



Open your mind. LUT.  
Lappeenranta University of Technology

**KÄÄMINVALMISTUSLAITTEEN OHJAUKSEN SUUNNIT-  
TELU JA TOTEUTUS**  
**Design and implementation of control for a coil winding  
machine**

Jari-Pekka Haapala

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Jari-Pekka Haapala

## **Kääminvalmistuslaitteen ohjauksen suunnittelu ja toteutus**

2018

Kandidaatintyö.

24 sivua, 9 kuvaa ja 1 taulukko.

Tarkastaja: TkT Juho Montonen

Tässä kandidaatintyössä dokumentoidaan erityiskäämejä valmistavan laitteen ohjauksen suunnittelu, toteutus, testaus ja lopputuloksen arviointi. Työn pääasiallisena tavoitteena on etsiä sopiva laitteisto, tuottaa kytkentä ja kirjoittaa koodi, jolla kone toimii vaadittujen periaatteiden mukaisesti. Ohjauksen suunnittelua varten perehdytään laitteiston ymmärtämistä helpottavaan kirjallisuuteen ja datalehtiin. Suunniteltu toimintaperiaate toteutetaan ja testataan. Testauksen aikana mahdollisesti löydetty epäkohdat korjataan. Lopulta arvioidaan ohjauksen onnistuneisuutta ja esitetään parannusehdotuksia.

Suunnittelussa päädyttiin kahden askelmoottorin käyttöön, joita ohjataan Arduino Mega -mikrokontrollerialustan avulla. Askelmoottoreiden ohjaimille lähetetään pulssisignaaleja siten, että ne suorittavat ennalta määritellyn liikeradan. Takaisinkytkentää varten laitteeseen sijoitettiin inkrementaalinen enkooderi sekä kaksi reed-kytkintä. Reed-kytkimet varmistavat, että laitetta ei ajeta ääriasentoihinsa ja enkooderin avulla varmistetaan, että pyörimisliike toteutuu suunnitellusti.

Testauksen aikana havaittiin häiriösignaaleja, jotka korjattiin sekä lyhentämällä johtimia että muuttamalla kytkentää. Pyörimisliikkeen aikana pyöritettävän kappaleen kuuluisi pysyä keskitettynä pyörimisakselille, mutta tähän tavoitteeseen päästiin vain osittain. Tavoiteltu käämi valmistettiin onnistuneesti laitteella. Tulevaisuudessa laitetta voi parantaa esimerkiksi absoluuttisella enkooderilla, siirtämällä reed-kytkimet pyörivään kappaleeseen tai lisäämällä ylimääräisiä ohjaustapoja.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Jari-Pekka Haapala

### **Design and implementation of control for a coil winding machine**

2018

Bachelor's Thesis.

24 pages, 9 pictures and 1 table.

Examiner: D.Sc. Juho Montonen

The design, implementation and testing of a control system for a coil winding machine is presented in this thesis. The main goal of the thesis is to find the applicable equipment, make a fitting circuit and write the program that will perform the required tasks. To understand the required equipment, literature on the subject and data sheets are read on. The design is implemented and tested, during which any errors are fixed. In closing the capabilities of the machine are reviewed and improvements are proposed.

During the design process the use of two stepper motors was decided on. The motors are controlled with an Arduino Mega microcontroller board. The microcontroller sends short pulses to the stepper motor controllers and performs the determined motion cycle. An incremental encoder was connected to provide feedback data from the rotating axle. Two reed switches make sure that the machine won't end up hitting its mechanical limits during use.

Disturbance signals were present during the initial testing, a problem which was solved by shortening the wires and changing the circuit. During the rotating motion the rotated object was meant to stay exactly on the rotation axle. Due to the exact nature of the problem and the processing speed of the microcontroller, this goal was not entirely met. The requested coil was successfully made with the machine. In the future the machine can be improved for example by switching to an absolute encoder, by moving the reed switches to rest on the rotating object or by increasing the control options available to the user.

# SISÄLLYSLUETTELO

## Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Työn taustat ja asettelu .....	7
2.1	Työn taustat .....	7
2.2	Laitteen toimintaperiaate .....	8
2.3	Työn vaatimukset .....	9
3.	Laitteisto .....	10
3.1	Askelmoottorit .....	10
3.2	Arduino Mega.....	12
3.3	Kulma-anturi.....	13
3.3.1	Magneettianturi.....	13
3.3.2	Enkooderi .....	13
3.4	Reed-kytkimet .....	14
4.	Toteutus .....	15
4.1	Kytkeä .....	15
4.2	Laitteen ohjauspaneeli .....	16
4.3	Ohjaukoodin toimintaperiaate.....	17
4.4	Testaus .....	19
5.	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	22
	Lähteet .....	24

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

NEMA National Electrical Manufacturers Association, Yhdysvaltalainen  
sähkölaitteiden valmistajien liitto

$d$  halkaisija

$n$  pyörimisnopeus

$R$  välityssuhde

$T$  vääntömomentti

$v$  nopeus

### Alaindeksit

1 ensiöakseli

2 toisioakseli

pyörä hammaspyörä

rpm kierrosta minuutissa

vaaka vaakaliike

## 1. JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä dokumentoidaan kääminvalmistuslaitteen ohjauksen suunnittelu, toiminta ja toteutus. Lisäksi arvioidaan lopputulosta ja esitellään mahdollisia parannuskeinoja. Kandidaatintyö on osa suurempaa projektia, jota varten on tarvetta luoda erityisvalmisteisia käämejä. Laitte rakennetaan yhteistyönä mekaniikasta vastaavan henkilöstön kanssa, joten tämä työ käsittää vain sähköistävän puolen. Työn keskeisenä tutkimuskysymyksenä voidaan pitää seuraavaa: ”Kuinka suunniteltua kääminvalmistuslaitetta voidaan ohjata siten, että se toimii vaaditulla tavalla virheettömästi, turvallisesti sekä helppokäyttöisesti?”

Kandidaatintyön tavoitteena on löytää tarkoitukseen sopiva laitteisto, toteuttaa laitteiston integrointi sekä tuottaa ohjaava koodi. Työn rajauksen mukaisesti valittavaa laitteistoa ovat tarvittavat moottorit ja elektroniikan komponentit. Tavoitteisiin päästään käyttämällä seuraavia menetelmiä: kirjallisuustutkimus, suunnittelu, toteutus ja testaus. Kirjallisuustutkimuksessa tutustutaan aiheeseen liittyvään dokumentaatioon, kuten tieteellisiin julkaisuihin, kirjoihin, ja datalehtiin. Kirjallisuustutkimuksen perusteella voidaan suunnitella laitteen toiminta. Laitte tulee suunnitella siten, että työn tilaajan asettamat vaatimukset täyttyvät.

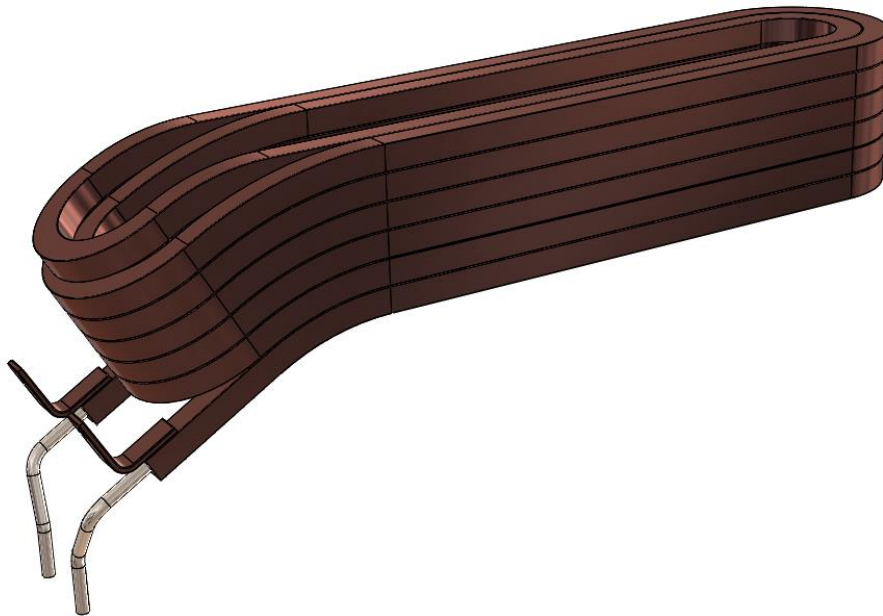
Suunnitelman valmistuttua voidaan siirtyä toteuttamiseen ja testaamiseen. Testaus on suoritettava systemaattisesti, jotta voidaan käydä läpi kaikki tilat, joihin laite on mahdollista ajaa. Vikatilanteen sattuessa tulee varmistaa, että toteutus vastaa suunnitelmaa. On myös mahdollista, että testauksen aikana palataan suunnitteluvaiheeseen. Laitteohjauksen voidaan katsoa olevan valmis, kun se toimii oletetusti kaikissa tilanteissa ja vastaa työn asettajan odotuksia.

## 2. TYÖN TAUSTAT JA ASETTELU

Tässä luvussa esitellään työn taustat sekä asetetaan laitevaatimukset. Jotkut vaatimuksista ovat työn varhaisessa vaiheessa asetettuja lukuarvoja, jotka eivät täysin vastaa lopullisia, laitteesta mitattavia arvoja. Tämä johtuu laiterakenteen tarkentumisesta projektin edetessä.

### 2.1 Työn taustat

Työn taustalla on Lappeenrannan teknillisen yliopiston projekti, jonka tavoitteena on valmistaa nestejäähdytetty sähkömoottori. Tavoitteen saavuttamiseksi on muodostettava erityisvalmisteisia käämejä. Kunkin käämin kuparivyyhden sisällä kulkee metallinen putki, jossa jäähdytysneste kulkee. Tavoiteltu käämi on esitelty kuvassa 2.1.

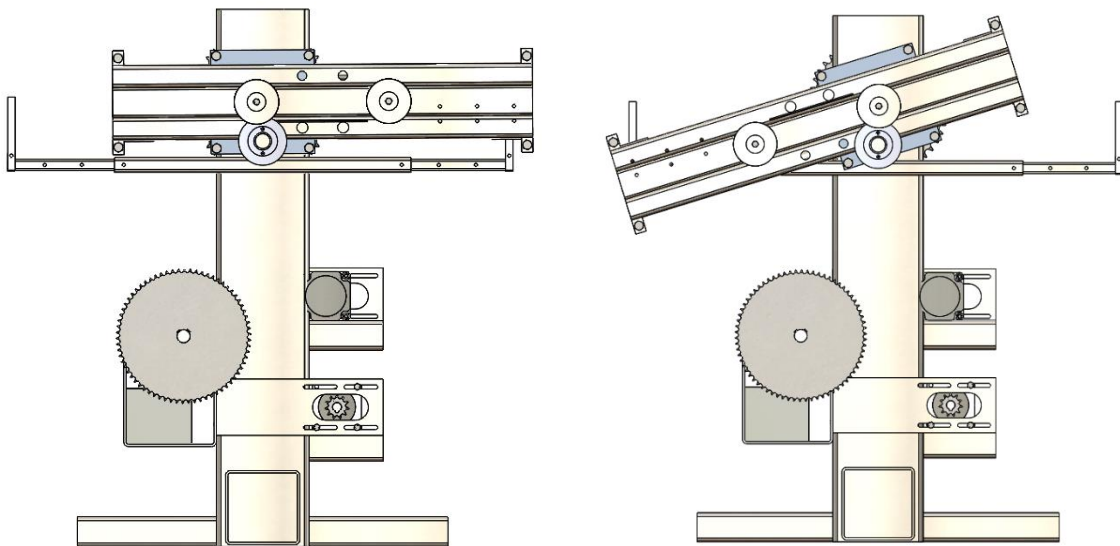


Kuva 2.1 3d-malli rakennettavasta käämistä.

Käämien poikkeavan rakenteen ja koostumuksen vuoksi niiden valmistamista varten päätettiin suunnitella työhön sopiva laitteisto. Tämä kandidaatintyö liittyy käämin kiertävän rakenteen valmistavaan koneeseen. Laitteen mekaanisen puolen suunnittelusta vastaava henkilöstö päätyi ratkaisuun, joka vaatii kahden sähkömoottorin käyttöä ennalta määritellyllä tavalla. Kandidaatintyö pitää sisällään koneen moottorivalinnat, moottoreiden ohjauksen suunnittelun ja toteutuksen, sensoritoiminnallisuudet, käyttöliittymäsuunnittelun, testauksen ja lopputuloksen arvioinnin.

## 2.2 Laitteen toimintaperiaate

Taivutuslaitteessa on kolme osiota: pyöritettävä osio, pyöritettävän osion teline, sekä ohjauspaneeli. Ohjauspaneelissa ovat laitteen käyttäjän tarvitsemat painikkeet ja telineessä sijaitsevat moottorit, ohjaimet ja sensorit. Pyöritettävässä osiossa on kaksi tankoa, joiden ympärille kuparivyyhti taivutetaan. Pyörimisliikkeen lisäksi tämä osio kykenee myös liikkumaan vaakasuunnassa toisen moottorin avulla. Vaakaliikkeessä moottorin avulla pyöritetään hammaspyörää, joka liikuttaa vastakappaleena olevaa hammastankoa vaakasuunnassa. SolidWorks-malli laitteesta on esitetty kuvassa 2.2. Kuvassa nähdään myös laitteen alaosassa sijaitsevat moottorit sekä niiden ohjaimet, mutta siitä puuttuvat hammaspyörien yhteydessä esiintyvät ketjut sekä ohjauspaneeli.



Kuva 2.2 3d-malli laitteesta, vasemmalla laitteen asento 2. vaiheen alussa, oikealla vaiheen lopussa.

Ennen toiminnan aloittamista toisen tangoista tulee olla keskitetty pyörimisakselille. Laitteen liikerata koostuu kolmesta vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa vaakaliikkeestä vastaava moottori (Moottori 1) liikuttaa kappaletta vaakasuunnassa siten, että pyörimisakseli siirtyy toisen tangon kohdalle (kuvan 2.2 vasen puoli).

Liikkeen loputtua siirrytään toiseen vaiheeseen, itse taivutukseen. Pyörimisliikkeestä vastaava moottori (Moottori 2) kääntää kappaletta vastapäivään  $200^\circ$  verran. Vaiheen aikana vaaditaan liikettä myös Moottorilta 1, sillä pyöriminen aiheuttaa väistämättä liikettä myös vaaka-akselilla hammaspyörän liikuessa hammastankoa pitkin. Siispä molempia moottoreita täytyy käyttää

yhtä aikaa, jotta kappale pysyy tarkalleen pyörimisakselilla. Toisen vaiheen jälkeinen tilanne on myös esitetty kuvassa 2.2 (oikea puoli).

Kolmannessa vaiheessa molempia moottoreita käytetään siten, että kappale pyörii päinvastaiseen suuntaan  $20^\circ$  verran. Kolmannen vaiheen loputtua kappale on jälleen vaakatasossa, ja prosessi voidaan aloittaa alusta vaiheesta 1. Yhden kokonaisen käämin valmistamiseksi tämä prosessi käydään läpi 23 kertaa.

### **2.3 Työn vaatimukset**

Työltä vaaditaan ensisijaisesti, että suunniteltu ohjaus kykenee valmistamaan määritellyt käämit. Lisäksi laitteen täytyy olla turvallinen ja vapaa toimintahäiriöistä. Käyttäjäkokemuksen kannalta on tavoiteltavaa, että käyttöliittymä on helppokäyttöinen ja intuitiivinen.

Pyörimisliikkeestä vastaavalle moottorille asetettiin vaatimus, että sen täytyy kyetä tuottamaan 1000 Nm suuruinen vääntö vaihteen jälkeisellä toisioakselilla. Vaakaliikkettä varten määritettiin vääntövaatimukseksi 200 Nm toisioakselilla. Tarkempaa, ensioakselilla vaadittua vääntöä ei suoraan asetettu, sillä vaihde mitoitetaan moottorivalinnan perusteella. Moottoreiden tulisi kyetä tuottamaan vääntö sellaisella pyörimisnopeudella, että laitteen käyttö ei ole tarpeettoman hidasta.

Laitteen käytölle asetettiin vaatimus, että vaakaliikkeessä konetta ei voida ajaa ääriasentoihinsa. Tämä johtaisi äkilliseen mekaaniseen esteeseen, joka voisi vaurioittaa laitetta. Toiminnassa tulisi välttää muitakin äkkinäisiä liikkeitä. Laitetta olisi myös voitava ajaa takaperin, mikäli käyttäjä tekee virheen käytön aikana.

### 3. LAITTEISTO

Tässä luvussa esitellään laitteisto, johon suunnitteluvaiheessa päädyttiin. Kunkin komponentin toimintaperiaatetta kuvaillaan sekä kerrotaan, mikä sen osuus on projektissa.

#### 3.1 Askelmoottorit

Askelmoottorin toiminta perustuu hammastettuun, magnetisoituun roottoriin ja staattorin vaihekäämityksen magneettikenttään. Muuttamalla käämeissä kulkevaa virtaa, magneettikentän asento muuttuu, jolloin roottori pyrkii asettumaan uuden magneettikentän määrittämään asentoon. Käämien aktivointia ohjaa kontrolleri, joka muuttaa tilaansa siihen syötettyjen pulssien perusteella. Näin ollen oikein käytettynä askelmoottorin pyörimiskulman muutos on suoraan verrannollinen kontrollerille syötettyjen pulssien määrään.

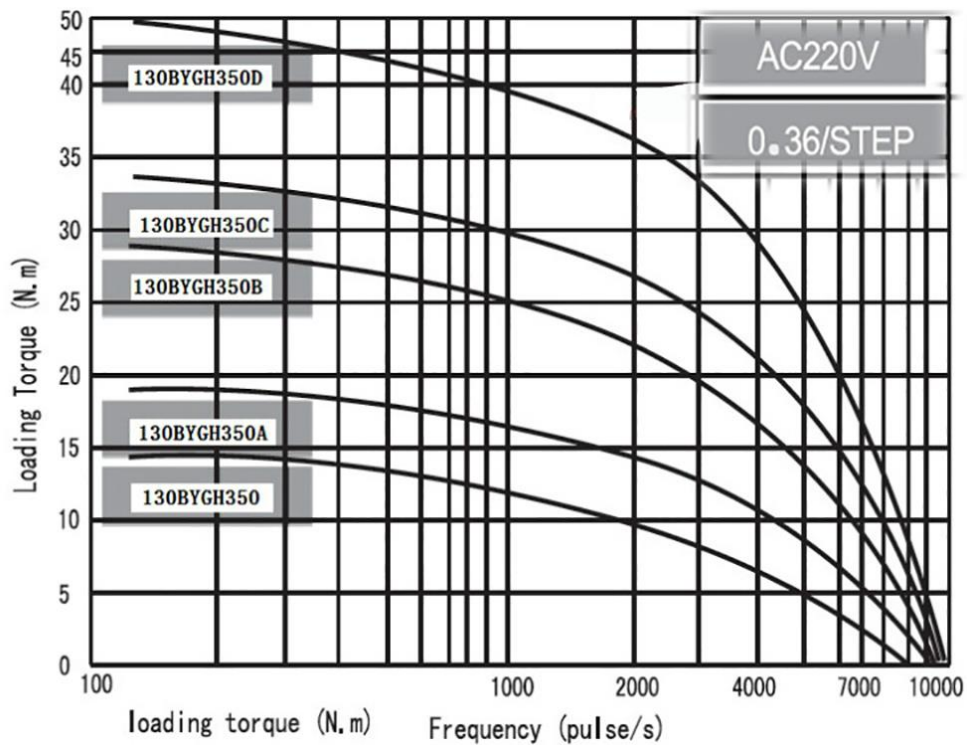
Magneettikenttää pidetään jatkuvasti yllä, joten askelmoottorille voidaan määrittää pitomomentti, joka kertoo roottoria paikallaan pitävän voiman suuruuden. Tässä sovelluksessa pitomomentin riittävä suuruus on tärkeää, sillä pyöritettävä kappale pyrkii jatkuvasti tasapainoasemaansa. Toisaalta on otettava myös huomioon moottorin toiminta suurella pulssitaajuudella. Induktanssin vuoksi käämeissä oleva virta nousee huippuarvoonsa vasta piirin resistanssin ja induktanssin määrittämän aikavakion kuluttua. Koska käämin aiheuttama voima on suoraan verrannollinen siinä kulkevaan virtaan, liian suurella pulssitaajuudella moottorin vääntömomentti laskee. Tästä syystä askelmoottorivalinnassa tulee ottaa huomioon sen vääntövoima pulssitaajuuden funktiona. (Gray 1989, 323-339)

Mottorityypiksi valittiin askelmoottori tarkan ohjattavuuden, pitomomentin, sekä kustannusten takia. Valittu moottori on kiinalainen, NEMA 52 -luokiteltu askelmoottori, jonka nimellisvirta on 6.9 A ja nimellisvääntömomentti 50 Nm. NEMA on lyhenne sanoista National Electrical Manufacturers Association, jonka standardin mukaan luokitellun askelmoottorin nimessä ilmoitetaan moottorin halkaisija (National Electrical Manufacturers Association 2001, 84). Käytetyn moottorin halkaisija on siis 5,2 tuumaa. Moottorin kanssa yhteensopiva ohjain on 3MA2280-10A, joka vie askelmoottorille kolmivaiheista virtaa sille annettujen pulssisignaalien perusteella. (FastToBuy 2018)

Moottorin vääntö ei yksinään riitä määritellyn momentin 1000 Nm tuottamiseen, joten sen ohella täytyy käyttää vaihdetta. Moottoria voidaan ajaa pulssitaajuudella 1500 pulssia/s, joka saa kuvan 3.1 perusteella aikaan ensiöakselilla momentin n. 37 Nm. Käyttämällä vaihdetta, jonka välityssuhde on 26, saadaan toisioakselille vääntömomentti

$$\begin{aligned} T_2 &= RT_1 & (2.1) \\ &= 26 \cdot 37 \text{ Nm} \\ &= 962 \text{ Nm}, \end{aligned}$$

joka on riittävän lähellä laitteen suunnitteluvaiheessa hieman ylimitoitettua arvoa 1000 Nm. Yhtälössä (2.1)  $T_1$  on ensiöakselin vääntömomentti,  $T_2$  on toisioakselin vääntömomentti ja  $R$  on käytetyn vaihteen välityssuhde.



Kuva 3.1 Valitun askelmoottorin 130BYGH350D vääntömomentti pulssitaajuuden funktiona (FastToBuy 2018).

Pulssitaajuus 1500 pulssia/s vastaa kuvan 3.1 perusteella pyörimisnopeutta 90 rpm, joten toisioakselilla pyörimisnopeus on

$$\begin{aligned}
 n_{2,\text{rpm}} &= \frac{n_{1,\text{rpm}}}{R} & (2.2) \\
 &= \frac{90 \text{ rpm}}{26} \\
 &\approx 3,5 \text{ rpm}.
 \end{aligned}$$

Yhtälössä (2.2)  $n_{1,\text{rpm}}$  on pyörimisnopeus kierroksina minuutissa ensiöakselilla ja  $n_{2,\text{rpm}}$  on pyörimisnopeus toisioakselilla. Laskun perusteella yhden  $200^\circ$  pyörimisliikkeen toteuttamiseen kuluu valitulta askelmoottorilta noin 9,5 sekuntia, mikä on käyttötarkoitukseen sopiva nopeus.

Vaakaliikettä varten valittiin samanlainen moottori sopivan vääntömomentin vuoksi. Toisioakselilla erilaisen vääntömomentin tuottamista varten tarvitaan erilainen vaihde. Käyttämällä vaihdetta, jonka välityssuhde on 5,2 ja laskemalla arvot yhtälöistä (2.1) ja (2.2) pulssitaajuuden 1000 pulssia/s perusteella, toisioakselille saadaan toisioakselin vääntömomentiksi 203 Nm pyörimisnopeudella 11,5 rpm. Vaakaliikkeen hammastankosovelluksessa hammaspyörän halkaisija  $d_{\text{pyörä}} = 100 \text{ mm}$  ja yhden vaakaliikkeen aikana kuljettava matka on 324 mm. Vaakaliike kulkee siis nopeudella

$$\begin{aligned}
 v_{\text{vaaka}} &= \frac{n_{\text{pyörä},\text{rpm}}}{60} \cdot 2\pi \frac{d_{\text{pyörä}}}{2} & (2.3) \\
 &= \frac{11,5 \text{ rpm}}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{100 \text{ mm}}{2} \\
 &\approx 60 \frac{\text{mm}}{\text{s}}.
 \end{aligned}$$

Yhtälössä (2.3)  $v_{\text{vaaka}}$  on kappaleen siirtonopeus vaakaliikkeen aikana,  $n_{\text{pyörä},\text{rpm}}$  on hammaspyörän pyörimisnopeus ja  $d_{\text{pyörä}}$  on hammaspyörän halkaisija. Lasketun nopeuden perusteella yhden 324 mm pituisen vaakaliikkeen suorittamiseen kuluisi noin 5,4 sekuntia. Nopeus on käyttötarkoitukseen sopiva.

### 3.2 Arduino Mega

Arduino Mega on Atmel ATmega2560 -mikrokontrolleriin perustuva elektroniikan ohjaustoimintojen kehitysalusta. Arduino-käsike pitää sisällään sekä kaupallisen ohjauselektroniikan tuotesarjan että avoimen lähdekoodin ohjelmointiympäristön, joka on käytettävissä yhteensopivien mikrokontrollerien kanssa. Arduino Mega on varustettu 54:llä

sisään- tai ulostulopinnillä, 16:lla analogisen sisääntulon pinnillä, sekä lisätyllä muistikapasiteetilla muihin Arduino-tuotesarjan ohjaimiin verrattuna. (Arduino LLC 2018)

Työhön valittiin ohjauskontrolleriksi Arduino Mega sen helppokäyttöisen ja prototyypistäväällisen toimintatapansa vuoksi. Kontrolleria käytetään ohjauspulssien lähettämiseen askelmoottorin ohjaimille, sensorien ja kytkimien lukemiseen sekä ohjauslogiikan toteuttamiseen. Arduino IDE -ohjelmointiympäristössä valmistetaan suunnitellut toiminnot toteuttava C/C++ -kielinen koodi, joka viedään kontrollerille.

### **3.3 Kulma-anturi**

Jotta voitaisiin varmistaa, että laite on pyörinyt juuri sen kulman verran, jonka koodi määrittää, on järkevää käyttää kulma-anturia pyörimisakselin päädyssä. Kulma-anturin käyttö auttaa myös sietämään mahdollisia vikatilanteita, joissa pyörimisliike ei toteudu oletetulla tavalla. Anturivalintaa varten testattiin kahta eri tyyppiä.

#### **3.3.1 Magneettianturi**

Magneettianturin toiminta perustuu Hall-ilmiötä mittaaviin elementteihin. Elementeiltä saatava signaali vahvistetaan ja viedään signaalinkäsittelypiirille. Anturin lähdestä saadaan jännitesignaali, joka muuttuu mikropiirin yllä olevan magneetin asennon mukaan. (AKM 2013)

Magneettianturi antaa absoluuttisen kulma-arvon, joten sen antaman signaalin avulla voidaan varmistaa pyörimiskulman arvo millä vain hetkellä. Anturin käyttö kumminkin hylättiin sen tarkkuuden vuoksi. Jo laitteen liikkeestä johtuvat värähtelyt riittivät häiritsemään signaalia suodatuskelvottomaksi.

#### **3.3.2 Enkooderi**

Magneettianturin osoittauduttua laitteeseen sopimattomaksi, se vaihdettiin inkrementaaliseen enkooderiin CI-11 (Piher Sensors & Controls n.d.). Inkrementaalinen enkooderi perustuu sen sisällä olevaan levyyn, jonka pyöriessä enkooderin lähtöjen kontaktit muuttuvat. Yhden kierroksen aikana sama kontaktisekvenssi toistuu ennalta määritellyn lukumäärän verran, jonka perusteella kulman muutos voidaan laskea. (Fraden 2004, 282-283)

Anturin pyörivä osuus kiinnitetään suoraan pyörimisakselille ja anturin runko pidetään paikallaan telineessä. Sensorilta saadaan Gray-koodin muodossa enkoodattua signaalia, joka viedään Arduino Mega:lle. Ohjaimen tulee lukea enkooderin lähtöjä ja laskea niiden muuttuvan tilan perusteella toteutunut kulman muutos. Mikäli kulman muutos vastaa odotettua, ohjain jatkaa toimintaansa normaalisti. Mikäli kulman muutoksessa havaitaan epätarkkuuksia, suoritettavaa liikettä tulee korjata lisäämällä tai vähentämällä moottorin ohjaimelle lähetettäviä pulsseja.

### **3.4 Reed-kytkimet**

Työn vaatimuksissa esitettiin, että vaakaliikkeen aikana laitetta ei tulisi voida ajaa sen ääriasentoihinsa. Tätä varten tarvitaan anturit, jotka tunnistavat vaakaliikkeen tilan. Helppokäyttöisyyttä ajatellen päädyttiin reed-kytkimiin. Reed-kytkimen toiminta perustuu kahteen johtavaan kieleen, jotka magneettikenttään joutuessaan kiinnittyvät toisiinsa ja samalla sulkevat piirin, johon ne on kytketty. Valittu kytkin on Meder Electronics:in valmistama MK04-1A66B-500W (Meder Electronics 2012).

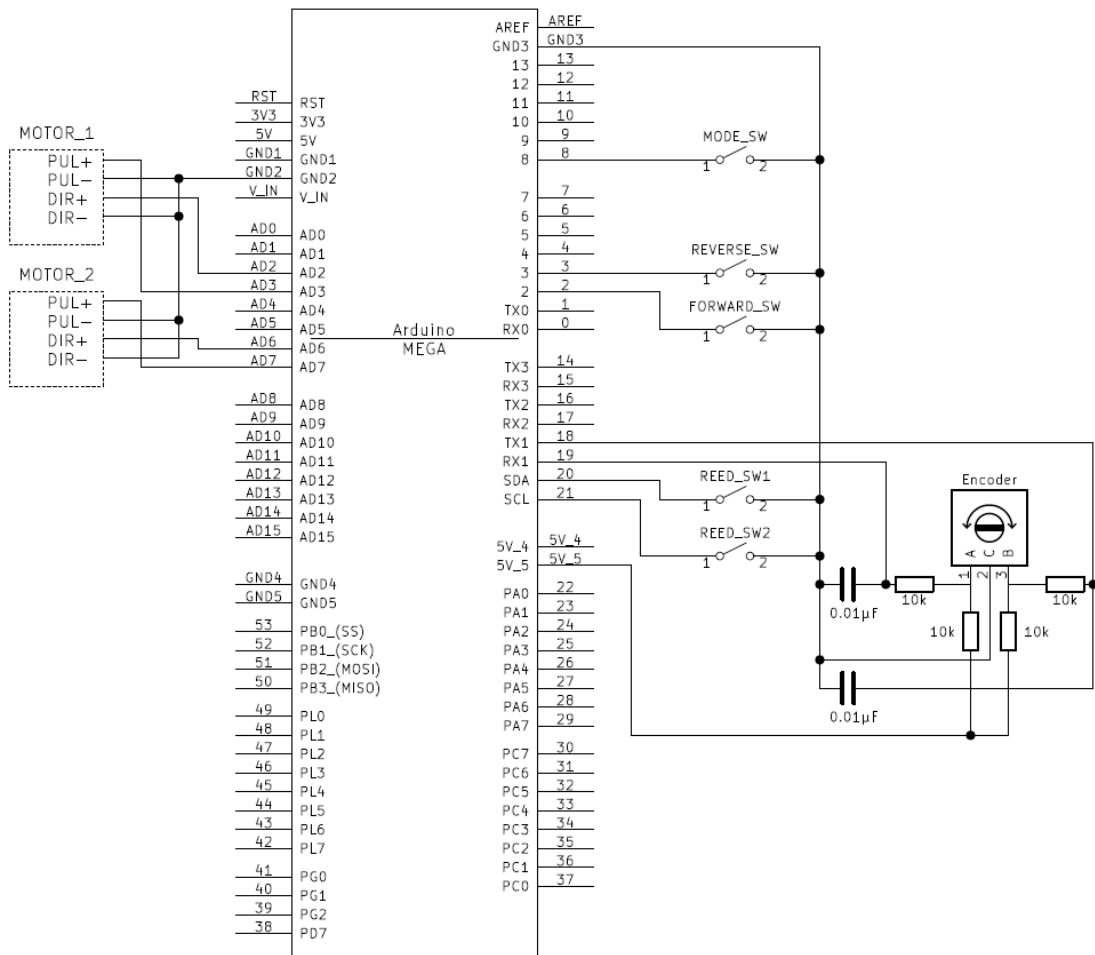
Reed-kytkimet sijoitetaan laitteen runkoon vaakaliikkeen ääripäihin. Liikkuvan kappaleen päätyihin asetetaan magneetit siten, että ne aktivoivat telineen reed-kytkimet lähellä ääriasentoja. Kun kytkin sulkee ohjaimen yhdistetyn piirin, koneen kaikki toiminnot keskeytetään. Vaakaliikkeestä vastaavaa moottoria liikutetaan päinvastaiseen suuntaan, kunnes reed-kytkin ei enää ole magneettikentässä. Tämän jälkeen toimintoja jatketaan normaalisti. Reed-kytkimien telineet rakennetaan myös siten, että niiden paikkaa voidaan muuttaa vaaka-akselilla, mikäli se katsotaan tarpeelliseksi.

## 4. TOTEUTUS

Tässä luvussa käydään läpi laitteen toteutustapa sekä sen testaus. Kolmessa ensimmäisessä alaluvussa käsitellään laitteen toteutus- ja toimintatappaa. Testaus-alaluvussa käsitellään testausvaiheen toimenpiteitä, ilmenneitä ongelmia sekä niiden ratkaisuja.

### 4.1 Kytcentä

Alla olevassa kuvassa 4.1 on esitetty käytettävä kytkentä ohjaukselle. Pinneihin 2, 3, 8, 20 ja 21 on yhdistetty tarvittavat kytkimet, jotka yhdistyvät suoraan maahan. Käyttämällä Arduino Mega:n sisäistä pullup-resistoria tämä kytkentä toimii kytkimen lailla.



Kuva 4.1 Laitteen ohjauksessa käytettävä kytkentä

Pinneihin 18 ja 19 on kytketty enkooderin lähdöt. Valitut pinnit kykenevät Arduinon interrupt-toimintoon, joka keskeyttää koodia suorittaessa muut toiminnot vastataksien

kyseisiltä pinneiltä saatuun signaaliin. Näin varmistetaan, että enkooderilta saatavia signaaleja ei jätetä väliin. Enkooderi on yhdistetty sen datalehdessä (Piher Sensors & Controls n.d.) suositeltuun kytkentään, joka on häiriösietoinen. Käytetty RC-kytkentä estää jännitteen välittömän nousun tai laskun sen kapasitiivisen ominaisuuden vuoksi, estäen lyhytaikaisten häiriöpulssien syntymisen.

Moottorinohjaimien pinneihin PUL+ ja DIR+ on kytketty Arduino Mega:n ulostulot ja pinnit PUL- ja DIR- on kytketty maahan. Lähettämällä PUL+ -pinnille vähintään 5  $\mu$ s kestävä jännitepulssi (FastToBuy 2018) moottorinohjain liikuttaa askelmoottoria yhden askeleen verran. Moottorin pyörimissuuntaa voidaan muuttaa kytkemällä DIR+ -pinnille jännite. Näiden kahden toiminnon lisäksi moottorinohjaimilla on pinnit ENA+ ja ENA-, joita käyttämällä moottorin toiminta voidaan keskeyttää. ENA-pinnien käytöstä ei tässä sovelluksessa ole hyötyä, sillä moottorien tulee olla jatkuvasti toiminnassa. Tästä syystä kytkentä jätettiin tekemättä.

#### 4.2 Laitteen ohjauspaneeli

Kuten kuvasta 4.1 havaitaan, käyttöliittymä koostuu kolmesta kytkimestä. Kolmea kytkintä ja niiden toimintoja kuvaavat nimet Mode, Forward ja Reverse. Alla olevassa kuvassa 4.2 nähdään laitetta varten tuotettu ohjauspaneeli.



Kuva 4.2 Laitteen ohjauspaneeli

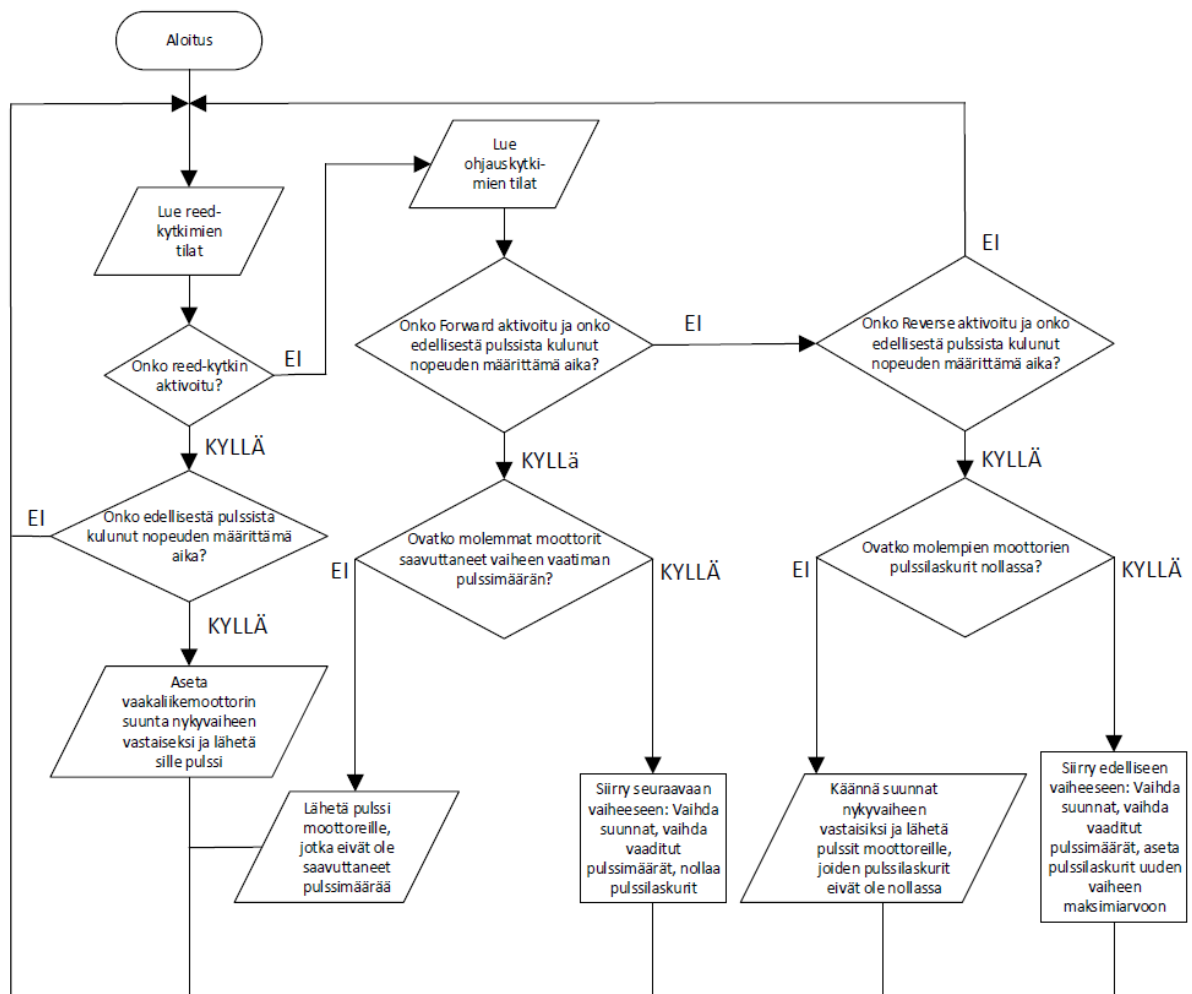
Alhaalla sijaitseva kiertokytkin on 3-asentoinen ja palautuva. Kytkimen ollessa pystyasennossa koneen liike on pysäytetty. Kun kytkintä kierretään myötäpäivään, Forward-piiri sulkeutuu. Vastaavasti kytkintä kierrettäessä vastapäivään, Reverse-piiri sulkeutuu. Kun kytkimestä päästetään irti, se palautuu pystyasentoon.

Mustista painonapeista vasemmanpuoleinen vastaa Mode-kytkennästä. Napin yläpuolella oleva LED-valo ilmoittaa nykyisen tilan, jota vaihdetaan Mode-napin avulla. Oikeanpuoleinen painonappi lisättiin paneeliin mahdollisia ylimääräisiä toimintoja varten, mutta tämän työn puitteissa sen kanssa ei ole assosioitu toimintoja. Lopuksi ohjauspaneelin vasemmalta puolelta löytyy painike, joka kytkee välittömästi kaikki sähköt pois koneesta, sekä ohjaimelta että moottoreilta. Tätä nappia tulee painaa odottamattoman vika- tai vaaratilanteen sattuessa.

### **4.3 Ohjaukoodin toimintaperiaate**

Mode-napin avulla vaihdetaan laitteen toimintatapaa kolmen tilan välillä: päätila sekä kaksi manuaalikäytön tilaa. Päätilassa laite liikkuu alaluvussa 2.2 esiteltyjen kolmen vaiheen mukaisesti. Manuaalikäytön tiloja on kaksi: vaaka- ja pyörimisliikkeen tilat. Vaakaliikkeen manuaalitulassa Moottoria 1 liikutetaan hitaasti kytkimen kääntösuunnan mukaan myötä- tai vastapäivään. Pyörimisliikkeen manuaalitila toimii samalla periaatteella, pyörittäen sekä Moottoria 1 että Moottoria 2, jotta kappale ei liiku pyörimisakselin suhteen. Tilan vaihtaminen toimii siten, että manuaalikäytöllä on mahdollista tehdä korjausliikkeitä; ohjaimen on muistettava mihin tilanteeseen päätilassa jäätin manuaalikäytön aikana. Manuaalitulassa ohjauspaneelin LED-valoa vilkutetaan hitaasti, jos käytetään vaakaliikettä, ja nopeasti, jos käytetään pyörimisliikettä. Päätilassa LED-valo on jatkuvasti päällä.

Päätila toimii ennalta määriteltyjen suuntien ja liikepituuksien perusteella. Tästä syystä täytyy pitää yllä pulssilaskureita, jotka pitävät huolen, että moottoriohjaimille lähetetään täsmälleen oikea määrä pulsseja kussakin vaiheessa. Forward-käytössä pulssilaskurin arvoa kasvatetaan käytön aikana, kunnes vaiheen maksimiarvo saavutetaan. Tällöin vaihe vaihdetaan seuraavaan, asetetaan uudet maksimiarvot kummankin moottorin pulssilaskureille ja käännetään moottorien suunnat uuden vaiheen mukaisiksi. Reverse-käytössä pulssilaskurin arvoa vähennetään jokaisen pulssin kohdalla, kunnes saavutetaan nolla ja siirrytään edelliseen liikkeeseen. Päävaiheen toimintaperiaatteesta on esitetty kulkukaavio kuvassa 4.3.



Kuva 4.3 Päätilan yksinkertaistettu kulkukaavio

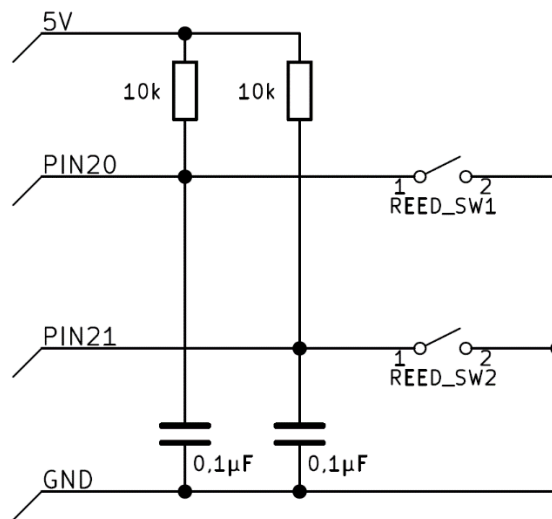
Ennen kuin mitään muuta tehdään koodissa, tarkistetaan, ovatko reed-kytkimet aktivoitu. Aktivoinnin sattuessa vaakaliikkeen suunta vaihdetaan käänteiseksi verrattuna aktivointia edeltäneeseen suuntaan. Moottorille 1 lähetetään pulsseja niin kauan, että laite on ajettu pois ääriasennon lähetyviltä.

Mode-toimintojen kuvaamisen lisäksi kuvan 4.3 kulkukaaviosta on jätetty pois enkooderin toiminta, sillä se toimii pääsilmukan ulkopuolella interrupt-toiminnon kautta. Kun interrupt-toimintoon yhdistetty pinni havaitsee muutoksen tulon signaalissa, sen kanssa assosioitu toiminto käsitellään välittömästi. Enkooderin lähtöjen signaaleiden kanssa assosioitu funktio laskee nykyisen kääntökulman sekä vertaa sitä ennakoituun kääntökulmaan. Mikäli arvot poikkeavat yli  $2^\circ$ , pulssilaskurin arvoa muutetaan lisäämällä tai vähentämällä siitä poikkeaman verran pulsseja. Siispä poikkeama hävitetään automaattisesti nykyisen tai seuraavan liikkeen aikana.

#### 4.4 Testaus

Ennen systemaattisen testaamisen alkamista laitteen huomattiin tuottavan häiriöpulsseja tiheään tahtiin. Nämä pulssit johtuivat lähes täysin liian pitkistä johtimista sekä huonoista liitoksista. Ongelma ratkaistiin korvaamalla vanha, reikälevystä ja kytkentäjohdoista valmistettu kytkentä piirilevyllä.

Piirilevystä huolimatta reed-kytkimien havaittiin tuottavan runsaasti häiriösignaaleja. Matka mikrokontrollerin sijainnista reed-kytkimien telineisiin on huomattavan pitkä, eikä matkaa saa lyhennettyä mielekkäin keinoin. Häiriöiden estämiseksi kytkentää muutettiin siten, että reed-kytkimien yhteyteen syntyy RC-piiri. Kapasitanssin ansiosta yksittäiset häiriöpulssit eivät enää päässeet mikrokontrollerille asti ja ongelma hävisi täysin. Korvaava kytkentä reed-kytkimille on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4 Häiriösietoinen kytkentä reed-kytkimille

Jotta testaus olisi kattava, laitteen tilat täytyy käydä systemaattisesti läpi ja varmistaa, että niissä ei tapahdu toimintahäiriöitä. Tilojen läpiajon lisäksi tälle laitteelle on keskeistä, että liikkeet ovat oikean pituisia. Taulukossa 4.1 on esitetty läpikäytyt testit sekä laitteen suoriutuminen niistä. Testit suoritettiin edellä mainittujen korjausten jälkeen. Huomattavaa on, että tätä testiä varten enkooderi otettiin pois käytöstä. Mikäli liikkeet ovat väärän pituisia, enkooderi pyrkii väistämättä ohjaamaan laitetta suunnitellun vastaisesti. Enkooderi tulee lisätä vasta tämän seikan varmistuttua.

Taulukko 4.1 Laitteelle suoritettut testit ja niiden tulokset

Testin kuvaus	Läpäisikö laite testin?
Laitteen normaali Forward-ajo	Kyllä
Laitteen normaali Reverse-ajo	Kyllä
Vaakaliikkeen manuaaliajo	Kyllä
Pyörimisliikkeen manuaaliajo	Kyllä
Reed-kytkimet toimivat kaikissa vaiheissa	Kyllä
Tilan vaihtaminen toimii kaikissa vaiheissa (Mode)	Kyllä
Virrankatkaisupainike toimii	Kyllä
Vaakaliike on oikean pituinen	Korjattava
Pyörimisliike on oikean pituinen, Moottori 1	Korjattava
Pyörimisliike on oikean pituinen, Moottori 2	Kyllä
Pyörimisliikkeen aikana tanko pysyy tarkasti pyörimisakselilla	Korjattava

Laite läpäisi perustoimintaan ja ohjauslogiikkaan liittyvät testit, mutta liikkeisiin liittyviin numeroarvoihin jäi parantamisen varaa. Laitetta käytettäessä havaittiin, että laskettu pulssimäärä ei vienyt vaakaliikettä tarkasti tangolta toiselle. Ongelma korjattiin mittaamalla virheellisen matkan pituus ja lisäämällä matkaa vastaava määrä pulsseja. Samankaltainen ongelma havaittiin pyörimisliikkeen aikana, jolloin Moottori 1 liikutti kappaletta liikaa oikealle. Korjaus tehtiin samalla tavalla, muuttamalla moottorinohjaimelle vietyjen pulssien määrää.

Hankalammaksi ongelmaksi osoittautui keskitetyn tangon paikallaan pitäminen pyörimisen aikana. Vaikka tanko aloitti ja lopetti liikkeen pyörimisakselille, se liikkui sekä vaaka- että pystysuunnassa liikkeen aikana. Pystysuuntainen liike johtui mekaanisista osista, joita ei oltu täysin keskitetty akselille. Vaakasuuntainen liike johtui Moottorin 1 ja Moottorin 2 epäsynkronisuudesta liikkeen aikana. Molempia moottoreita tulisi ajaa koko liikkeen ajan sellaisella nopeudella, että Moottori 1 tarkasti kompensoisi pyörimisliikkeen aiheuttaman siirroksen vaaka-akselilla. Lasketut nopeudet eivät toimineet, sillä Arduino Mega ei kyennyt sellaiseen suoritusnopeuteen, että ne toteutuisivat tarkasti. Pystysuunnan ongelma korjattiin

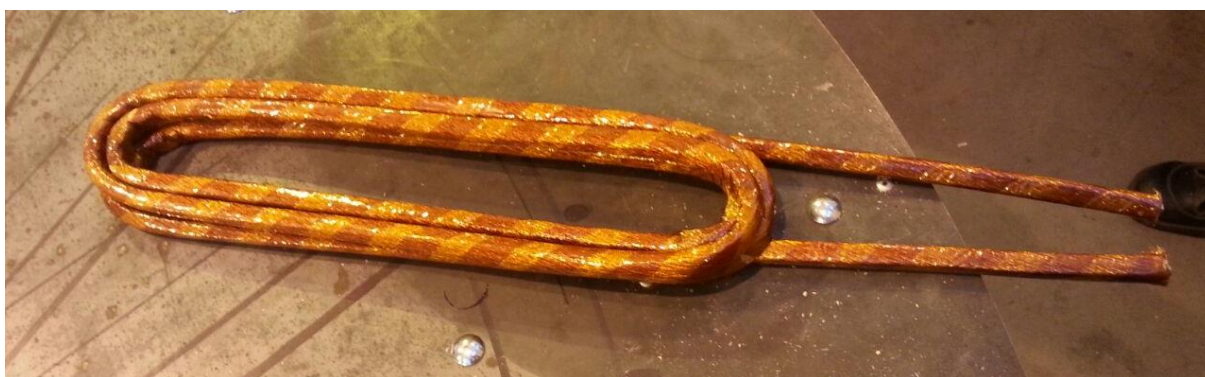
siirtämällä mekaanisia osia virheellisen matkan verran. Vaakasuunnan liikkestä eliminoitiin suurin osa haarukoimalla suorituskyvyn puitteisiin sopivat arvot toimintanopeudelle.

## 5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennetun laitteen toimintakykyä arvioidaan suunnitteluvaiheessa asetettujen vaatimusten perusteella. Laite kykenee valmistamaan suunnitellun käämin työn asettajan määrittämällä tarkkuudella. Alaluvussa 4.4 esitellyn testauksen aikana esiintyneet ongelmat korjattiin lähes täysin, eikä muita toimintahäiriöitä havaittu. Laitteen käyttö saatiin myös tavoitellun yksinkertaiseksi. Kuvassa 5.1 on esitetty valmis laite yhdessä kaapelinsyöttökelan sekä kuparivyyhden suoristavan mankelin kanssa. Kuvassa 5.2 on esitetty ensimmäinen laitteella valmistettu kokonainen käämi.



Kuva 5.1 Oikealla rakennettu kääminvalmistuslaite, vasemmalla kaapelinsyöttökela sekä mankeli.



Kuva 5.2 Laitteella valmistettu käämi. Tämän vaiheen jälkeen käämi vielä puristetaan lopulliseen muotoonsa, Kuvan 2.1 mukaiseksi.

Projektin jatkoa varten voidaan luetella mahdollisia parannuskohteita. Laitteen pyörimisakselille voidaan harkita absoluuttisen enkooderin asettamista, jolla saataisiin anturoitua pyörivän osion tarkka kulma milloin vain. Nykyisessä toteutuksessa kulma-asennon anturointi perustuu inkrementaaliseen enkooderiin, joka tunnistaa vain kulma-arvon muutoksen.

Toinen heikkous nykyisessä toteutuksessa on vaakaliikkeen ääriasentojen anturointi. Ääriasentoihin liikkuminen tunnistetaan vain kappaleen ollessa vaakatasossa, vaikka on täysin mahdollista ajaa laite rajoilleen myös muissa kulmissa. Anturit voisi sijoittaa pyörivään osioon, jolloin haasteeksi muodostuu signaalin vieminen mikrokontrollerille. Mahdollisena ratkaisuna signaali voidaan viedä esimerkiksi optisesti tai jopa langattoman verkon kautta.

Arduino Mega voidaan korvata pienemmällä ohjaimella. Kuten kuvasta 4.1 havaitaan, Arduino Mega:ssa on runsaasti käyttämättömiä pinnejä ja ominaisuuksia. Korvaava kontrolleri voi olla pienemmän kokoluokan Arduino tai parempaan suorituskykyyn kykenevä ohjain. Kuten testauksen aikana huomattiin, Arduino Mega ei yksin kyennyt suorittamaan ohjelmaansa riittäväällä nopeudella. Laitteen kehitystä varten ohjaimen tehtäviä, kuten pulssisignaalien lähettämistä voidaan jakaa usealle mikrokontrollerille.

Jotta käyttäjä saisi vielä enemmän tapoja käsitellä laitetta, erinäisiä toimintoja voidaan lisätä. Esimerkiksi potentiometri, joka säätelee laitteen toimintanopeutta vähentäisi mahdollista koodin muokkaamisen tarvetta. Lisäksi voidaan harkita näytön lisäämistä, jolla voidaan viedä käyttäjälle tietoa entistä paremmin. Ylimääräinen piiri, joka valmistettiin reed-kytkimiä varten (kuva 4.4), voidaan integroida kontrollerin yhteyteen kytkettävään piirilevyyn.

## LÄHTEET

AKM 2013. EM3242 Angle Sensor IC. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.3.2018]. Saatavissa <https://www.akm.com/akm/en/file/datasheet/EM3242.pdf>

Arduino LLC 2018. Arduino Mega 2560 Rev3. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.3.2017]. <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>

FastToBuy 2018. 3 Phase NEMA 52 Stepper Motor Drive Kit 6.9A 50Nm for Engraving Machine. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.3.2018]. Saatavissa [https://www.fasttobuy.com/3-phase-nema-51-stepper-motor-drive-kit-69a-50nm-for-engraving-machine\\_p36145.html](https://www.fasttobuy.com/3-phase-nema-51-stepper-motor-drive-kit-69a-50nm-for-engraving-machine_p36145.html)

Fraden, J 2004. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications Third edition. New York: Springer-Verlag.

Gray, C. B.1989. Electrical Machines and Drive Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Meder Electronics 2012. MK04-1A66B-500W. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.3.2018]. Saatavissa [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Meder%20PDFs/MK04-1A\(66,71\)B-500W\\_Spec.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Meder%20PDFs/MK04-1A(66,71)B-500W_Spec.pdf)

National Electrical Manufacturers Association 2001. NEMA ICS 16 Industrial Control and Systems Motion/Position Control Motors, Controls, and Feedback Devices. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.3.2018]. Saatavissa <http://www.nema.org/Standards/SecureDocuments/ICS16.pdf>

Piher Sensors & Controls. N.d. CI-11 11mm Incremental Encoder. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.3.2018]. Saatavissa <http://www.piher-international.de/pdf/04-CI-11v04.pdf>