisen jälkeen

7.3 Rungon toteutus

Vastaanottimen rungon suunnittelu oli huomattavasti vapaampaa kuin mittalaitteen, sillä sen koon ja kestävyys ei kohdistunut yhtä tiukkoja vaatimuksia toimeksiantajan taholta.

Arduinon ympärille suunniteltiin yksinkertainen kuori, joka sisältää paikat pyöreälle kaksinapaiselle 5,5 mm liittimelle ja LEDeille sekä reiät reset- napin ja USB-B- liittimen käyttämiseen. Kuoren yläosassa on lovet ja kuoressa on neljä kiinnitysreikää, joiden avulla vastaanottimen kiinnitys on helppoa. Arduinon virtalähteenä toimivalle jännitemuuntimelle suunniteltiin oma kuori, jonka reunoissa on pykälät. Pykälät liukuvat vastaanottimen kuoressa oleviin loviin, jolloin jännitemuunnin ja vastaanotin muodostavat yhtenäisen paketin (ks. liite 10).



Kuvio 26. Valmis vastaanotin ja jännitemuunnin

8 Mittalaitteen ja vastaanottimen testaus

Mittalaitteen ja vastaanottimen suunnittelun ja käytännön toteuttamisen jälkeen laitteita testattiin monessa vaiheessa monin eri tavoin. Osa testauksista toteutettiin paikan päällä toimeksiantajan tiloissa ja työkoneeseen kiinnitettynä. Suuri osa testauksista suoritettiin kuitenkin etätyönä toimeksiantajalla vallitsevien käytäntöjen vuoksi, joiden tavoitteena oli ihmiskontaktien vähentäminen (Sokero 2021).

8.1 Pyörimisnopeuden mittaaminen

Ensimmäisenä testauksen kohteena oli mittalaitteen anturin toiminta. Aluksi testattiin anturin metallintunnistuskky, jolla varmistettiin kytkennän olevan oikea. Tämä testaus oli mahdollista tehdä ilman Arduinon ohjelmointia, sillä anturissa oleva punainen LED ilmaisi valollaan, kun anturi tunnisti metallin. Tämän jälkeen Arduino ohjelmoitiin ja pyörimisnopeuden mittaamista testattiin porakoneeseen kiinnitetyllä metallikappaleella. Porakoneen tyyppikilvessä oleva maksimi kierrosnopeusarvo ja anturin tuottama kierrosnopeusarvo vastasivat toisiaan, mikä osoitti anturin toimivan oikein.

Testauksia jatkettiin toimeksiantajan luona, kun varmuus anturin toimivuudesta oli saatu. Mittalaitteen ensimmäinen pitkittäisen mallinen prototyyppi kiinnitettiin mittaamaan työkoneen ulosotoakselin pyörimisnopeutta (ks. liite 5) ja työkoneen akselin kierrosnopeus kiihdytettiin arvoon, joka oli työkoneen sisäisen kierrosnopeusmittarin mukaan vajaan 1200 kierrosta minuutissa (Sokero 2021).

Toimeksiantajan edustaja totesi mittalaitteen tarkkuuden olevan vakuuttava ja tarkkuuden ± 10 kierrosta per minuutissa olevan riittävän hyvä. Täten mittalaitteen pyörimisnopeuden mittauskky todettiin täysin toimivaksi. Alla oleva kuvio esittää mittaustiedon, jonka mittalaitte luki työkoneen akselista kiihdytyksen aikana.

```
13:10:57.820 -> 370
13:10:58.840 -> 360
13:10:59.800 -> 380
13:11:00.821 -> 550
13:11:01.813 -> 690
13:11:02.815 -> 860
13:11:03.777 -> 1070
13:11:04.781 -> 1030
13:11:05.789 -> 1040
13:11:06.808 -> 1050
13:11:07.730 -> 1150
13:11:08.743 -> 1170
13:11:09.749 -> 1170
13:11:10.738 -> 1170
13:11:11.706 -> 1170
13:11:12.717 -> 1170
13:11:13.745 -> 1170
13:11:14.713 -> 1170
13:11:15.718 -> 1170
13:11:16.692 -> 1170
13:11:17.728 -> 1170
```

Kuvio 27. Mittalaitteen tuottama mittaustieto työkoneen kiihdytyksen aikana

8.2 Langaton yhteys

Langattomaan yhteyteen perehdyttiin anturin toiminnan testaamisen jälkeen. Myös langatonta yhteyttä testattiin monessa eri vaiheessa.

8.2.1 Yhteyden muodostaminen ja tiedonsiirto

BLE yhteyden muodostaminen mittalaitteen ja vastaanottimen välille onnistui ilman ongelmia, minkä jälkeen yhteyden muodostamisen luotettavuutta testattiin toistoilla; mittalaitetta sekä vastaanotinta kytkettiin päälle ja pois toistuvasti ja yhteyden muodostamista seurattiin.

Tuloksena oli, että laitteet yhdistävät toisiinsa aina noin 0,5–1,5 sekunnissa virran kytkemisen jälkeen, kun laitteet ovat häiriöttömän kantaman sisällä. Kantamasta lisää kappaleessa 8.2.2. Alla oleva kuva esittää vastaanottimen Arduino IDEen sarjayhteydellä lähettämät ilmoitukset, kun mitalaite kytkettiin päälle sen ollessa kiinni tyhjäkäyntiä käyvässä työkoneessa.

13:10:25.931 -> Varmista, että PTO mittalaite on päällä.
13:10:26.927 -> Yhdistetään mittalaitteeseen...
13:10:27.058 -> Yhdistetty.
13:10:27.058 -> Etsitään palvelua...
13:10:27.427 -> Palvelu löydetty.
13:10:27.427 -> Etsitään kierroslukunopeustietoa...
13:10:27.470 -> Nopeustieto löydetty.
13:10:28.034 -> 370
13:10:29.052 -> 360
13:10:30.011 -> 370
13:10:31.049 -> 360
13:10:32.023 -> 370
13:10:33.055 -> 360
13:10:34.004 -> 370
13:10:35.007 -> 370
13:10:35.995 -> 360
13:10:37.031 -> 370
13:10:37.978 -> 360

Kuvio 28. Mittalaitteen päällekytkentä ja yhdistäminen vastaanottimeen

8.2.2 Yhteyden kantama ja häiriöherkkyys

BLE yhteyden kantamaa testattiin monissa eri ympäristöissä sekä tilanteissa. Toimeksiantajan suunnalta suurin mielenkiinnon kohde oli se, että aiheuttavatko muut signaalilähteet häiriötä tiedonsiirtoon tai vaikuttavatko ne kantamaan. Alla oleva taulukko esittää mittaustulokset, joita tehtiin soveltaen monessa eri ympäristössä.

Taulukko 3. Yhteyden kantaman testaus

Olosuhteet	Vastaanottimen korkeus maanpinnasta	Mittalaitteen korkeus maanpinnasta	Laitteiden keskinäinen asento	Häiriötön kantama
Esteetön ulkoilma	1,0 m	0,0–2,5 m	Kaikki yhdistelmät	11–15 m
Esteetön ulkoilma, 6 muuta Bluetooth yhteyttä	1,0 m	0,0–2,5 m	Kaikki yhdistelmät	7,0–9,0 m
Ulkoilma, välissä konehallin liukuovi (2,5 mm paksu alumiini)	1,0 m	0,0–2,5 m	Kaikki yhdistelmät	6,0–8,0 m
Ulkoilma, lähetin kiinni työkoneessa. Välissä yksi työkone. Molemmat koneet käynnissä.	1,0 m	1,0–2,5 m	Vastaanotin = Kaikki yhdistelmät Mittalaite = Kiinni työkoneessa	5,0–6,0 m

Langattoman yhteyden kantamaa testatessa huomattiin, että suurimman negatiivisen vaikutuksen aiheuttavat itse työkoneet. Käynnissä olevien työkoneiden välittömässä läheisyydessä mittalaitteen häiriötön kantama oli runsaat 5 metriä (ks. liite 11). Koneiden sammuttaminen ei vaikuttanut kantamaan. Tulosta voidaan pitää tyydyttävänä, sillä oikeassa käyttöympäristössä lähettimen ja vastaanottimen etäisyys toisistaan on selvästi alle 5 metriä (Sokero 2021). Tuloksessa täytyy kuitenkin huomioida se, että testissä käytetyt työkoneet eivät olleet samaa mallia kuin toimeksiantajalla sekä testiympäristö ei vastannut täysin laitteiden oikeata käyttöympäristöä.

Testausten yhteydessä huomattiin, että myös laitteiden keskinäisellä korkeuserolla sekä korkeudella maanpinnasta on huomattava merkitys kantamaan. Häiriötön kantama heikkeni merkittävästi, mikäli jompikumpi laite oli alle 0,5 metrin korkeudesta maanpinnasta. Kantama heikkeni myös laitteiden keskinäisen korkeuseron kasvaessa.

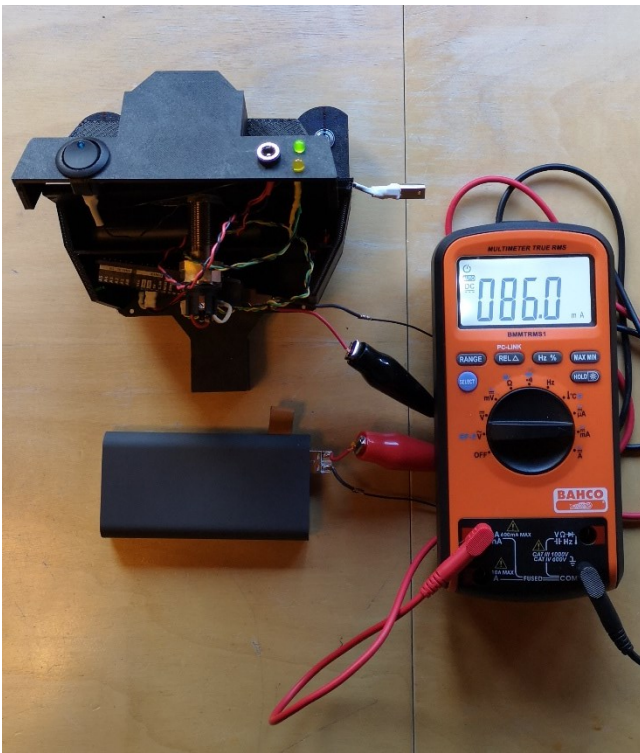
Myös laitteiden eri asentojen merkitys tutkittiin ja huomattiin, että paras häiriötön kantama saavutettiin laitteiden ollessa poikittain siten, että Arduinojen Wi-Fi moduulien antennit ovat toisiinsa nähden vastakkain. Mittalaitteen ja vastaanottimen ollessa näissä asennoissa sekä 1,0 metrin korkeudella maanpinnasta, saatiin häiriöttömäksi kantamaksi esteettömässä ulkoilmassa runsaat 30 metriä. Yhteys kuitenkin katkesi välittömästi, mikäli laitteiden korkeutta tai asentoa muutettiin tai niiden välille tuli este.

Mikään testiolosuhde ei aiheuttanut vääristymää lähetettyyn mittaustietoon, vaan häiriön ilmaantuessa tai kantaman loppuessa yhteys katkesi mittalaitteen ja vastaanottimen välillä. Laitteet yhdistivät toisiinsa automaattisesti häiriöttömän kantaman sisällä. Testien perusteella voidaan olettaa, että langattoman yhteyden häiriötön kantama on riittävä toimeksiantajan käyttöympäristöön.

8.3 Mittalaitteen akun kesto

Mittalaitteen virtalähteeksi valittiin 3SIXT JETPAK LED varavirtalähde, jonka akun kapasiteetti on 4000mAh ja syöttövirta 2,1 ampeeria ja -jännite 5,0 voltia. Mittalaitteen virrankulutus mitattiin käyttämällä Bahcon BMMTRMS1- yleismittaria, joka kytkettiin sarjaan varavirtalähteen ja Arduinon väliseen +5V johtimeen.

Kuten osiossa 5.4. todettiin, Arduinon etuna on pieni virrankulutus. Alla oleva kuva esittää mitausjärjestelyn, kun mittalaite on valmiustilassa (mainostustilassa).



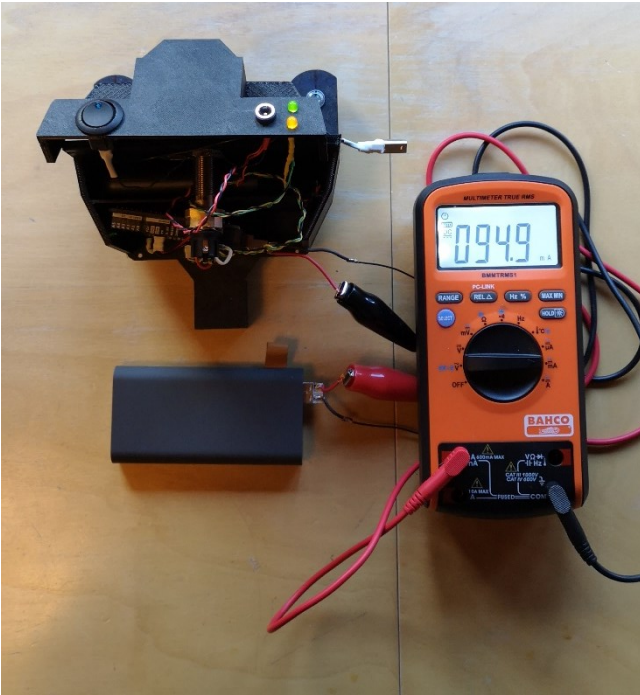
Kuvio 29. Mittalaitteen virrankulutus valmiustilassa

Mittalaite kuluttaa kokonaisuudessaan 86,0mA virtaa ja kun akun kapasiteetti on ilmoitettu, voidaan akun kesto laskea seuraavalla kaavalla (Valtanen 2016);

$$Aika\ tunteina\ (h) = \frac{Akun\ kapasiteetti\ (mAh)}{Virran\ kulutus\ (mA)} = \frac{4000mAh}{86mA} = 46.5h$$

Minkä perusteella akku kestää teoriassa 46,5 tuntia kun mittalaite on valmiustilassa.

Tämän jälkeen mitattiin virrankulutus lähetystilassa. Mittalaite kuluttaa noin 95mA virtaa, kun BLE yhteys on aktiivinen. Kierroslukunopeuden muutokset eivät vaikuttaneet virrankulutukseen.



Kuvio 30. Mittalaitteen virrankulutus lähetystilassa

Lasketaan jälleen akun kesto;

$$Aika\ tunteina\ (h) = \frac{Akun\ kapasiteetti\ (mAh)}{Virran\ kulutus\ (mA)} = \frac{4000mAh}{95mA} = 42.1h$$

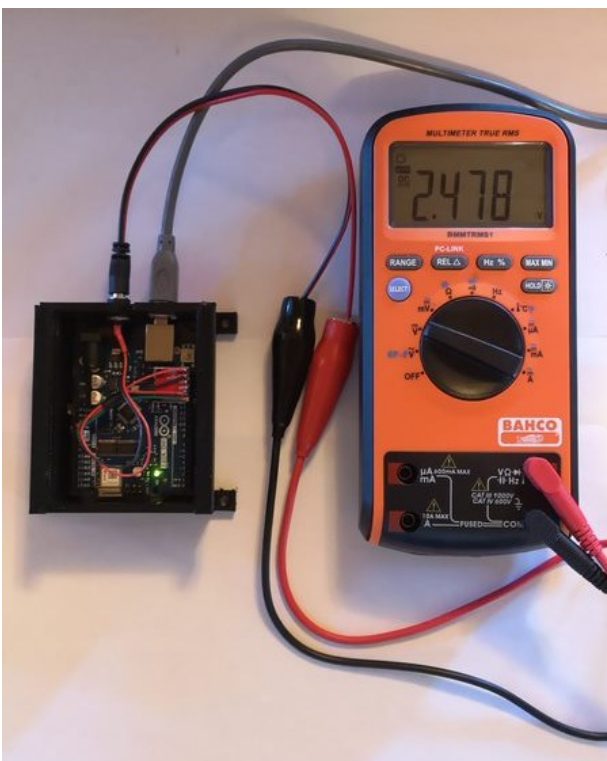
Minkä perusteella akku kestää teoriassa 42,1 tuntia kun mittalaite on lähetystilassa.

Mittaustuloksien varmentamiseksi mittalaite pidettiin lähetystilassa 35 tuntia putkeen. Akku kesti tämän ajanjakson ongelmitta ja laskuihin perustuen oletettiin, että se kestäisi vielä pidempään. Akun täydellisen tyhjenemisen aiheuttaman mahdollisen alijännitteen seurauksia ei kuitenkaan haluttu kokea, joten testi lopetettiin 35 tunnin jälkeen.

8.4 Vastaanottimen muodostama jänniteviesti

Kuvio 24 esitteli kaavan, johon DA-muuntimen tuottama jänniteviesti perustuu. Kaavalla saatuja tuloksia haluttiin verrata todellisiin mitattuihin arvoihin, jotta saadaan selville minkälaisia muutoksia muun muassa piirilevyjen ja johtimien resistanssien aiheuttamat jännitehäviöt muodostavat.

Alla mittausjärjestely ja tulos 625 kierrosta per minuutissa arvolla. Vastaanottimen Arduinon koodiin kirjoitettiin kiinteitä pyörimisnopeuden arvoja mitattujen sijaan, jotta mittauksista saataisiin mahdollisimman luotettavia ja tarkastelu kohdistuisi vain DA-muunnon tarkkuuteen.



Kuvio 31. DA-Muuntimen tarkkuuden arviointi

Alla oleva taulukko vertailee kaavalla laskettuja arvoja (MCP 4725 2007), todellisiin mitattuihin arvoihin.

Taulukko 4. DA-Muuntimen tuottaman jänniteviestin vertailu laskettuihin arvoihin

(RPM)	0	125	250	375	500	625	750	875	1000	1125	1250
Mitattu (V)	0.001	0.490	0.987	1.482	1.978	2.478	2.972	3.470	3.962	4.453	4.920
Laskettu (V)	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
Erotus (V)	0	0.01	0.013	0.018	0.022	0.022	0.028	0.030	0.038	0.047	0.08

Taulukosta voidaan päätellä, että mitattu jänniteviesti ei seuraa täydellisesti laskettua jänniteviestin arvoa, vaan lasketun ja mitatun jännitteen erotus kasvaa jänniteviestin jännitteen kasvaessa. Tämä täytyy huomioida jänniteviestin tulkitsemisessa ja lopullisen mittausarvon kalibroinnissa toimeksiantajan ulkoisessa järjestelmässä.

9 Pohdinta

Mittalaitteen ja vastaanottimen toteutukseen ja testaustuloksiin vedoten voidaan todeta, että projekti oli kokonaisuutena onnistunut. Työ edistyi johdonmukaisesti taustatiedon hankinnasta käytännön toteutukseen ja testaukseen, minkä jälkeen toteutettiin raportointi ja dokumentointi. Työn tulokset antoivat myös vastaukset keskeisimpiin tutkimuskysymyksiin, jotka olivat ”*Miten pyörimisnopeus mitataan?*” ja ”*Miten mittauksien tieto jaetaan toimeksiantajan järjestelmään?*”, joten työ voidaan tulkita onnistuneeksi myös tältä osalta.

Toimivuudesta huolimatta mittalaitteessa on parantamisen kohteita. Nykyisessä prototyypissä akun varausta ei pystytä lukemaan ilman mittaustyökaluja, jolloin käyttäjä joutuu olettamaan varaustason esimerkiksi latausajan perusteella. Ratkaisu tähän voisi olla pieni nestekidenäyttö, joka ilmaisisi varaustilan esimerkiksi palkkeina. Lisäksi mittalaitteen turvallisuutta olisi hyvä lisätä asentamalla mittalaitteen akun ja Arduinon väliin sulake. Tämä suojaisi komponentteja sekä käyttäjää muun muassa oikosulun aiheuttamalta lämmöltä ja vaaralta.

Laitteen käytettävyyttä voitaisiin parantaa poistamalla keinuvirtakytkin ja korvaamalla se painonapilla, joka palautuu. Tällöin mittalaitteeseen voitaisiin suunnitella virtapiiri, joka katkaisee mittalaitteen virran automaattisesti muun muassa mittausprosessin päättyessä, laturiin laitettaessa tai tietyn ajan kuluessa. Lisäksi jänniteviesti olisi hyödyllistä muuntaa edelleen virtaviestiksi, jolloin mittaustiedon tarkkuus pysyisi luotettavana, vaikka johdinpituudet olisivat pitkät.

Laadullisesta tutkimusmenetelmästä johtuen taustatiedon hankinnassa käytettiin erityistä lähdekriittisyyttä ja tietoa hankittiin monipuolisista lähteistä. Samaa kriittisyyttä noudatettiin mittalaitteen toteutuksessa ja erityisesti testauksessa, missä huolellisuus näkyy testausten moniulotteisuutena sekä havaittujen kehityskohteiden määränä. Myös testaustuloksiin kohdistuva kriittisyys on tarpeen erityisesti langattoman yhteyden kantamaan ja toimintaan liittyvissä testeissä. Kriittisyyden oikeuttaa muun muassa se, että testauksia ei voitu suorittaa paikan päällä mittalaitteen oikeassa käyttöympäristössä vaan olosuhteita jouduttiin imitoimaan parhaan mukaan.

Edellä mainituista asioista huolimatta työtä voidaan pitää kaiken kaikkiaan onnistuneena projektina, joka tuotti toimeksiantajalle jalostuskelpoisen laitekokonaisuuden taustatietoineen. Mittalaitte korvaa silmämääräisen pyörimisnopeuden tarkastuksen konkreettisella mittaustiedolla, joka

varmistaa omalta osaltaan tuotettujen työkoneiden tasalaatuisuuden ja helpottaa työntekijöiden suorittamaa testausprosessia luomalla standardimaisen testausmenetelmän, joka on toistettavissa ja jonka tuottamat mittaustulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

Arduino pohjaisen kehitysalustan ansiosta mittalaite ja vastaanotin ovat edellä mainittujen kehitysehdotusten lisäksi täysin jatkojalostettavissa toimeksiantajan ideoiden mukaan. Laitetekonaisuudesta voi muun muassa tehdä täysin kannettavan version, jolloin laitetta voidaan hyödyntää paikasta riippumatta esimerkiksi työkoneen vianetsinnässä. Nämä mahdollisuudet laitekokonaisuuden kehittämisessä voivat tuottaa uusia kehitysideoita ja jopa innovaatioita toimeksiantajan työympäristön eri osa-alueilla. Näin ollen tehdyn työn hyödyt ulottuvat konkreettisesta mittalaitteesta ja testausmenetelmästä paljon laajemmaksi kokonaisuudeksi, joka voi tuotteiden laadun lisäksi parantaa työelämän laatua ja lisätä alan kehitystä.

Lähteet

16-bit UUID Numbers Document. 2021. Dokumentti UUID standardista. Bluetooth SIG 2021. Viitattu 2.8.2021. <https://btprodspecificationrefs.blob.core.windows.net/assigned-values/16-bit%20UUID%20Numbers%20Document.pdf>

ArduinoBLE library. 2019. Artikkelin Bluetooth Low Energystä Arduinon verkkosivuilla. Arduino 2019. Viitattu 2.8.2021. <https://www.arduino.cc/en/Reference/ArduinoBLE>

Arduino UNO Wi-Fi rev2. 2021. Tuotetiedot Arduino UNO Wi-Fi rev2:sta Arduinon verkkosivuilla. Arduino 2021. Viitattu 2.8.2021. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-wifi-rev2>

Automotive Handbook. 2014. 1290.–1314. p. 9. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

Functionality and technology of inductive sensors. 2021. Artikkelin induktiivisten antureiden toimintaperiaatteesta Baumerin verkkosivuilla. Baumer 2021. Viitattu 2.8.2021. https://www.baumer.com/de/en/service-support/function-principle/functionality-and-technology-of-inductive-sensors/a/Know-how_Function_Inductive-sensors

GS1005 – GS1007 Sensors. 2015. Tekninen tiedote ZF Electronicsin hall antureista. Cherry 2015. Viitattu 2.8.2021. https://www.mouser.fi/datasheet/2/833/Datasheet_GS1005-GS1007_Letter_EN-1847814.pdf

Huhtama, K. n.d. LEDien kytkennät. Tekninen artikkeli LEDien kytkennästä harraste elektroniikkasivustolla. Viitattu 22.8.2021. <https://huhtama.kapsi.fi/ele/index.php?si=ml28.sis>

Induktive Näherungsschalter. 2015. Tekninen tiedote Baumerin induktiivisesta anturista. Baumer 2015. Viitattu 2.8.2021. https://www.elfadistelec.fi/Web/Downloads/t/ds/IR12_P04F-F50_PO1Z_7BO_ger_tds.pdf

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. JAMKin julkaisuja 134.

Maxwell, L. 2016. Arduino: The Ultimate Beginner's Guide. CreateSpace Independent Publishing Platform.

MCP4725. 2007. Tekninen tiedote Microchipin MCP4725 DAC-muuntimesta. Microchip 2007. Viitattu 2.8.2021. <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/MCP4725.pdf>

Meriläinen, A. 2003. Optisten tunnistimien testaus. Opinnäytetyö, AMK. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Tekniikan ja liikenteen ala, konetekniikan koulutusohjelma. Viitattu 2.8.2021.

Nikupetteri, A. 2020. Bluetooth LE- laitteiden etäseuranta AD HOC- meshverkon kautta. Opinnäytetyö, AMK. Oulun ammattikorkeakoulu, Tietotekniikan tutkinto-ohjelma, ohjelmistokehitys. Viitattu 2.8.2021. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/348746/Nikupeteri_Aripekka.pdf?sequence=2

NINA-W10 series. 2019. U-bloxin tekninen tiedote itsenäisistä multiradio moduuleista. p.5. u-blox 2019. Viitattu 2.8.2021. https://content.arduino.cc/assets/Arduino_NINA-W10_DataSheet_%28UBX-17065507%29.pdf

Pounder, L. 2020. Raspberry Pi GPIO Pinout: What Each Pin Does on Pi 4, Earlier Models. Tekninen artikkeli Raspberry Pi 4:stä Tom's Hardware verkkosivustolla. Viitattu 2.8.2021. <https://www.tomshardware.com/reviews/raspberry-pi-gpio-pinout,6122.html>

Raspberry Pi 4 Computer. 2021. Tekninen tiedote Raspberry Pi 4 Model B:stä. Raspberry Pi 2021. Viitattu 2.8.2021. <https://datasheets.raspberrypi.org/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>

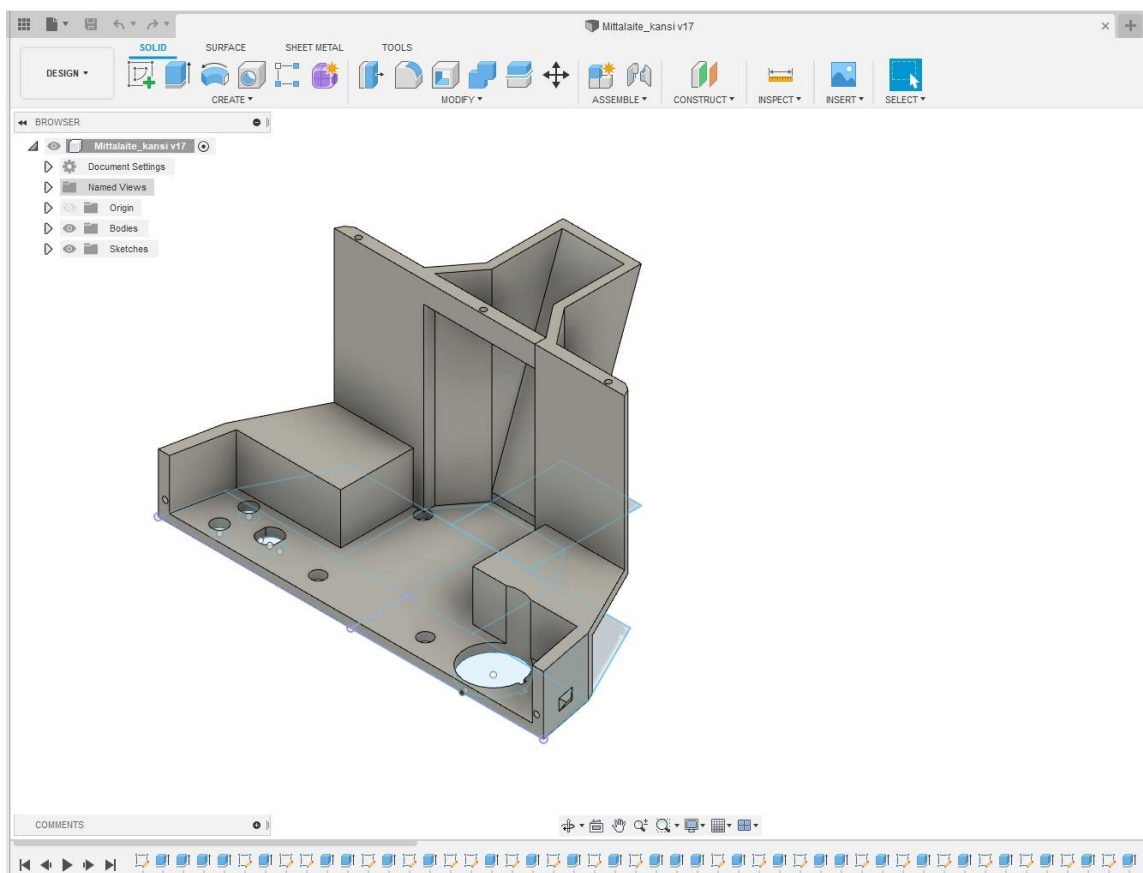
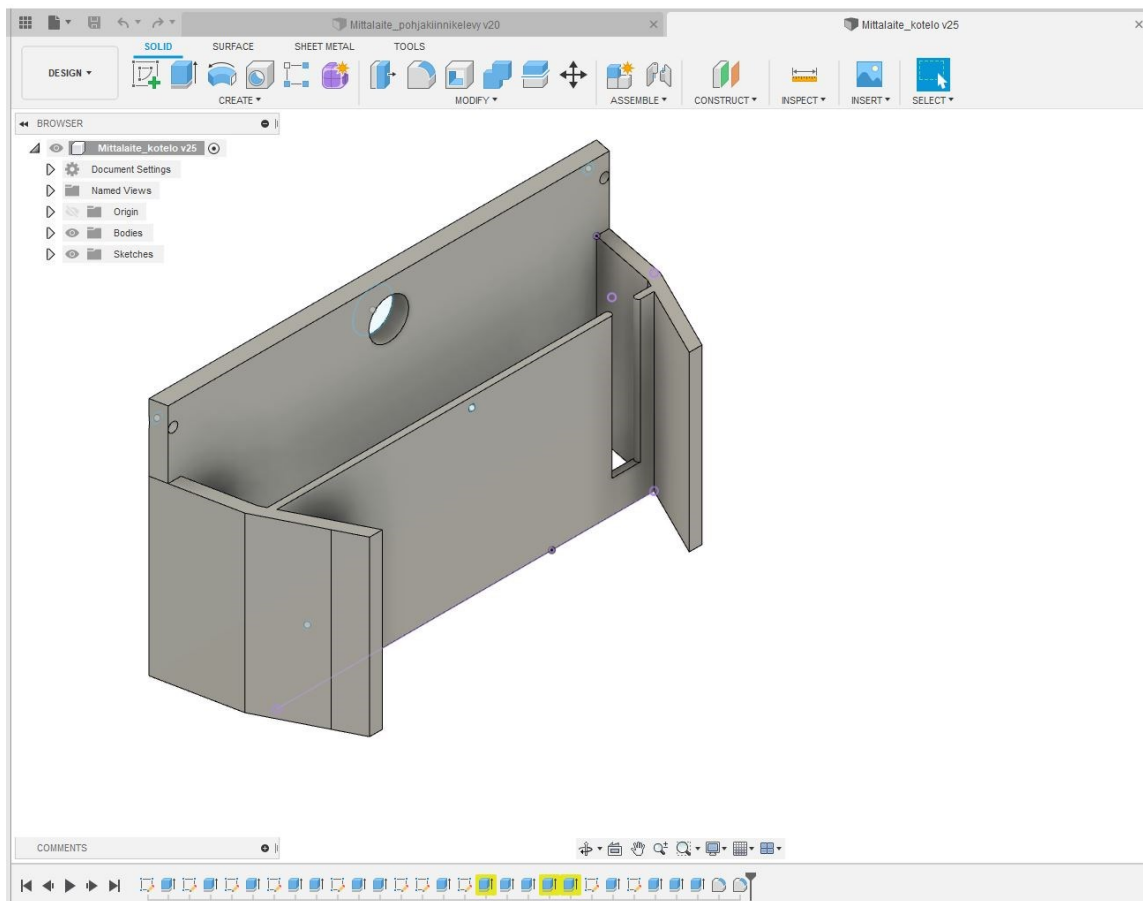
Sokero, T. 2021. Toimeksiantajan edustaja. Suulliset keskustelut keväällä 2021. Viitattu 2.8.2021.

Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkirja. p.21. Genesis Kirjat.

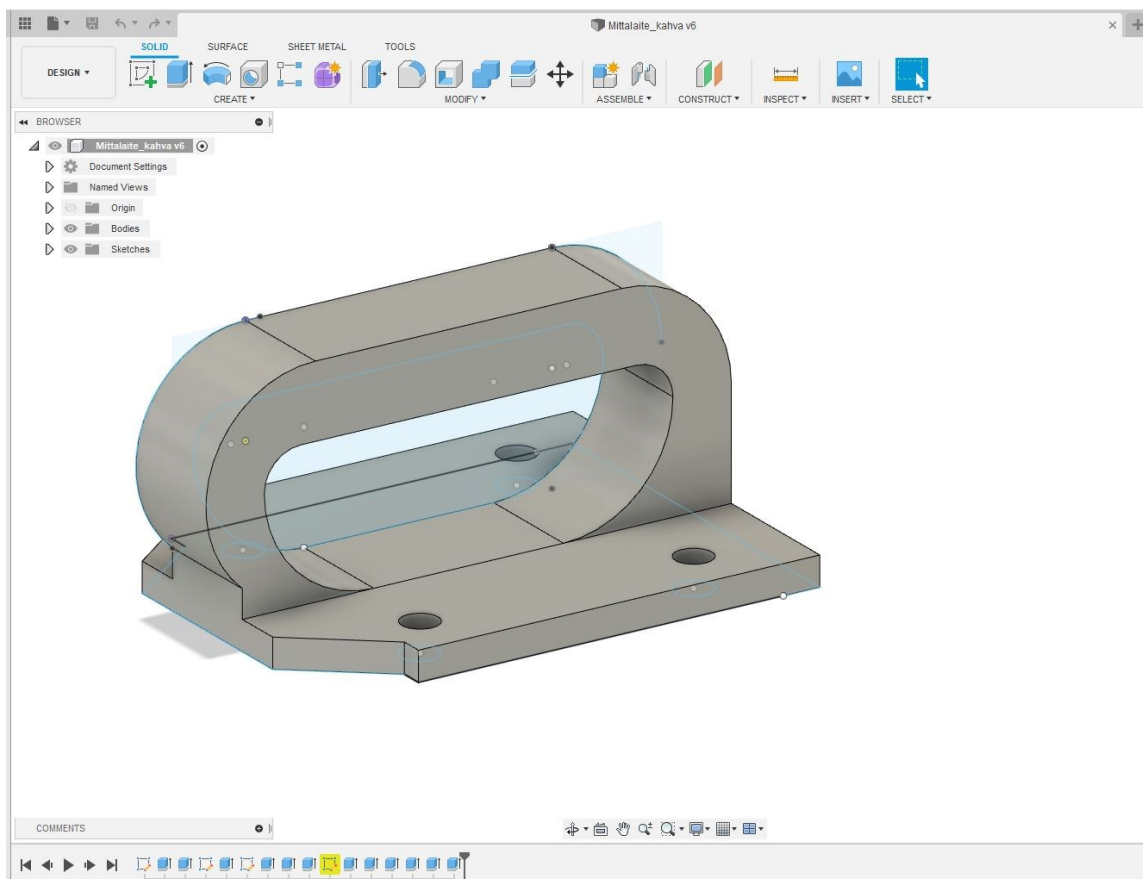
Liitteet

Liite 1. 3D – Mallinnukset kiinnitysadaptereista ja pohjalevystä (salassapidettävä)

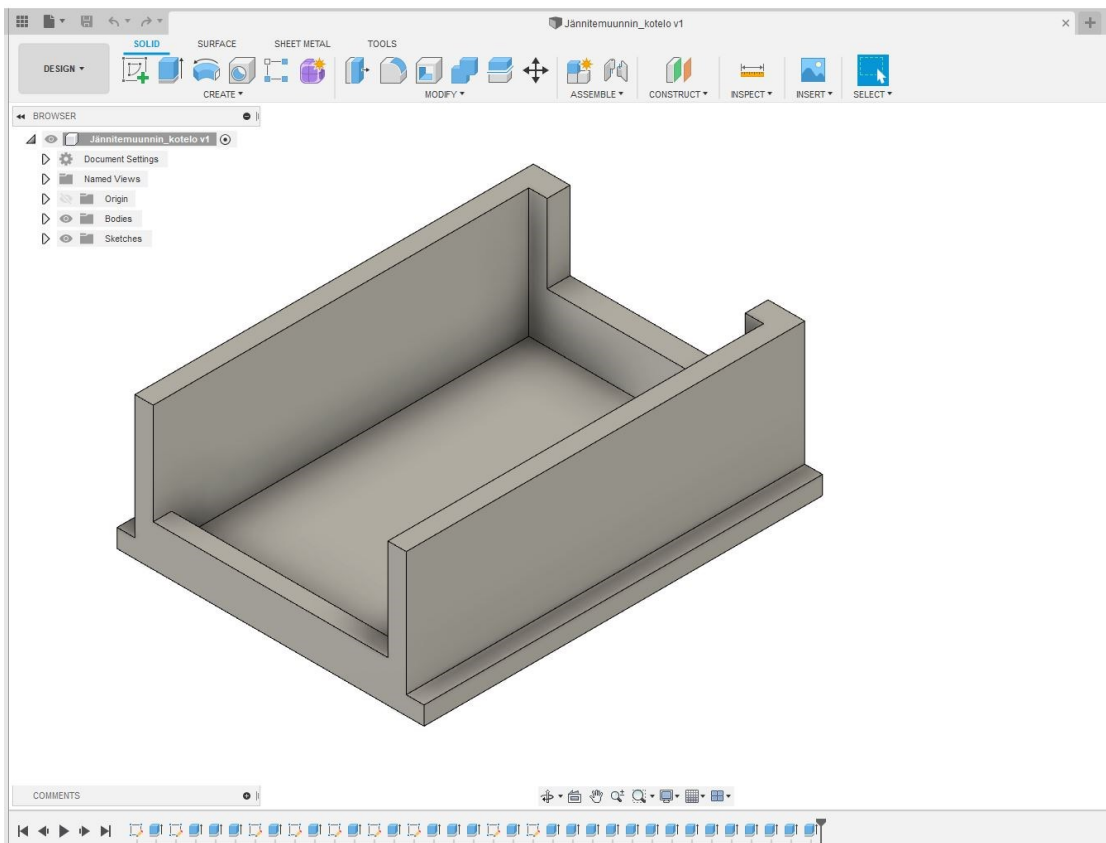
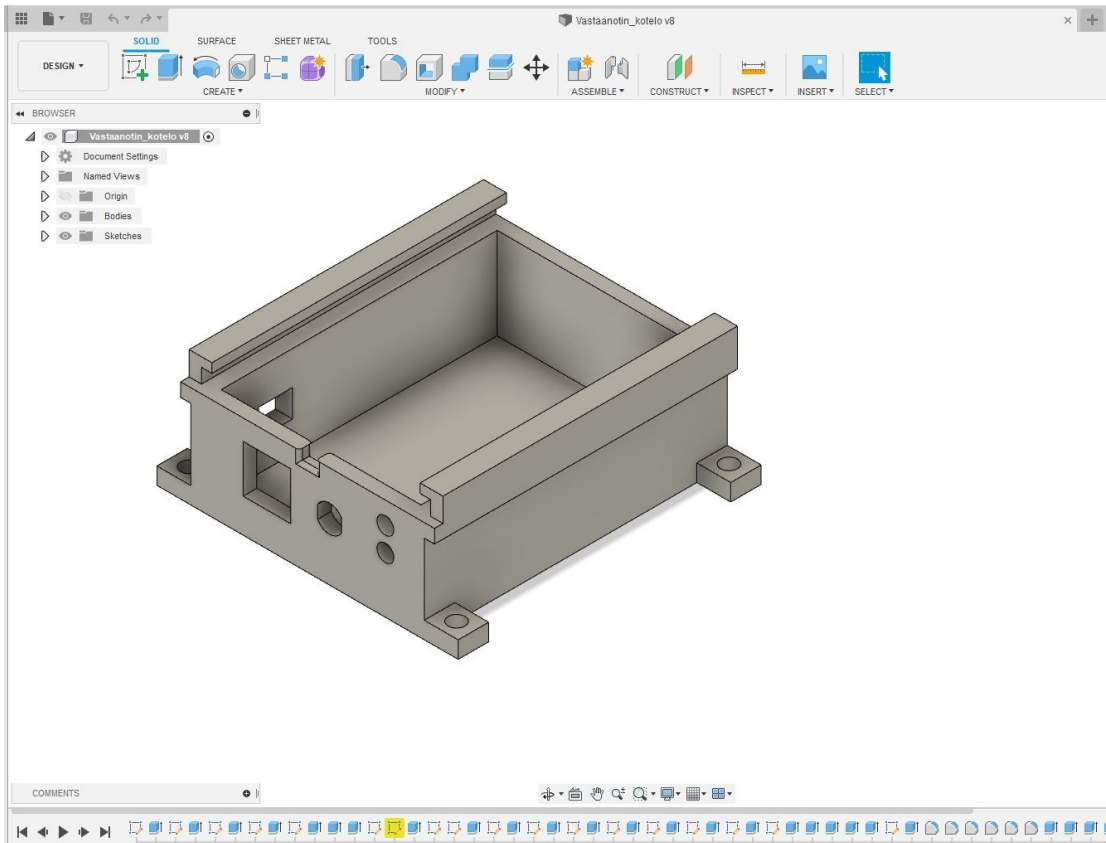
Liite 2. 3D – Mallinnukset rungon keskiosasta ja yläosasta



Liite 3. 3D – Mallinnus käyttökahvasta



Liite 4. 3D – Mallinnukset vastaanottimen ja jännitemuuntimen rungoista



Liite 5. Ensimmäinen prototyyppi työkoneen rungossa (salassapidettävä)

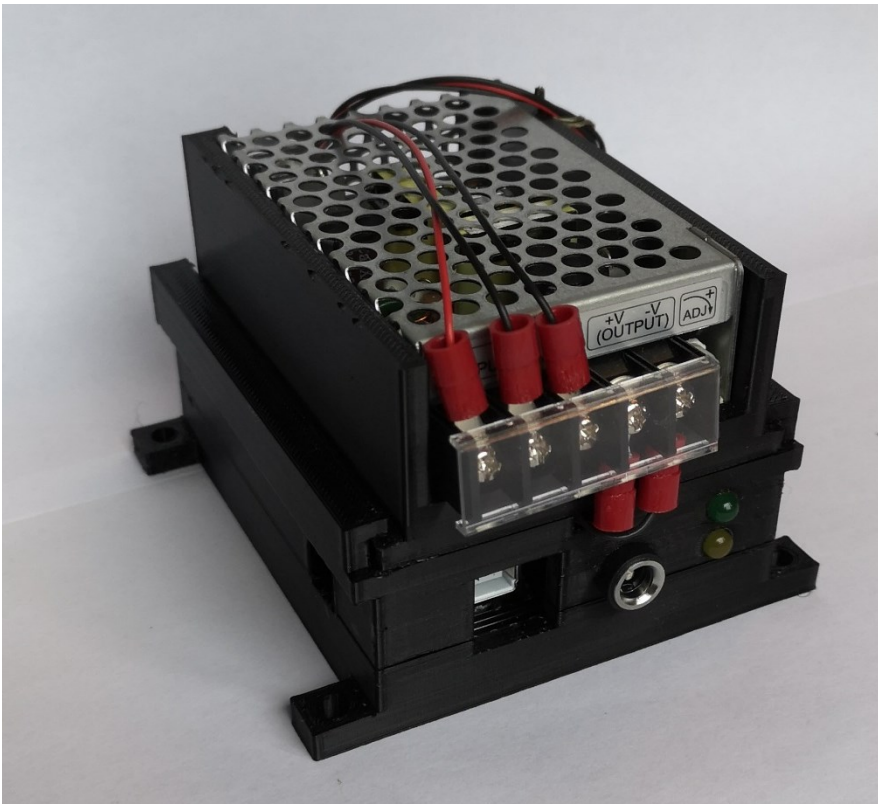
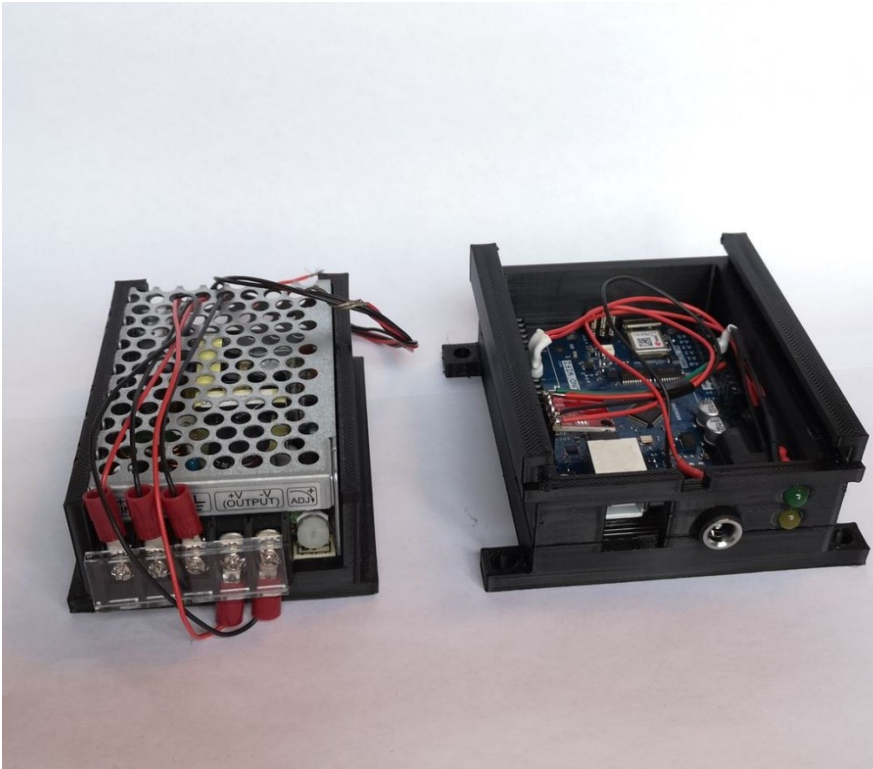
Liite 6. Valmis mittalaite työkoneen rungossa (salassapidettävä)

Liite 7. Valmis mittalaite kahdesta eri näkökulmasta (salassapidettävä)

Liite 8. Valmiin mittalaitteen sähkökytkennät (salassapidettävä)

Liite 9. Mittalaitteen kiinnitysadapterit ja pohjalevy (salassapidettävä)

Liite 10. Valmis vastaanotin ja jännitemuunnin



Liite 11. Yhteyden kantaman testaus työkoneiden läheisyydessä (salassapidettävä)