

Lauri Saukko

## **KAPPALEVAIHTAJAN JATKOKEHITYS**

## KAPPALEVAIHTAJAN JATKOKEHITYS

Lauri Saukko  
Opinnäytetyö  
Kevät 2023  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

---

Tekijä: Lauri Saukko

Opinnäytetyön nimi: Kappalevaihtajan jatkokehitys

Työn ohjaaja: Helena Tolonen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2023

Sivumäärä: 31

---

Tässä opinnäytetyössä jatkokehitettiin ja dokumentoitiin lasermerkintälaitteelle valmistettua kappalevaihtajaa. Työn tilaajana oli Oulun Lasermerkintä. Työn tavoitteena oli saada kehitettyä kappalevaihtaja sellaiseksi, että sen toiminta on luotettavaa ja rakenne kestävä. Tavoitteena oli myös saada kappalevaihtajasta valmiita dokumentteja sen automaattikajärjestelmästä ja logiikkaohjaimen koodista.

Kappalevaihtaja on laite, jonka tehtävänä on vaihtaa lasermerkittävä ohutlevyinen kappale lasermerkintälaitteen optiikan alle. Kappalevaihtajassa hyödynnetään askelmootoria, lineaarimootoreita, paineilmasylinteriä, rajakytkimiä sekä Arduino Mega R3 -mikrokontrolleria.

Työ aloitettiin aiheen rajaamisella ja asiakkaan toiveiden listaamisella. Näiden pohjalta laadittiin projektisuunnitelma sekä -aikataulu. Työn suorittaminen noudatti projektisuunnitelmaa, ja työn etenemistä seurattiin projekti aikataulun avulla.

Jatkokehitys aloitettiin uuden paineilmasylinterin valinnalla ja sen mitoituksen varmistamisella. Uusi paineilmasylinteri tilattiin asiakkaan toiveesta jo heti alkuvaiheessa, vaikka kappalevaihtajan mekaanisten muutosten tekeminen oli tarkoitus suorittaa vasta projektin loppuvaiheessa. Tällä varmistettiin se, että mahdollisten pitkien toimitusaikojen takia paineilmasylinteri saatiin ajoissa.

Projekti aikataulun mukaisesti työn suorittaminen aloitettiin kappalevaihtajan Arduino-koodin ja käyttöliittymän muokkaamisella. Käyttöliittymä muokattiin tarkoituksenmukaiseksi ja Arduino-koodi selkeäksi ja helpolukuseksi. Kappalevaihtajan toiminta ohjelmoitiin sellaiseksi, että sen käyttö on yksinkertaista ja selkeää. Kappalevaihtajan sähköjärjestelmään perehdyttiin, ja siitä tehtiin kytkentäkaavio. Kappalevaihtajan johdotus ja ohjauspaneelin painikkeet merkittiin. Kappalevaihtajan paineilmasylinteri vaihdettiin, ja sen kiinnitystapa muutettiin sellaiseksi, että uusi sylinteri saatiin asennettua. Uudet kiinnikkeet valmistettiin Oulun ammattikorkeakoulun tiloissa. Työn suorittamisen loppuksi kappalevaihtajalla tehtiin pidempiä testejä. Sillä suoritettiin useiden kymmenien kappaleiden työkiertoja. Testien aikana havaittujen puutteiden ja ongelmien pohjalta kappalevaihtajaa paranneltiin. Myös työn suorittamisesta pois rajattuihin aiheisiin liittyvät ongelmat kirjattiin ylös.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin vaatimusten mukainen toimiva kappalevaihtaja. Kappalevaihtaja toimi luotettavasti, ja asiakas oli siihen tyytyväinen.

---

Asiasanat: tuotekehitys, mekaniikkasuunnittelu, logiikkaohjelmointi

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Machine Automation Engineering

---

Author: Lauri Saukko  
Title of thesis: Further Development of Workpiece Changer  
Supervisor: Helena Tolonen  
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2023  
Number of pages: 31

---

This thesis consists of further development and documentation of an automatic workpiece changer for a laser engraver. The thesis was commissioned by Oulun Lasermerkintä. The objective of the work was to develop the workpiece changer to work reliably and to be durable. The other objective was also to obtain finished documents from the automation system and a logic program code of the workpiece changer.

The workpiece changer is a device with a task of changing a thin sheet workpiece under the optics of a laser engraver. The workpiece changer utilizes a stepper motor, linear motors, a pneumatic cylinder, limit switches and an Arduino Mega R3 -microcontroller.

The work began with limiting the topic and listing the needs of the client. Based on them, the project plan and schedule were made. The work followed the project plan, and the progression was monitored with the project schedule.

Further development began with selecting the new pneumatic cylinder and confirming its dimensioning. The new pneumatic valve was ordered in the beginning of the project due to the client's hope, even though carrying out the mechanical changes of the workpiece changer was scheduled to the end of the project. This ensured that due to the long delivery times the pneumatic valve arrived on time.

In accordance with the project schedule, the work began with modifying the Arduino-code and the control panel. The control panel was modified to be appropriate and Arduino code to be uniform and easy to read. The workpiece changer was programmed the way that using it was unambiguous and easy. The electric system of the workpiece changer was studied, and a circuit diagram was made of it. The wiring of the workpiece changer and the buttons of the control panel were marked. The pneumatic cylinder of the workpiece changer was replaced, and its mounting was modified to fit the new cylinder. The new mounts were manufactured in the Oulu University of Applied Sciences. In the end of the work, longer tests were run with the workpiece changer. It was tested by running tens of work cycles with it. The workpiece changer was modified due to defects and problems that were noticed during the tests. Also, problems regarding the parts of the workpiece changer that were ruled out of the project were noted.

As a result of the thesis the workpiece changer was working according to requirements. It worked reliably and the client was satisfied with it.

---

Keywords: product development, mechanical engineering, logic programming

# SISÄLLYS

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | JOHDANTO .....                           | 6  |
| 2 | KAPPALEVAIHTAJA .....                    | 7  |
|   | 2.1 Rakenne .....                        | 8  |
|   | 2.2 Käyttö .....                         | 11 |
| 3 | ARDUINO-KEHITYSYMPÄRISTÖ .....           | 12 |
| 4 | MEKANIIKAN UUSIMINEN .....               | 13 |
|   | 4.1 Liukulaakerit ja kuulalaakerit ..... | 13 |
|   | 4.2 Paineilmasynterin valinta .....      | 13 |
|   | 4.3 Paineilmasynterin laskennat .....    | 14 |
|   | 4.4 Kiinnikkeet .....                    | 17 |
| 5 | LÄHDEKODI .....                          | 21 |
|   | 5.1 Käyttöliittymä .....                 | 21 |
|   | 5.2 Lähdekoodin rakenne .....            | 22 |
|   | 5.3 Häätäpysäytys .....                  | 23 |
| 6 | KYTKENTÄKAAVIO JA MERKINTÄ .....         | 24 |
|   | 6.1 Kytentäkaavio .....                  | 24 |
|   | 6.2 Merkintä .....                       | 25 |
| 7 | TESTAUS .....                            | 28 |
| 8 | YHTEENVETO .....                         | 30 |
|   | LÄHTEET .....                            | 31 |

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön on tilannut Oulun ammattikorkeakoululta Oulun Lasermerkintä. Oulun Lasermerkintä toteuttaa lasermerkintöjä, kaiverruksia, tuotemerkintöjä sekä laserleikkeitä. He toimittavat teräksisiä tai alumiinisia lasermerkittyjä tuotteita, kuten konekilpiä, laitekilpiä, muistolaattoja ja hautakylttejä. Oulun Lasermerkintä toteuttaa asiakkaan tuotteisiin merkintöjä, kuten logoja, kuvia ja tekstejä sekä lahjamerkintää. He myös toteuttavat kevyitä koneistuksia jyrskoneella ja akryylin taivutuksia lasermerkinnöin. (1.)

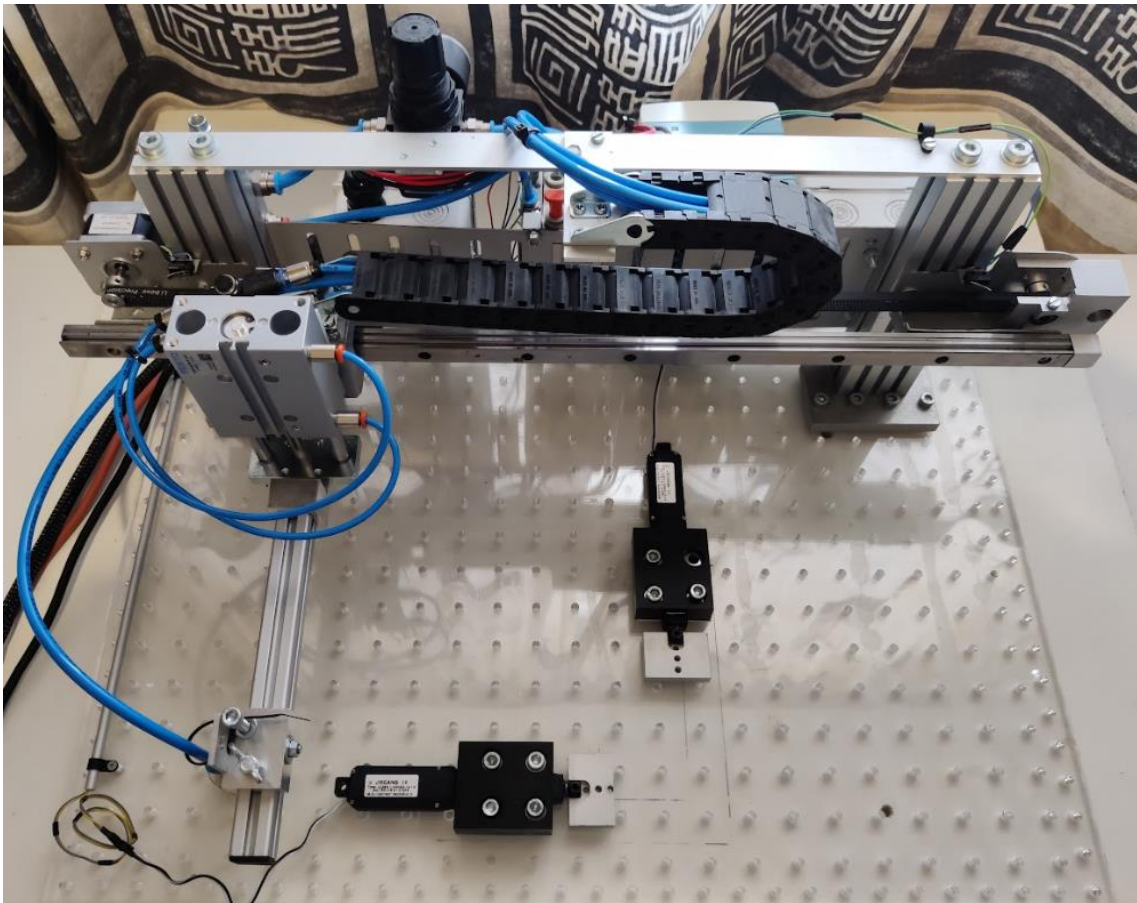
Alkuperäinen aihe on tarjottu Oulun ammattikorkeakoulun konetekniikan tutkinto-ohjelman opintojaksolla TK00BP58 Projektityö muodostetulle projektiryhmälle. Tällöin projektin aiheena oli valmistaa kappalevaihtaja lasermerkintälaitteelle. Projektin tuloksena saatiin tuolloin valmis laite, johon jäi kuitenkin jatkokehittävää. Tässä opinnäytetyössä laitetta on kehitetty jatkokehitysideoiden pohjalta.

Opinnäytetyön aiheena oleva kappalevaihtaja on kannettava laite, joka voidaan siirtää lasermerkintälaitteelta toiselle. Sen tehtävä on vaihtaa automaattisesti ohutlevyinen lasermerkittävä kappale merkintälaitteelle. Kappalevaihtaja vapauttaa henkilöstön resursseja automatisoimalla merkittävien kappaleiden vaihtamisen. Tällöin henkilöstö voi sujuvammin käyttää useita lasermerkintälaitteita yhtäaikaaisesti. (2.)

Tässä opinnäytetyössä kappalevaihtajaa jatkokehitetään vastaamaan mahdollisimman hyvin asiakasyrityksen tarpeita. Kappalevaihtajan mekaniikkaa uusitaan ja päivitetään parempaan. Kappalevaihtajan automatiikkaa parannetaan ja käyttöliittymää ohjelmoidaan käyttäjäystävällisemmäksi. Laitetta ja sen lähdekoodia dokumentoidaan, ja laitteen käyttöpaneelin toiminnot merkitään. Laitteen sähköjärjestelmästä tehdään kytkentäkaavio ja johdot merkitään kytkentäkaavion mukaan.

## 2 KAPPALEVAIHTAJA

Tässä opinnäytetyössä käsiteltävän kappalevaihtajan (kuva 1) tehtävä on se, että se vaihtaa automaattisesti merkittävän kappaleen lasermerkintälaitteelle. Se tekee sen siten, että se poimii valmiiksi kasatusta pinosta merkittävän ohutlevyisen aihion ja siirtää sen sivusuunnassa ennalta kohdistettuun merkintäpaikkaan. Laitte laskee aihion merkittäväksi ja kiinnittää aihion kahdella lineaarimootorilla paikalleen. Tällöin aihio on valmis merkittäväksi ja kappalevaihtaja antaa lasermerkintälaitteelle signaalin, että merkintä voi alkaa. Merkinnän jälkeen lineaarimootorit vapauttavat kappaleen ja kappalevaihtaja poimii sen. Valmis merkitty kappale siirretään sivusuunnassa valmiiden kappaleiden pinoon. Tällöin sykli alkaa uudestaan, ja sitä toistetaan, kunnes laite pysäytetään tai aihiot loppuvat.

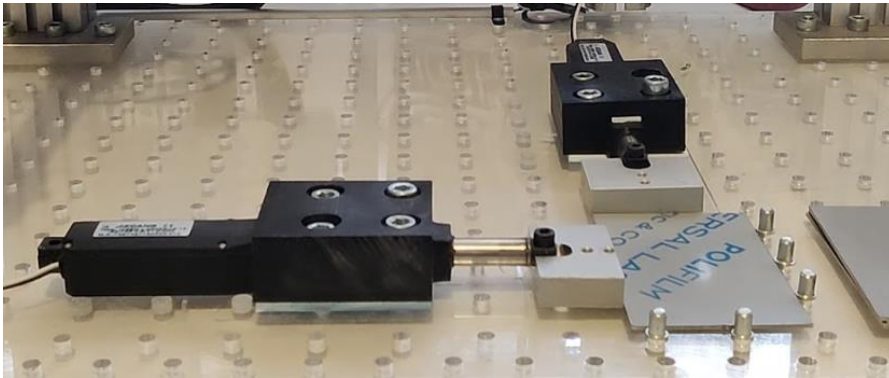


KUVA 1. Kappalevaihtaja

Kappalevaihtajan on alkuperäisesti suunnitellut ja rakentanut Oulun ammattikorkeakoulun kone-tekniikan tutkinto-ohjelman opintojaksolla TK00BP58 Projektityö muodostettu projektiryhmä. Projektin tarkoituksena oli valmistaa useaan eri lasermerkintälaitteeseen sopiva edullinen siirrettävä kappalevaihtaja ohutlevyisille osille.

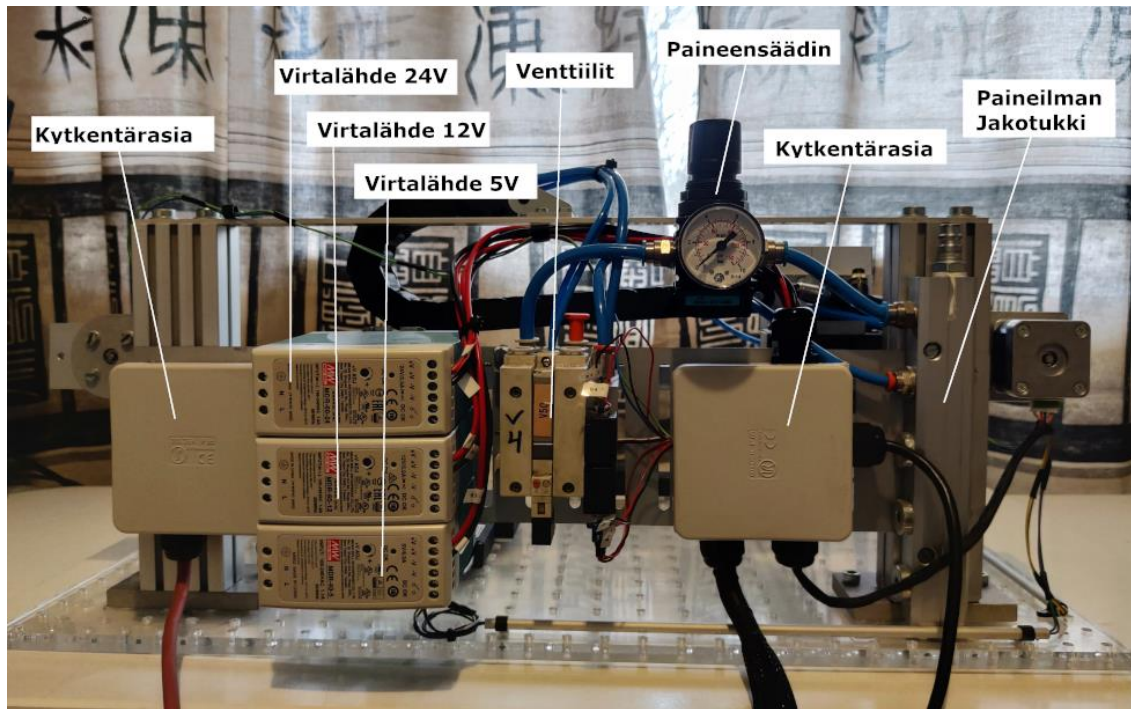
## 2.1 Rakenne

Kappalevaihtaja koostuu useista komponenteista ja kokoonpanoista. Sen perustuksena on rei'itetty levy, joka toimii työtasona ja jonka päälle toiset kokoonpanot on rakennettu. Työtason reiät mahdollistavat merkittävän kappaleen monipuoliset kiinnitysmahdollisuudet. Merkittävä kappale kiinnitetään levyyn metallisten tappien ja kahden lineaarimoottorin avulla kuvan 2 mukaan.



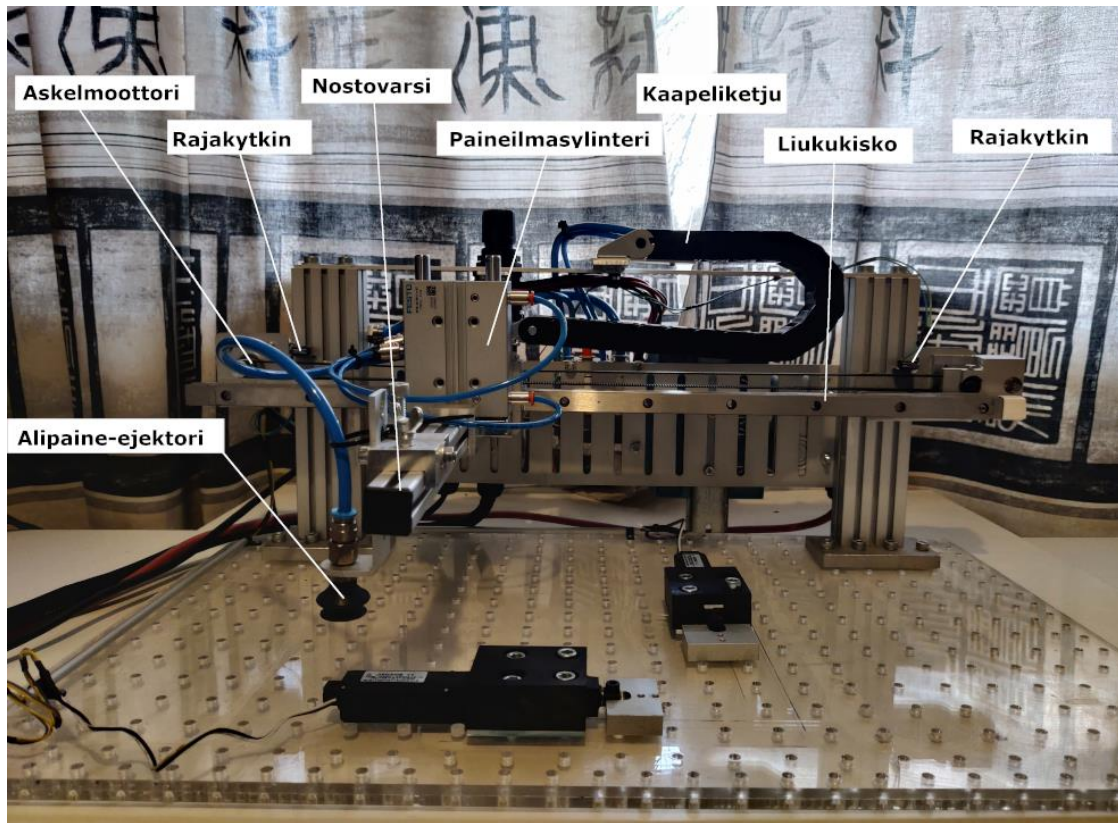
*KUVA 2. Merkittävien kappaleiden kiinnitys*

Kappalevaihtajan päämekanismi koostuu levyyn kiinnitetystä rungosta, johon kaikki muut komponentit ja kokoonpanot on kiinnitetty. Rungon takapuolelle on kiinnitetty kiinteät komponentit, eli kytkentärasiat, virtalähteet, paineilma- ja alipaineventtiilit, paineensäädin ja paineilman jakotukki (kuva 3).



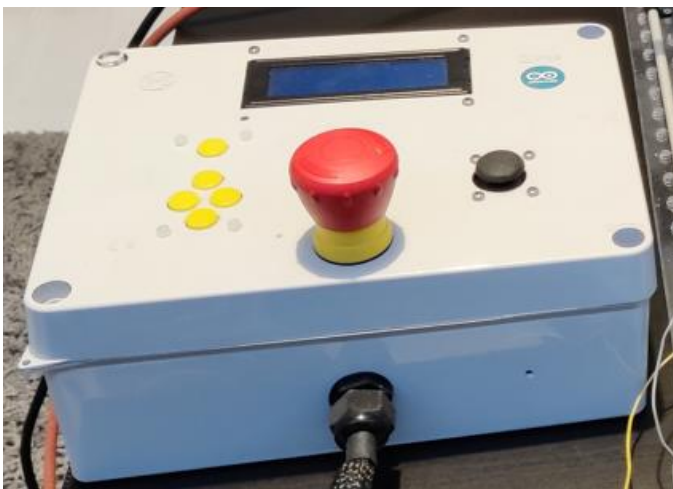
KUVA 3. Rungon takapuolelle kiinnitetyt komponentit

Rungon etupuolelle on kiinnitetty sivuttaissuuntaisesta liikkeestä vastaavat komponentit. Sivuttaissuuntaisesta liikkeestä vastaa askelmoottori, joka pyörittää hihnaan kiinnitettyä kelkkaa, joka on kiinnitetty työtason levyiseen liukukiskoon kuulalaakereilla. Runkoon on kiinnitetty lähelle liukukiskon kumpaakin päätä rajakytkimet, joiden avulla kelkan asema paikannetaan. Sivuttain liikkuvaan kelkkaan on kiinnitetty pystyliikkeestä vastaava paineilmasylinteri. Paineilmasylinterin männänvarren päähän on kiinnitetty nostovarsi, joka ylettyy lähes työtason toiseen päähän. Nostovarren päässä on alipaine-ejektori, joka tarttuu siirrettävään kappaleeseen. Kappalevaihtajan etupuolen komponentit nähdään kuvassa 4.



KUVA 4. Kappalevaihtajan etupuolen komponentit

Kappalevaihtajaa käytetään ohjauspaneelin kautta. Ohjauspaneeli on pitkällä kaapelilla yhteydessä laitteeseen oleva erillinen kokoonpano. Ohjauspaneeli koostuu aukaistavasta laatikosta, jonka etukanteen on kiinnitetty LCD-näyttö, näppäimistö, sauvaohjain sekä hätäpysäytyspainike (kuva 5). Ohjauspaneelin sisällä on laitteen automatiikasta vastaava Arduino Mega 2560 R3 -mikrokontrolleri sekä muita sähkökomponentteja, kuten releet ja äänimerkkisummeri.



KUVA 5. Ohjauspaneeli

## 2.2 Käyttö

Kappalevaihtaja käynnistetään virtakytkimestä, joka sijaitsee laitteen takapuolella kytkentärasian sivuosassa. Ennen laitteen käynnistämistä kytketään paineilmaletku jakotukkiin sekä merkintäsignaali kaapeli lasermerkintälaitteeseen. Kappalevaihtaja antaa sen kautta signaalin laserille, kun merkintä voi alkaa. Paineilman käyttöpaine säädetään paineensäätimestä. Käytettävä paine on 6 bar. Kappalevaihtajaa ohjataan ohjauspaneelin avulla.

Kun kappalevaihtaja on käynnistetty, asetetaan työstöarvot. Ensimmäisenä asetetaan merkintäaika, eli aika, joka laserilla kuluu kappaleen merkintään. Merkintäaikaan lisätään pieni varmuusaika, jotta merkintä on varmasti päättynyt ennen valmiin kappaleen poimimista. Kappalevaihtaja odottaa pysähdyksissä merkityn ajan, kun laserille on annettu aloitussignaali. Merkintäaika asetetaan päävalikossa sijaitsevasta alavalikosta Set interval.

Merkintäajan asettamisen jälkeen asetetaan toimintapisteet, eli poimintapiste, merkintäpiste ja pudotuspiste. Poimintapiste on piste, josta kappalevaihtaja poimii merkitsemättömän aihion. Merkintäpiste on piste, johon kappalevaihtaja asettaa merkitsemättömän aihion ja merkinnän jälkeen poimii merkityn kappaleen. Pudotuspiste on piste, johon kappalevaihtaja asettaa valmiin merkityn kappaleen. Toimintapisteet asetetaan päävalikon alavalikosta Set and run. Alavalikon auetessa käytölliittymä kysyy, suoritetaanko referenssiajo. Referenssiajo ajaa kappalevaihtajan ääriasentoon, missä askelmoottorin asema nollataan.

Kun sekä merkintäaika ja toimintapisteet on asetettu, voidaan kappalevaihtaja laittaa ajamaan ohjelmaa. Tällöin se suorittaa loputtomasti työkiertoa, jossa se poimii aihion, asettaa sen merkittäväksi, odottaa merkinnän ajan, poimii valmiin kappaleen ja asettaa sen valmiiden kappaleiden piinon. Kappalevaihtajan työkierto keskeytyy hätäpysäytyspainikkeen lisäksi myös, kun automaatiikka havaitsee alipainevuodon, esimerkiksi kun poimittavat kappaleet loppuvat. Kappalevaihtajan työkierto käynnistetään päävalikon Set and run -alavalikosta löytyvästä kohdasta Run.

Kappalevaihtajaa voi käyttää myös manuaalisesti. Manuaaliajossa nostovartta voidaan ajaa vaapaasti työtason päällä sekä se voidaan laskea alas ja nostaa ylös. Myös alipaine voidaan kytkeä päälle. Manuaaliajo kytketään päälle päävalikon Manual drive -alavalikosta.

Kappalevaihtaja voidaan myös ajaa yksittäisiin asetettuihin toimintapisteisiin esimerkiksi paikoitusten tarkistamiseksi. Toimintapisteisiin voidaan ajaa päävalikon Run positions -alavalikosta, jossa toimintapisteet näkyvät paikoituksineen.

### 3 ARDUINO-KEHITYSYMPÄRISTÖ

Arduino on italialaisen Ivrea Interaction Design -instituutin kehittämä avoimeen lähdekoodiin perustuva kehitysympäristö, joka perustuu helppokäyttöiseen laitteistoon ja ohjelmistoon. Arduinoa hyödynnetään ympäri maailman niin harraste-, opiskelu- kuin ammattikäytössäkin. Arduino on aloittelijaystävällinen kehitysympäristö, mutta kykenee myös laajoihin ja vaativiin automaatiikkaprojekteihin. (3.)

Arduino on alkuperäisesti kehitetty helppokäyttöiseksi työkaluksi nopeaan prototyypikehitykseen, ja se oli suunnattu opiskelijoille ilman taustaa sähkötekniikasta tai ohjelmoinnista. Saavutetun suosion myötä Arduino alkoi muovautua uusien tarpeiden mukaan. Nykyään Arduinoa hyödyntävät Arduino-yhteisön avulla uusien asioiden oppimiseen laajasti eri ihmisryhmät, kuten lapset, harrastelijat, taiteilijat ja ohjelmoijat. (3.)

Arduino tarjoaa lukuisia eri mikrokontrollereita eri tarkoituksiin. Tässä opinnäytetyössä hyödynnetään Arduino Mega 2560 R3 -mikrokontrolleria, joka perustuu ATmega2560-mikrosiruun. Arduino Mega 2560 R3 sisältää 16 analogista sisääntuloporttia sekä 54 digitaalista tulo-/lähtöporttia, joista 15:tä voidaan käyttää pulssinleveysmodulaarisina lähtösignaaleina. Lisäksi siinä on neljä sarjaliikennepiiriä, 16 MHz:n kideoskillaattori, USB-liitäntä sekä ICSP-liitäntä. Arduino Mega 2560 R3 on käyttövalmis itsenäinen mikrokontrolleri. (4.)

Arduino mikrokontrollerin ohjelmointi tapahtuu Arduino IDE -ohjelmointiympäristössä. Arduino IDE:ssä käytettävä ohjelmointikieli on muunneltua C++-ohjelmointikieltä. Arduino IDE hyödyntää minimaalista lähestymistapaa ohjelmointiin ja sisältää lukuisia valmiita ohjelmakirjastoja. Arduino IDE on aloittelijaystävällinen ohjelmointiympäristö. (5.)

## 4 MEKANIIKAN UUSIMINEN

Kappalevaihtajan mekaniikkaa päätettiin osittain uusida. Uusittavat mekaaniset komponentit päätettiin yhdessä asiakkaan kanssa jo projektin alussa. Uusittaviksi komponenteiksi valikoituivat nostoliikkeen paineilmasylinteri ja sen kiinnikkeet.

Paineilmasynterinin ohjaintappien liukuholkkien kiinnitykset olivat väljät, sekä itse sylinterin toiminta ajoittain epäluotettavaa. Liukuholkkien väljyys aiheutti nostovarren heilumista. Paineilmasynterinin epävarman toiminnan takia nostoliike saattoi jumittaa tai laitteen toimintasykli saattoi jäädä kesken. Äärimmäisessä tapauksessa nostoliikkeen jumiutuminen olisi voinut aiheuttaa nostovarren törmäämisen työtasolla oleviin lineaarimoottoreihin.

### 4.1 Liukulaakerit ja kuulalaakerit

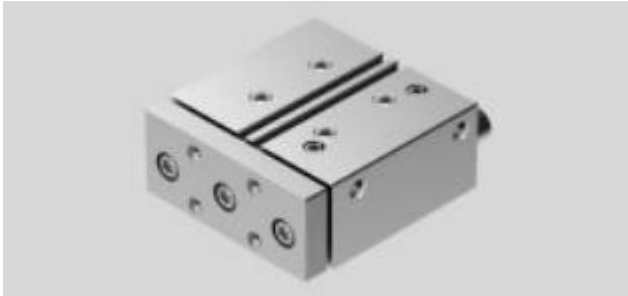
Liukulaakeri on mekaaninen komponentti, jonka tarkoitus on vähentää kitkaa liikkuvan akselin ja tukielementin välillä. Liukulaakerin toiminta perustuu pehmeään materiaaliin ja öljykalvoon. Liukulaakeri sallii joko akselin pyörimisen tai edestakaisin liukumisen. Liukulaakeri koostuu pelkästään pehmeästä materiaalista valmistetusta holkista. (6.)

Liukulaakerin tavoin kuulalaakeri on myös mekaaninen komponentti, jonka tarkoitus on vähentää kitkaa liikkuvan akselin ja tukielementin välillä. Kuulalaakerin toiminta perustuu lukuisiin kuuliin, jotka pyöriessään kahden liikkuvan komponentin välillä vähentävät kitkaa. (7.)

### 4.2 Paineilmasynterinin valinta

Uudeksi paineilmasylinteriksi valittiin Feston DFM-16-50-P-A-KF, joka on kuulalaakeroitu ohjaussylinteri (kuva 6) (8, s. 6). Kappalevaihtajan alkuperäinen paineilmasylinteri oli käytettynä laitteen asennettu liukulaakeroitu ohjaussylinteri. Kappalevaihtajan paineilmasylinterin liukutapit ovat paljaat ympäristölle, joten etenkin rasvattuna ne keräävät paljon likaa ympäristöstä. Lika kasvattaa kitkaa liukuholkeissa ja kuluttaa niitä. Valitun sylinterin liukuholkit ovat paremmin suojassa, eikä kuulalaakereiden tarve rasvaukselle ole yhtä suuri kuin liukulaakereiden. Tässä tapauksessa siis kuulalaakerit vähentävät kitkaa enemmän ja helpottavat paineilmasylinterin toimintaa.

Uusi paineilmasylinteriksi valittu sylinteri on mitoiltaan samanlainen kuin käytössä ollut sylinteri. Sen männän halkaisija on 16 mm ja iskunpituus 50 mm. Sylinterin toimivuuden varmistamiseksi suoritettiin kuitenkin laskelmia valmistajan julkaiseman teknisen tiedoston mukaan. Laskennat suoritettiin PTC Mathcad Prime -ohjelmalla.



KUVA 6. Festo DFM-16-50-P-A-KF (8, s. 2)

### 4.3 Paineilmasylinterin laskennat

Sylinterin toiminnan varmistamisen kannalta tärkeimmät tiedot olivat suurin asennustilanteen mukainen nostovoima sekä suurin sallittu ohjaustankoihin kohdistuva asennustilanteen mukainen momentti. Suurimman nostettavan kuorman arvioitiin olevan noin 300 grammaa ja 170 millimetrin etäisyydellä sylinterivarren keskipisteestä. Massan aiheuttama voima lasketaan kaavan 1 mukaan. Kuvassa 7 on laskettu pienin kuorman nostamiseen tarvittava voima.

KAAVA 1. Gravitaatiovoiman laskeminen

$$F = m \cdot a$$

m = massa (kg)

a = kiihtyvyys (m/s<sup>2</sup>)

$$m = 0.3 \text{ kg} \quad g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$
$$F = m \cdot g = 2.942 \text{ N}$$

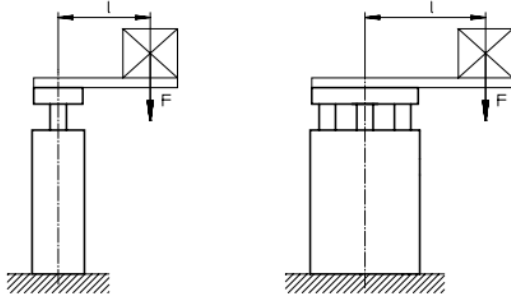
KUVA 7. Kuorman aiheuttavan voiman laskenta

Kappalevaihtajan nostovarsi kiinnikkeineen sekä nostettavan kappaleen kanssa aiheuttaa siis 2,9 N kuorman. Kuvassa 8 nähtävissä kaavioissa on valmistajan ilmoittamat suurimmat sallitut kuormat nostotilanteessa, jossa kuorma ei ole sylinterin keskellä. Sylinterin, jonka männän halkaisija on 16 mm ja iskunpituus 50 mm, suurin sallittu kuorma 170 mm etäisyydellä on kaavion mukaan noin 30 N. Sylinteri on siis kuorman kannalta reilusti riittävä tähän käyttötarkoitukseen.

## Data sheet

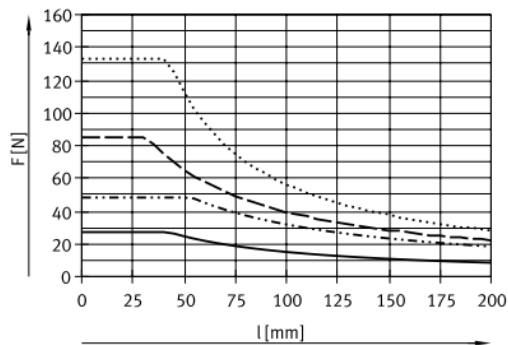
### Use as a lifting cylinder

Permissible load with recirculating ball bearing guide KF



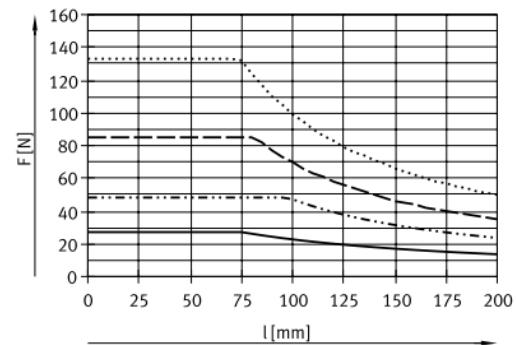
F = transverse load [N]  
l = lever arm [mm]

DFM-12 ... 25-KF, stroke up to 30 mm



— DFM-12  
 ..... DFM-16  
 - - - DFM-20  
 - · - · DFM-25

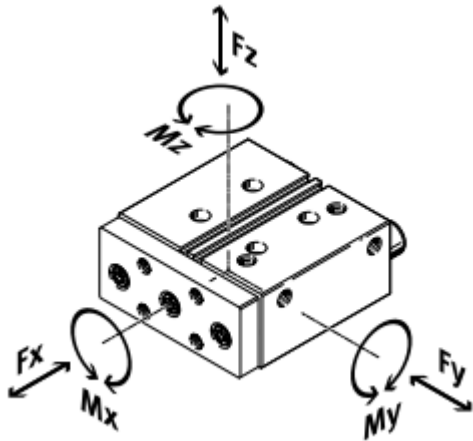
DFM-12 ... 25-KF, stroke 40 ... 100 mm



— DFM-12  
 ..... DFM-16  
 - - - DFM-20  
 - · - · DFM-25

KUVA 8. Suurimmat sallitut epäkeskeiset kuormat DFM-sylintereille (8, s. 18)

Kuorman epäkeskeisyydestä aiheutuu momenttia sylinterin liikutappeihin. Sylinterin toiminnan varmistamiseksi tarkistettiin, ettei tämä momentti ylitä valmistajan ilmoittamaa suurinta sallittua momenttia. Kuormasta aiheutuva momentti on kuvassa 9 näkyvän tapauksen  $M_y$  mukainen.



KUVA 9. Sylinterin ohjaimiin kohdistuvat voima- ja momenttitapaukset (8. s. 20)

Momentti lasketaan kaavan 2 mukaan. Kuvassa 10 on laskettu, kuinka paljon momenttia kuorma aiheuttaa sylinterin ohjaimiin. Kuorma kohdistuu noin 170 mm etäisyydelle sylinterin keskipisteestä.

KAAVA 2. Momentti

$$M = F \cdot l$$

F = voima (N)

l = voiman etäisyys (m)

$$F = 2.942 \text{ N} \quad l = 0.17 \text{ m}$$

$$M = F \cdot l = 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

KUVA 10. Sylinterin ohjaimiin kohdistuvan momentin laskenta

Kappalevaihtajan nostovarsi kiinnikkeineen sekä nostettava kuorma aiheuttaa siis sylinterin ohjaimiin maksimissaan 0,5 Nm momentin. Taulukossa 1 näkyy valmistajan ilmoittamat suurimmat sallitut momentit eri tapauksissa. Valitun sylinterin suurin sallittu momentti tässä tapauksessa, eli  $M_{\max}$ , on 10,5 Nm. Sylinteriin kohdistuva momentti on siis reilusti alle ilmoitetun ylärajan.

## TAULUKKO 1. Suurimmat sallitut ohjaimiin kohdistuvat voimat ja momentit (8, s. 21)

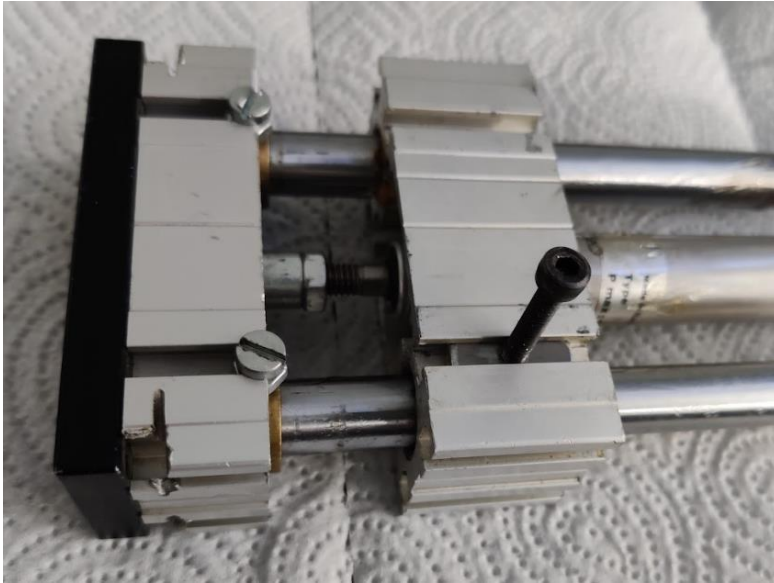
### Max. permissible forces and torques for recirculating ball bearing guide KF

The indicated forces and torques refer to the guide centre.

| Piston diameter | Stroke<br>[mm] | Static                           |                       |                                   | Dynamic (for a service life of 10000 km) |                       |                                   |
|-----------------|----------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|-----------------------------------|
|                 |                | $F_{y_{max}}/F_{z_{max}}$<br>[N] | $M_{x_{max}}$<br>[Nm] | $M_{y_{max}}/M_{z_{max}}$<br>[Nm] | $F_{y_{max}}/F_{z_{max}}$<br>[N]         | $M_{x_{max}}$<br>[Nm] | $M_{y_{max}}/M_{z_{max}}$<br>[Nm] |
| 12              | 10 ... 30      | 355                              | 7.28                  | 3.2                               | 193                                      | 3.95                  | 1.74                              |
|                 | 40 ... 100     | 804                              | 16.48                 | 8.44                              | 292                                      | 5.99                  | 3.07                              |
| 16              | 10 ... 30      | 415                              | 9.55                  | 4.15                              | 389                                      | 8.95                  | 3.89                              |
|                 | 40 ... 100     | 830                              | 19.09                 | 11.2                              | 778                                      | 17.9                  | 10.5                              |
| 20              | 20 ... 30      | 510                              | 14.79                 | 5.61                              | 408                                      | 11.84                 | 4.49                              |
|                 | 40 ... 100     | 1020                             | 29.58                 | 18.87                             | 817                                      | 23.69                 | 15.11                             |
| 25              | 20 ... 30      | 1060                             | 36.04                 | 15.37                             | 863                                      | 29.35                 | 12.52                             |
|                 | 40 ... 100     | 1060                             | 36.04                 | 20.67                             | 863                                      | 29.35                 | 16.83                             |
| 32              | 20 ... 50      | 1260                             | 49.14                 | 20.79                             | 1130                                     | 44.09                 | 18.66                             |
|                 | 80 ... 100     | 1260                             | 49.14                 | 32.13                             | 1130                                     | 44.09                 | 28.83                             |
|                 | 125 ... 200    | 1260                             | 49.14                 | 44.73                             | 1130                                     | 44.09                 | 40.13                             |
| 40              | 25 ... 50      | 1260                             | 55.44                 | 20.79                             | 1130                                     | 49.74                 | 18.66                             |
|                 | 80 ... 100     | 1260                             | 55.44                 | 32.13                             | 1130                                     | 49.74                 | 28.83                             |
|                 | 125 ... 200    | 1260                             | 55.44                 | 44.73                             | 1130                                     | 49.74                 | 40.13                             |
| 50              | 25 ... 50      | 1600                             | 88                    | 34.4                              | 1487                                     | 81.79                 | 31.98                             |
|                 | 80 ... 100     | 1600                             | 88                    | 51.2                              | 1487                                     | 81.79                 | 47.58                             |
|                 | 125 ... 200    | 1600                             | 88                    | 67.2                              | 1487                                     | 81.79                 | 62.46                             |
| 63              | 25 ... 50      | 1600                             | 100                   | 34.4                              | 1487                                     | 92.97                 | 31.98                             |
|                 | 80 ... 100     | 1600                             | 100                   | 51.2                              | 1487                                     | 92.97                 | 47.58                             |
|                 | 125 ... 200    | 1600                             | 100                   | 67.2                              | 1487                                     | 92.97                 | 62.46                             |
| 80              | 25             | 3120                             | 241.8                 | 73.32                             | 2048                                     | 158.67                | 48.12                             |
|                 | 50             | 3120                             | 241.8                 | 106.1                             | 2048                                     | 158.67                | 69.62                             |
|                 | 80 ... 200     | 3120                             | 241.8                 | 152.9                             | 2048                                     | 158.67                | 100.35                            |
| 100             | 25             | 5400                             | 507.6                 | 135                               | 3043                                     | 286.02                | 76.06                             |
|                 | 50             | 5400                             | 507.6                 | 194.4                             | 3043                                     | 286.02                | 109.53                            |
|                 | 80 ... 200     | 5400                             | 507.6                 | 275.4                             | 3043                                     | 286.02                | 155.16                            |

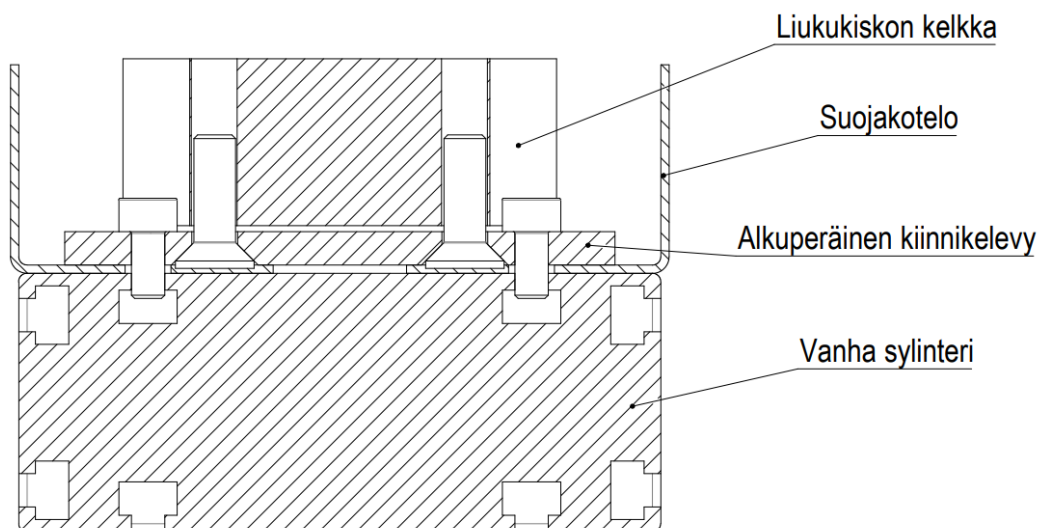
## 4.4 Kiinnikkeet

Uuden paineilmasylinterin kiinnitysmahdollisuudet erosivat vanhan sylinterin kiinnitysmahdollisuuksista, joten sille oli suunniteltava uudet kiinnikkeet. Vanhassa sylinterissä oli kiinnitystä varten urat, joihin asetettaviin vastakappaleisiin ruuvattavien ruuvien avulla sylinteri kiinnitettiin (kuva 11).



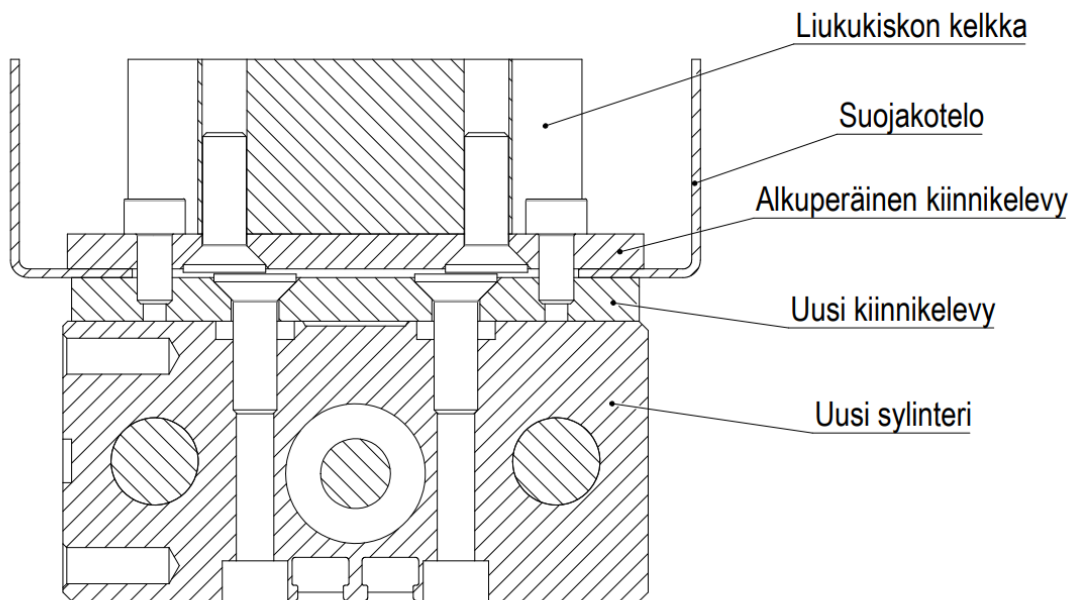
KUVA 11. Vanhan sylinterin kiinnitysmahdollisuudet

Vanha sylinteri oli kiinnitetty kuvan 12 mukaan siten, että liukukiskon kelkkaan oli kiinnitetty kiinnikelevy, johon sylinteri ruuvattiin kiinni. Uudessa sylinterissä oli kiinnitysmahdollisuuksina neljä reikää, joiden sivuttaissuuntainen etäisyys oli lyhyempi kuin vanhan sylinterin kiinnitysurien väli. Tämä tarkoitti sitä, ettei uutta sylinteriä voinut kiinnittää samalla tavalla kuin vanha sylinteri oli kiinnitetty, koska liukukiskon kelkka peitti sylinterin kiinnitysreiät.



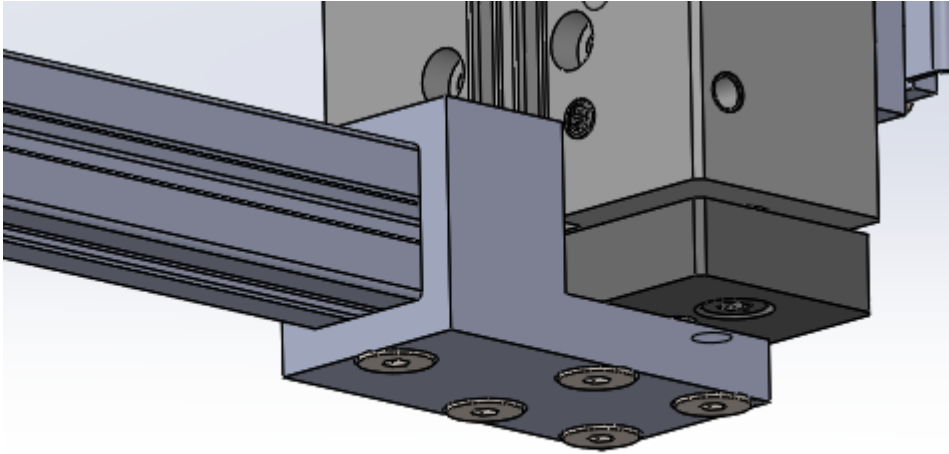
KUVA 12. Vanhan sylinterin kiinnitystapa

Uuden sylinterin kiinnittämiseksi suunniteltiin ylimääräinen kiinnikelevy sylinterin ja alkuperäisen kiinnikelevyn väliin. Tällöin sylinteri kiinnitetään uuteen kiinnikelevyyn ja vanha kiinnikelevy kiinnitetään liukukiskon kelkkaan. Tällöin kiinnikelevyt voidaan kiinnittää toisiinsa ruuvaamalla ne kelkan puolelta yhteen. Uusi kiinnitystapa nähdään kuvassa 13.



KUVA 13. Uuden sylinterin kiinnitystapa

Nostovarren kiinnittämiseksi sylinterin alapäähän täytyi myös suunnitella uusi kiinnike. Jotta nostovarsi kiinnittyisi mahdollisimman tukevasti sylinteriin, kiinnikkeeseen suunniteltiin 15 mm syvä upotus, johon nostovarsi työnnetään (kuva 14). Kiinnike kiinnitettiin sylinterin alapäähän neljällä ruuvilla.



*KUVA 14. Nostovarren kiinnitys sylinterin alapäähän*

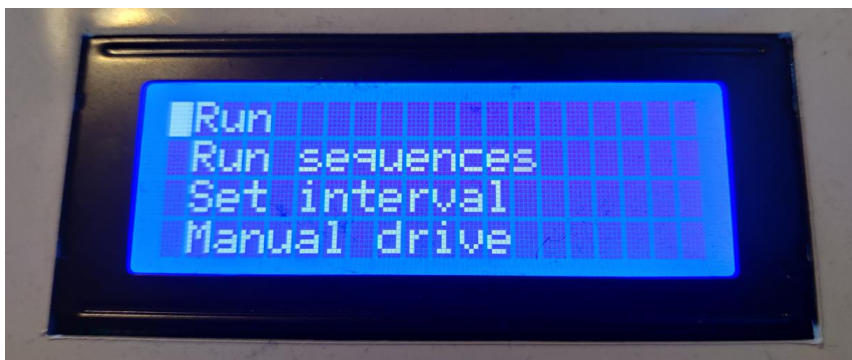
## 5 LÄHDEKOODI

Kappalevaihtajan Arduino-lähdekoodissa oli havaittu puutteita ja muutostarpeita. Kappalevaihtajan käyttöliittymässä päävalikon toiminnot eivät olleet luontevassa järjestyksessä, joten työstöasetusten tekeminen ei ollut selkeää. Arduino-lähdekoodin rakenne ei ollut yhtenäinen eikä selkeä.

Lähdekoodia muokattiin projektiakataulun mukaisesti projektin alkuvaiheessa. Kuitenkin myös projektin myöhäisemmissä vaiheissa havaittiin tarpeita koodin muokkaamiselle. Koodia muokattiin tarpeiden mukaan läpi projektin, ja viimeiset muutokset tehtiin pidempiaikaisten testien aikana.

### 5.1 Käyttöliittymä

Kappalevaihtajan käyttöliittymä on yksinkertainen. Laitteen käynnistyessä avautuu päävalikko, jossa on neljä eri toimintoa: liikeratojen asetus ja työajo, liikeratojen erillinen testiajo, merkintäajan asetus sekä manuaalinen ajo (kuva 15). Alkuperäisen päävalikon järjestys ei ollut tarkoituksenmukainen, sillä työstöasetusten asettaminen aloitetaan merkintäajan määrittämisellä. Lisäksi toimintojen nimet eivät kuvanneet toimintoja tarpeeksi hyvin.

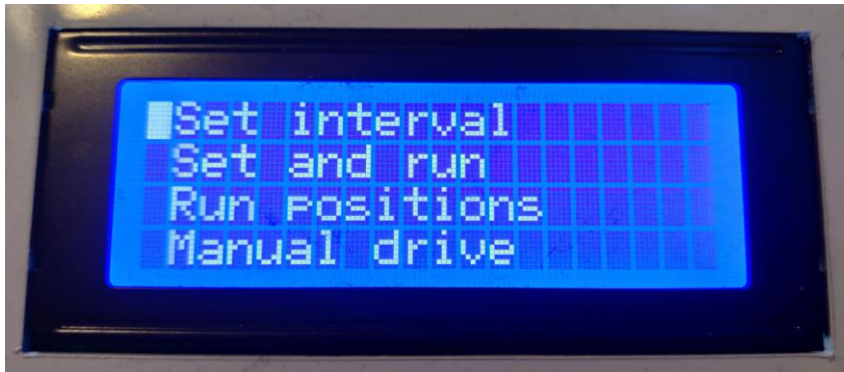


KUVA 15. Alkuperäinen päävalikko

Koska työstöarvojen asettaminen aloitetaan merkintäajan määrittämisellä, on tarkoituksenmukaista, että se on päävalikossa ensimmäisenä. Liikeratojen asetus ja työajo ovat työjärjestyksessä seuraavana, joten niiden alavalikko siirrettiin toiseksi päävalikossa.

Päävalikon nimeämisten osalta Run ja Run sequences eivät kuvanneet tyydyttävästi toimintojaan. Koska Run-alavalikosta asetetaan liikeradat sekä suoritetaan työstöajo, sen nimeksi vaihdettiin toi-

mintoja paremmin kuvaava Set and run. Run sequences -alavalikosta laitteen poimintavarsi voidaan ajaa yksittäisiin asetettuihin kohtiin. Tällöin Run sequences voi olla joillekin käyttäjille hieman epäselvä käsite, joten sen nimeksi vaihdettiin helpommin ymmärrettävä Run positions. Lopullinen päävalikko nähdään kuvassa 16.



KUVA 16. Muokattu päävalikko

## 5.2 Lähdekoodin rakenne

Lähdekoodin jouhevan tulkitsemisen ja helppolukuisuuden vuoksi on sen hyvä noudattaa yhteistä rakennetta. Tällöin lähdekoodin eri osa-alueet ovat visuaalisesti helpommin tulkittavissa.

Lähdekoodin rakenne muokattiin sellaiseksi, että komennot ryhmiteltiin sisäistetysti. Kaikkien komentojen alikomennot sisäistettiin hieman oikealle niiden pääkomennosta. Mikäli jokin komento sisälsi useamman kuin yhden rivin koodia, erotettiin se edeltävistä komennosta yhdellä tyhjällä rivillä. Myös aaltosulkeiden jälkeiset komennot erotettiin sitä edeltävistä komennosta yhdellä tyhjällä rivillä. Komennot ja ne päättävät aaltosulkeet muotoiltiin olemaan yhtä sisennettyjä. Tällöin näkee helposti, missä kohtaa koodia tietty komento alkaa ja missä se loppuu.

Kuvassa 17 void-komento on korkeimman tason komento, joten sitä ei ole sisennetty ollenkaan. Sitä seuraavat lcd- ja while-komennot ovat toisen tason komentoja, eli ne ovat void-komennon alaisia. Tällöin ne on sisennetty. Koska while-komento on monirivinen, on ennen sitä tyhjä rivi. While-komennon sisäiset komennot on sisennetty kahdesti ja if-komentojen sisäiset komennot kolmesti.

```

void goToPickup() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Running to Pos. 1");

  while (stepper.currentPosition() != pickupPos && menu != 0){
    errorModeRequest();
    emergencyStopRequest();
    back();

    if (errorMode == false and emergencyStop == false){
      stepper.moveTo(pickupPos);
    }

    if (errorMode == true or emergencyStop == true){
      stepper.moveTo(stepper.currentPosition());
    }

    stepper.run();
  }

  lcd.clear();
}

```

*KUVA 17. Esimerkki lähdekoodin rakenteesta*

### 5.3 Hätäpysäytys

Koodia muokattaessa huomattiin, ettei hätäpysäytys toiminut riittävän turvallisesti. Hätäpysäytys-painiketta painaessa laitteen liike pysähtyi, mutta painikkeen vapautuessa laite jatkoi liikettään. Tämä voi aiheuttaa vaaratilanteita, joten hätäpysäytystä täytyi parantaa.

Hätäpysäytys muutettiin sellaiseksi, että hätäpysähdyspainiketta painaessa laitteen liike pysähtyy. Painikkeen vapauduttua laite pysyy pysähdyksissä. Tällöin painettaessa hätäpysäytyksen kuittaus-painiketta laite palaa päävalikkoon.

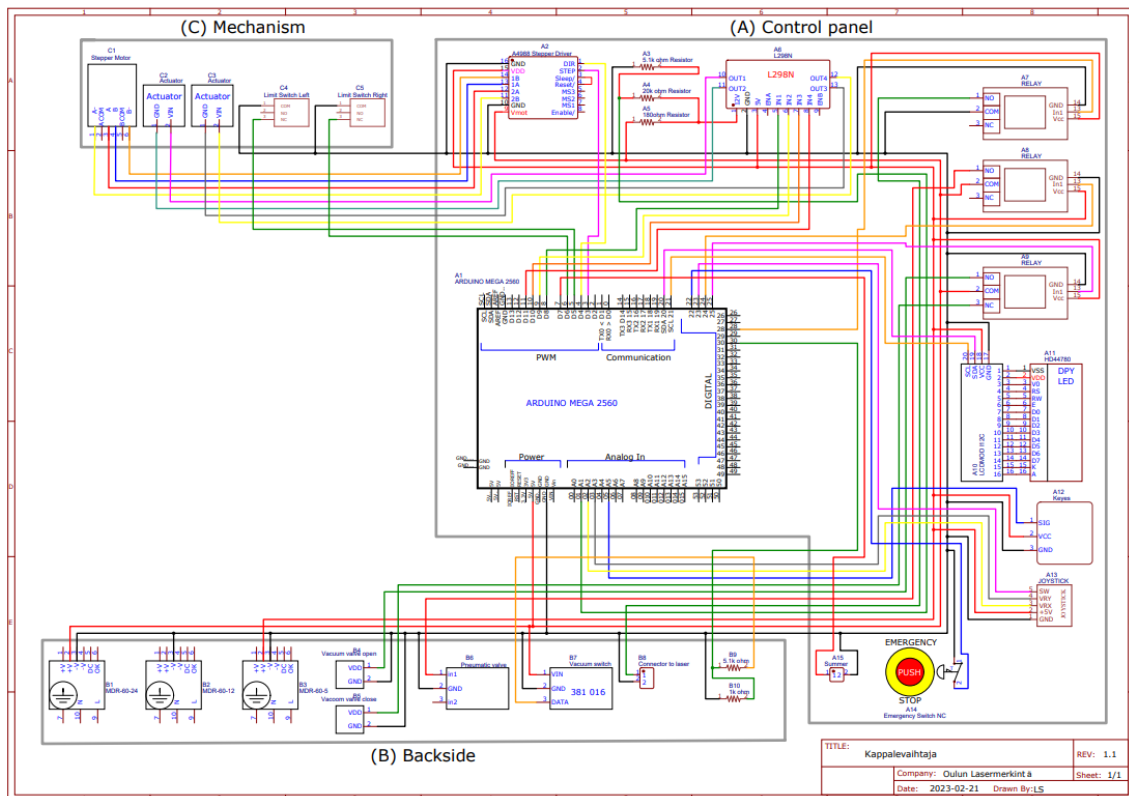
## 6 KYTKENTÄKAAVIO JA MERKINTÄ

Kappalevaihtajan automatiikasta ei ollut alkuperäisen projektin aikana tehty dokumentaatiota, joten automatiikan tulkitseminen sekä esimerkiksi virhetilanteet saattoivat olla haastavia. Asiakkaan toiveen mukaan tässä opinnäytetyössä perehdyttiin kappalevaihtajan automatiikkaan ja siitä tehtiin kytkentäkaavio. Lisäksi kappalevaihtajan johdotus ja ohjauspaneelin toiminnot merkittiin.

KytKentäkaavion tekemiseen ei määritelty ennalta tarkkaa menetelmää, vaan se tehtiin parhaaksi katsotuilla menetelmällä ja työkalulla. Johtojen merkitseminen sovittiin tehtäväksi kaapelitarroilla, mutta merkintätyyli täytyi suunnitella.

### 6.1 KytKentäkaavio

Kappalevaihtajasta tehtiin kytkentäkaavio (kuva 18), jotta sen johdotuksesta olisi olemassa luotettava dokumentti ja johdotusta olisi helppo tulkita. KytKentäkaavio tehtiin EasyEDA-ohjelmalla. KytKentäkaaviosta haluttiin tehdä visuaalisesti mahdollisimman helposti tulkittava, joten kappalevaihtajan komponentit haettiin ohjelman kirjastosta mahdollisimman todellisen mukaisina. Komponenttien tulo- ja lähtösignaalien nimeämiset merkittiin vastaamaan todellisten komponenttien merkintöjä.



KUVA 18. Kappalevaihtajan kytkentäkaavio

Komponentit ryhmiteltiin kytkentäkaavioon siten, että niiden sijainti kytkentäkaaviossa vastaa samaa sijaintia kappalevaihtajassa. Komponenttien sijoittelu jaettiin kolmeen ryhmään: (A) Control panel, (B) Backside ja (C) Mechanism. Ryhmän A komponentit ovat ne, jotka todellisessa kappalevaihtajassa sijaitsevat ohjauspaneelissa, ryhmän B komponentit ovat ne, jotka sijaitsevat kappalevaihtajan takapuolella ja ryhmän C komponentit ovat ne, jotka sijaitsevat kappalevaihtajan etupuolella ja työtasolla.

Kytkentäkaavion johdotukset tehtiin myös mahdollisimman totuudenmukaiseksi. Johdotus muotoiltiin mahdollisimman yksinkertaiseksi ja selkeästi ymmärrettäväksi. Kytkentäkaaviossa pyrittiin käyttämään todellisten johtojen mukaisia värityksiä.

## 6.2 Merkintä

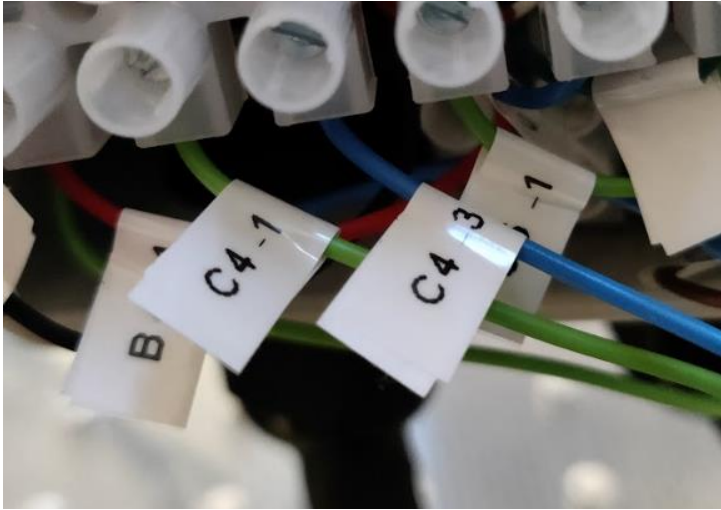
Kappalevaihtajan ohjauspaneelin painikkeita ja toimintoja ei ollut merkitty, joten kappalevaihtajan käyttäminen varsinkin siihen perehtymättömälle käyttäjälle oli vaikeaa. Painikkeiden käyttötarkoitus joutui arvailemaan, mikä on myös riski kappalevaihtajan turvallisen käyttämisen kannalta.

Painikkeet ja toiminnot merkittiin tarralapuvin (kuva 19). Merkinnoilla varmistettiin kappalevaihtajan turvallinen ja selkeä käyttäminen.



*KUVA 19. Kappalevaihtajan ohjauspaneelin merkinnät*

Asiakkaan toiveena oli, että kappalevaihtajan johdotus merkittäisiin. Merkitseminen toteutettiin kaapelitarroilla, jotka liimattiin johtojen päihin. Tällöin esimerkiksi irronneen johdon kaapelitarrasta selviää, mihin johto kuuluu kytkeä takaisin. Johtojen merkitsemiseen kehitettiin koodijärjestelmä, joka perustuu kytkentäkaavioon. Koodi on kaksiosainen kirjain- ja numeroyhdistelmä, jonka ensimmäinen osa kertoo, mihin komponenttiryhmään sekä komponenttiin johto kuuluu ja toinen osa kertoo mihin tulo- tai lähtöporttiin tuossa kyseisessä komponentissa johto kytketään. Komponenttiryhvät, (A, B ja C), komponenttien numerot sekä tulo- ja lähtöporttien numerot selviävät kytkentäkaaviosta. Esimerkiksi johdon päässä oleva koodi A1-25 kertoo, että johto tulee kytkeä ryhmässä A eli ohjauspaneelissa olevan komponentin 1 eli Arduino Megan -porttiin numero 25. Esimerkki kytketyistä johdoista nähdään kuvassa 20.

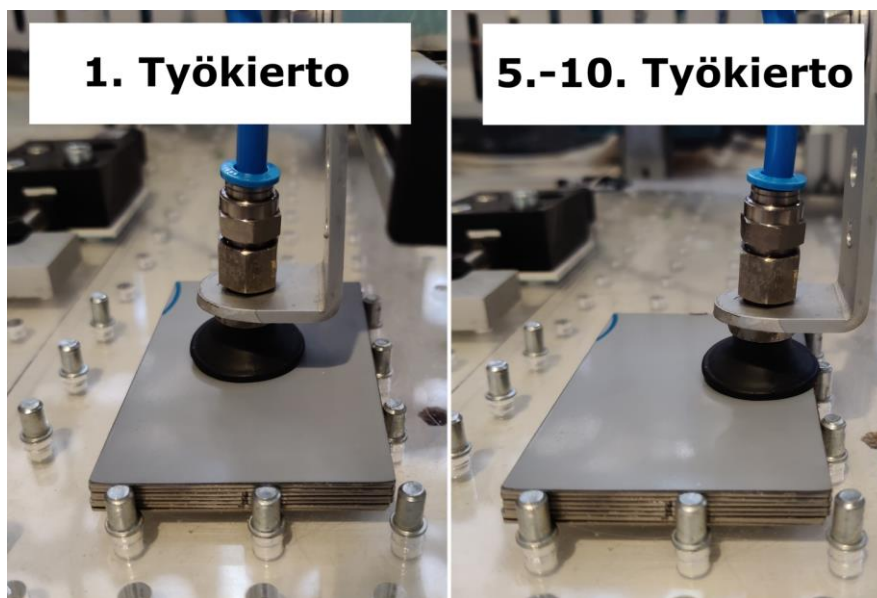


*KUVA 20. Esimerkki kytketyistä johdoista*

## 7 TESTAUS

Kun kappalevaihtajaan oli tehty asiakkaan toiveiden mukaiset muutokset, sillä suoritettiin pidempi-aikaisia testejä. Vaatimuksena oli, että kappalevaihtajaa voidaan luotettavasti hyödyntää useiden kappaleiden lasermerkittämiseen. Tällöin kappalevaihtajan tulee toimia toistuvasti luotettavasti ja ilman, että siihen tulee häiriöitä tai vikoja. Testaukset suoritettiin ilman lasermerkintälaitetta siten, että kappaleita vain siirrettiin, sillä lasermerkintä ei vaikuta kappalevaihtajan toimintaan. Ilman lasermerkintälaitetta testaus oli myös turvallisempaa. Testausten aikana merkintäaikana käytettiin vain kahta sekuntia toistonopeuden kasvattamiseksi.

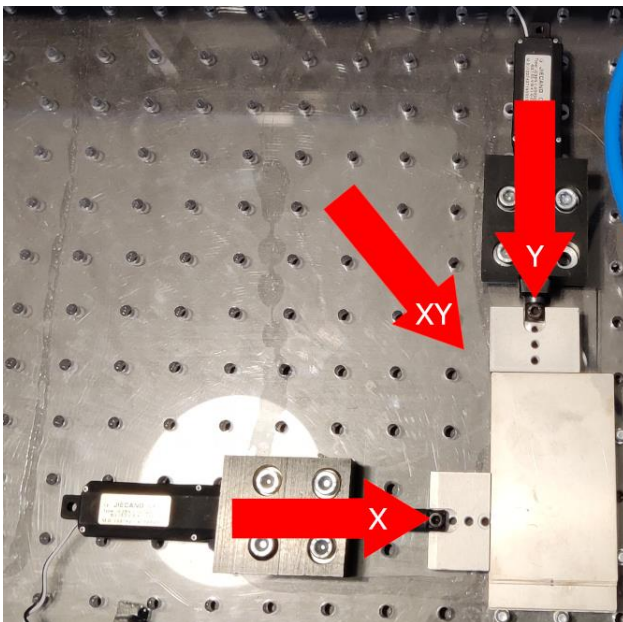
Kappalevaihtajalla ajettiin testauksen aikana useiden kymmenien työkiertojen sarjoja. Heti aluksi havaittiin, että nostovarren asema alkaa poikkeamaan työkierrosten edetessä. Jo noin 5–10 työkierron aikana nostovarren asema poikkesi yli 10 mm oikealle kappalevaihtajan etupuolelta katsottuna (kuva 21). Ongelman juurisyiksi päädyttiin toteamaan askelmoottorin epätarkkuus, sillä mekaaniset tekijät pystyttiin sulkemaan pois. Ratkaisuksi päädyttiin muokkaamaan Arduino Megan-ohjelmaa siten, että joka neljännen työkierron jälkeen kappalevaihtaja ajaa nostovarren ääriasentoon ja nolaa paikoituksen. Muutoksen jälkeen paikoituksessa ei ilmennyt ongelmia.



KUVA 21. Paikoituksen liukuminen

Jo opinnäytetyön alkuvaiheessa asiakkaan kanssa arvioitiin, että työtason ratkaisu ei ole pitkällä aikavälillä toimiva. Kiinnitystapit pääsevät hieman heilumaan, mikä aiheuttaa epätarkkuutta merkintään. Kiinnitystapeissa oleva olake aiheuttaa myös epätarkkuutta, sillä toisinaan merkittävä kappale kiristyy olaketta vasten ja toisinaan sen päälle. Joskus kappale kiristysvaiheessa myös tunkeutuu olakkeen alle, jolloin poimittaessa kiinnitystappi irtoaa työtasosta. Kappaleen kiinnityksen muokkaaminen rajattiin kuitenkin pois tästä opinnäytetyöstä jo sen alussa, joten toistaiseksi testeissä havaittuihin ongelmiin ei puututtu.

Kappaleen kiinnittämistavassa havaittiin myös toinen ongelma. Kappale kiinnitetään kahden lineaarimoottorin avulla kuvan 22 nuolien X ja Y mukaan, ensin sivusuunnassa ja sen jälkeen pystysuunnassa. Tällöin sivusuunnan kiristyksen jälkeen kappale on jo tiukasti paikoillaan, jolloin pystysuunnan kiristyksessä kappale voi jäädä irti alapuolen kiinnitystapeista, sillä lineaarimoottori ei jaksakaan työntää kappaletta niitä vasten. Tätä ongelmaa ei esiintynyt jokaisella työkierrolla, mutta toisinaan kappale jäi muutaman millimetrin irti alapuolen kiinnitystapeista. Tämä aiheuttaa laatuvariaatioita, sillä merkintä saattaa tulla kappaleisiin eri kohtiin. Tehokkain ratkaisu tähän ongelmaan olisi käyttää kiinnityksessä kahden lineaarimoottorin sijaan vain yhtä lineaarimoottoria, joka kiristäisi kappaleen viistosti kulmasta kiinnitystappeja vasten kuvan 22 nuolen XY mukaan. Tällöin kappale kiristyisi kummastakin suunnasta yhtä aikaa.



KUVA 22. Kappaleen kiinnitys

## 8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli jatkokehittää lasermerkintälaitteelle tehtyä kappalevaihtajaa. Tulokseksi saatiin valmis vaatimusten mukainen laite, joka tulee käyttöön asiakasyrityksessä. Opinnäytetyön aikana hyödynnettiin konetekniikan opintojen aikana opittuja tietoja ja taitoja, mutta myös opittiin uusia asioita. Opinnäytetyön suorittaminen sujui hyvin ja itsenäisesti, mutta myös yhteistyö asiakkaan ja ohjaavan opettajan kanssa sujui moitteettomasti.

Opinnäytetyö noudatti projektityöskentelyn kaavaa. Opinnäytetyö oli jaettu selkeisiin osa-alueisiin, joiden edistymistä seurattiin projekti aikataulun avulla. Opinnäytetyön suorittaminen pysyi hyvin aikataulussa ja eri osa-alueet suoritettiin ajoissa. Opinnäytetyön suorittaminen perustui projektin alussa asiakkaan kanssa sovittujen kehityskohteiden toteuttamiseen.

Opinnäytetyön suorituksessa hyödynnettiin mekaniikkasuunnittelun sekä automaatio suunnittelun menetelmiä. Tämä oli hyvä kokonaisuus koneautomaation opintojen opinnäytetyölle. Uusien asioiden opettelu opinnäytetyön aikana ei aiheuttanut ongelmia. Opinnäytetyön aikana opeteltiin muun muassa käyttämään uusia ohjelmistoja esimerkiksi kytkentäkaavion tekemiseen.

Jo opinnäytetyön alussa tiedostettiin, että kappalevaihtajaan jäisi kehityskohteita aiheen rajaamisen vuoksi. Nämä kehityskohteet koskivat kappalevaihtajan työtasoa ja kappaleiden kiinnittämistä. Pois rajattuja kehityskohteita kuitenkin tutkittiin ja ratkaisuja niihin suunniteltiin, mutta niitä ei suoritettu.

## LÄHTEET

1. Oulun Lasermerkintä Avoin Yhtiö 2022. Finder. Hakupäivä 11.5.2023. <https://www.finder.fi/Lasermerkkaus/Oulun+Lasermerkint%C3%A4+Avoin+Yhti%C3%B6/Haukipudas/yhteystiedot/3081291>.
2. Asiakkaan yhteyshenkilö 2022. Oulu. Haastattelu. Syksy 2022.
3. What is Arduino 2018. Arduino.cc. Hakupäivä 19.12.2022. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
4. Arduino Mega 2560 Rev3. Arduino.cc. Hakupäivä 19.12.2022. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>.
5. Circuito team 2018. Everything you need to know about Arduino code. Blogiteksti. Hakupäivä 19.12.2022. <https://www.circuito.io/blog/arduino-code/>.
6. Types of Plain Bearings (Bushings). Thomasnet. Hakupäivä 18.5.2023. <https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/types-of-bushings/>.
7. Anaa Lavaa 2022. Everything You Need to Know About Different Types of Ball Bearings. Blogiteksti. Hakupäivä 18.5.2022. <https://www.linquip.com/blog/different-types-of-ball-bearings/>.
8. Guided drives DFM/DFM-B 20 2022. Festo. Tuotedokumentti. Pdf-tiedosto. Hakupäivä 19.12.2022. <https://www.festo.com/media/pim/979/D15000100121979.PDF>.