

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ATE70LT

Tambet Land

**Arvprogrammjuhtimisega (CNC)
freespingi ehitus ja juhtimine**

Magistritöö

Instituudi direktor prof. Ivo Palu

Juhendaja dotsent Raivo Teemets

Lõpetaja Tambet Land

TALLINN 2017

AUTORIDEKLARATSIOON

Kinnitan, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Kõik selle koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud. Varem ei ole selle alusel kutse- ega teaduskraadi ega inseneridiplomit taotletud. Töö on koostatud litsentseeritud tarkvara abil.

Tallinn, 13.03.2017

..... Tambet Land

ATE70LT

Arvprogrammjuhtimisega (CNC) freespingi ehitus ja juhtimine

Tambet Land, üliõpilaskood 144160AAAM, mai 2017. – 56 lk.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Inseneriteaduskond

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: dotsent Raivo Teemets

Võtmesõnad:

CNC, freespink, Atmega2560, RAMPS 1.4

Referaat:

Lõputöö on 56 lehel, sisaldab 33 joonist ja 9 tabelit.

Lõputöö eesmärk on valmis ehitada arvjuhtimisega freespink, millega saab töödelda puitu, puidust tooteid, plaste ja pehmemaid värvilisi metalle nagu alumiinium, messing ja vask. Freespingi komponentide valikul ja valmistamisel on suurt tähelepanu suunatud hinnapõhisele valikule. Enamus osad tuleb tellida Hiinast.

Lõputöö eripäraks on 3D printeri juhtimine üle kanda freespingile kasutades mikrokontrolleri Atmega2560 ja 3D printeri arendusplaadi komplekti RAMPS1.4. Terve projekt on algusest lõpuni läbi viidud ainult läbi autori käte. Antud töös võrreldakse mitmeid turul olevaid sarnaseid tooteid nii hinna kui mõõtude poolest. Kirjeldatakse ehitatava freespingi osade valikuid ja kogu protsessi ehituslikku kirjeldust. Peale testimist analüüsitakse tulemust.

Töö tulemusena valmis arvjuhtimisega freespink, mille tööala on mõõtudega 900x630x250 mm, täpsusega 0,1 mm. Freesiks kasutatakse Makita 710 vatist ülafreesi. Kogu süsteem töötab pingega 230 volti ja voolutarve jääb alla kilovati.

ATE70LT

Разработка и управление фрезерного станка с ЧПУ с числовым программным управлением

Тамбет Ланд, код студента 144160АААМ, май 2017. – 56 стр.

ТАЛЛИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ Факультет инженерных наук
Институт электроэнергетики и мехатроники

Руководитель работы: доцент РайвоТээметс

Ключевые слова: CNC, фрезерный станок, ATmega2560, Ramps 1.4

Реферат:

В дипломной работе 56 страниц, содержит 33 рисунка и 9 таблиц.

Цель дипломной работы построить фрезеровальный станок с цифровым управлением, с помощью которого возможно обрабатывать дерево, изделия из дерева, пластмассу и мягкие цветные металлы такие как алюминий, латунь и медь.

При выборе компонентов и изготовлении фрезеровального станка основной упор сделан на ценовой критерий.

Большую часть запчастей необходимо заказывать из Китая.

Специфичность дипломной работы состоит в передаче управления 3D принтера на фрезеровочный станок используя микроконтроллер Atmega2560 и плату для разработки 3D принтера комплекта RAMPS1.4. Проект целиком от-начало до конца осуществлен автором работы. В данной работе сравниваются несколько похожих изделий схожей величины, которые существуют на рынке Китая

Описываются выбор строительных запчастей фрезеровочного станка и всего процесса построения. После тестирования анализируются результат.

В итоге работы готовый фрезеровочный станок с цифровым управлением, с рабочей зоной 900x630x250 mm, с точностью 0.1 мм. Для фрезерования используется фреза Makita 710 ватт.

Вся система работает от напряжения 230 В и потребление тока остается ниже киловатта.

ATE70LT

Computer Numeric Control (CNC) Milling Machine's Construction and Management

Tambet Land, student code 144160AAAM, May 2017. – 56 pages

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY * School of Engineering
Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Tutor of the work: assistant professor Raivo Teemets

Key words: CNC router, Atmega2560, RAMPS 1.4

Summary:

The thesis is 56 pages, containing 33 figures and 9 tables.

The purpose of the thesis is to build a numerically controlled milling machine, which can process the wood, wood products, plastics and softer non-ferrous metals such as aluminum, brass and copper. Components selection and preparation of the milling machine is a major focus of price-based selection. Most of the parts are ordered from China.

The thesis is characterized by a 3D printer firmware transferred into milling machine using microcontroller development boards Atmega2560 and 3D printer kit RAMPS1.4. The whole project is carried out from start to finish only through the author's hand. This work is compared to a number of similar products on the market, both in terms of price and dimensions. The thesis describes selection of the milling machines with similar construction and the entire description of the constructional process. In addition there are explained test results.

The result is a numerically controlled milling machine, which has a work area with dimensions 900x630x250 mm, with $\pm 0,1$ mm tolerance. Router used is Makita with 710 watts of power. The whole system is using 1-phase voltage at 230 volts and power consumption is less than a kilowatt.

SISUKORD

| | |
|--|-----------|
| 1. MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE..... | 8 |
| 2. Sissejuhatus..... | 9 |
| 3. Ülevaade hetkel olemasolevatest CNC pinkidest..... | 11 |
| 3.1. Ajalugu | 11 |
| 3.2. TÖÖPINK ROCTECH RC0609A..... | 12 |
| 3.3. TÖÖPINK HIGH-Z S-1000 CNC ROUTER | 14 |
| 3.4. Tööpink X-Carve 1000 mm..... | 16 |
| 3.5. Tööpink Rhonmac-CNC RM-6090 | 17 |
| 3.6. Tööpink X8-1500M CNC Desktop Engraving Machine..... | 18 |
| 3.7. Kokkuvõte | 20 |
| 4. Pingi konstruktsiooni ja ehituse kirjeldus | 21 |
| 4.1. Raam ja teljed | 21 |
| 4.2. Ülekanded..... | 24 |
| 4.3. Kaabeldus | 27 |
| 5. Ajamite elektrooniliste ja mehhaaniliste elementide valik..... | 29 |
| 5.1. Samm-mootor NEMA 23 | 29 |
| 5.1.1. Tutvustus | 29 |
| 5.1.2. Kirjeldus | 30 |
| 5.2. Samm-mootori draiver DM542A | 31 |
| 5.2.1. Tutvustus | 31 |
| 5.2.2. Omadused..... | 32 |
| 5.2.3. Spetsifikatsioon | 33 |
| 6. Juhtimissüsteemi valik ja elektrilise skeemi koostamine..... | 34 |
| 6.1. Mikrokontroller | 34 |
| 6.2. Elektriskeem | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 7. Juhtimisprogrammi koostamine | 39 |
| 8. Testimine ja tulemuste analüüs..... | 43 |
| 9. Freespingi hind | 48 |
| 10. Kokkuvõte | 50 |
| Kasutatud kirjandus | 53 |
| LISA 1..... | 55 |

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

KOOSKÕLASTATUD

Prof. I. Palu

..... 2017

1. MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

Tambet Land, üliõpilaskood 144160AAAM

Magistritöö teema: **Arvprogrammjuhtimisega (CNC) freespingi juhtimine.**

Ülesanne: **Arvprogrammjuhtimisega pingi ja selle juhtimise väljatöötamine.**

Lähteandmed:

1. Freesida peab saama puitu ja pehmemaid värvilisi metalle.
2. Tööpiirkonna suurus 900x600x250 mm, täpsus 0,1mm.
3. Tehniline info sarnaste freespinkide kohta.
4. Tööpeaks võib olla ka 3D printer või laser.

Lahendamisele kuuluvate probleemide loetelu:

1. Ülesande püstitus
2. Ülevaade hetkel olemasolevatest CNC pinkidest
3. Pingi konstruktsiooni ja ehituse kirjeldus
4. Ajamite mehaaniliste ja elektrooniliste elementide valik
5. Juhtimissüsteemi valik ja elektrilise skeemi koostamine
6. Juhtimisprogrammi koostamine
7. Testimine ja tulemuste analüüs
8. Kokkuvõte

Magistritöö esitada instituuti eesti keeles 2 eksemplaris hiljemalt 25. mai 2017.a.

Juhendaja:

Ülesande vastu võtnud:

Dotsent R. Teemets

Üliõpilane T. Land

2. SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö eesmärk on projekteerida ja valmis ehitada arvjuhtimisega (CNC) freespink. Idee selleks tekkis juba ammu, kuid majanduslikud võimalused ja teadmised pole võimaldanud CNC pinki varem ehitada. Olen proovinud koostada lihtsamat pinki puitmaterjalidest, maha kantud koopiamašinate osadest ning kättesaadavatest detailidest, kuid selle lõpptulemus ei rahuldanud mind. Niisiis on plaan ehitada tugevamat sorti CNC pink, mille ehitamiseks on kasutatud enamusega metalli, eelkõige alumiinium ja terasprofiili. Freespingi eesmärk on täita hobide jaoks erikujuliste ja keeruliste detailide täpne valmistamine.

Arvjuhtimisega kontrollitavad seadmed on viimasel ajal väga aktuaalne teema ning igal aastal tuleb uusi lahendusi ning seadmeid juurde. Professionaalsed freespingid muutuvad järjest täpsemaks ja kiiremaks ning hobiseadmed muutuvad tavakasutajale järjest kättesaadavamaks.

Miks just ehitada kõik ise algusest peale? Vastus: sest nii on kõige soodsam ning oluline on ka kogu projekti protsess. Projekti elluviimisel oli tähtis koht maksumusel ehk võimalikult väikse summa eest koostada korralik freespink, millega on võimalik freesida puidust materjale, plaste ja pehmemaid värvilisi metalle nagu alumiinium ja vask. Lisaks eelnevale on võimalik CNC pingi tööpeaks sobitada vajadusel nii plasma- kui ka laserlõikuse tööriistad ning 3D printer.

Konkreetne freespink saab endale „aju“ hoopiski 3D printimiseks mõeldud vabatarkvaralise ATMEGA 2560 mikroprotsessori näol. Seda eelkõige just sellepärast, et viimasel ajal on 3D printimine hoogustunud ning sellega kaasnevad väga erinevad lahendused ning suur kasutajaskond. Loodud on erinevaid vabavaralisi komplekte, milledest populaarseim on RAMPS 1.4 trükkplaadi kasutamine. Selline lahendus tundus mulle kõige terviklikum ja vastuvõetavam, seega olen kohandanud püsivara 3D printerist 3D freesimise jaoks.

Mikroprotsessori püsivara on võimalik vabalt internetist alla laadida leheküljelt www.repetier.com seda nii Linuxi, Maci kui ka Windowsi jaoks. Arvutis kasutan tarkvara *Repetier-Host*, millega saab USB ühenduse kaudu freespinkki juhtida ning ka selle kaudu reaajas infot vaadata. Joonised ja 3D mudelid valmistan ette *Autodesk Fusion 360* tarkvaraga, mis on õppe-eesmärgil samuti tasuta allalaetav. Kogu töö on kirjutatud litsentseeritud kontori tarkvaraga *Microsoft Office Word 2013*.

Käesolevas töös on kasutatud palju pilte. Seda eelkõige sellepärast, et pildid räägivad rohkem kui sõnadega kirjutada jõuab.

Töölaua suuruse määrab suuresti juhtsiinide pikkus, kuid nende pikkuse määrab omakorda vastuvõetav hind. Leidsin interneti kaubamajast nimega *Aliexpress.com* piisavalt hea hinnaga juhtsiinide ja liugurite komplekti ning vastavalt nende pikkusele hakkasin valima muid komponente. Juhtsiinide pikkused on siis vastavalt XYZ telgedele 1200 mm, 800 mm ja 350 mm. Pingi lõikepea liikumisruumiks ehk tööalaks jäi pärast valmimist 900 mm, 630 mm ja 250 mm. Sarnase tööalaga pinke on müügil mitmeid, kuid nende hinnad jäävad mitmete tuhandete eurode väärtusesse. Käesoleva pingi eelarveks olen arvestanud umbes tuhat eurot.

Antud töös võrdlengi mitmeid sarnase tööala suuruse, ehitusliku põhimõtte ja hinnaga freespinke. Mõned on kvaliteetsemad ja mõned on odavamad. Neljandas peatükis kirjeldan pingi raamide ehitust, telgede paigutust ja nende ülekandeid ning kaablite valikut ja paigutust. Sellele järgneb ajamite ja nende juhtimise valik ja kirjeldus, siis juhtimissüsteemi valik ja põhimõtteline elektriskeemi koostamine. Juhtimisprogrammi koostamine on selgitatud peatükis seitse. Töö lõpuosas on juttu valmis freespingi testimisest ning esitatud tulemused koos analüüsiga. Lõpuks on välja toodud antud masina hind ning kokkuvõtlik peatükk kogu tööst.

3. ÜLEVAADE HETKEL OLEMASOLEVATEST CNC PINKIDEST

3.1. Ajalugu

Esimesed automaatsed seadmed ilmusid 19. sajandil. Sel ajal hakati kasutama tööstuses nukkmehhanismiga seadmeid, nagu neid on kasutatud varasemalt käokellades. Algselt kasutati sõjatööstuses tulirelvade kabade kontuuri kopeerimise masinat (1820ndad-30ndad). Kuigi see masin polnud väga esteetilise välimusega, vajas palju viilimist ja silumist, oli selline valmistamine väga palju kiirem ning suudeti toota väga sarnaseid esemeid. Sellise tootmise haripunkt saavutati Esimese Maailmasõja ajaks. Suurimaks puuduseks selliste masinate juures on see, et neid ei ole võimalik abstraktselt programmeerida. Iga uue objekti tootmiseks oli vaja ehitada uus süsteem, sest selline lihtne nukkmehhanism ei suuda lugeda inseneri jooniseid. [3]

Edasi tulid jäljendavad tööriistad, kus pingi operaator salvestas masina liigutused salvestusseadmele ning pärast mängiti seda maha, nagu tänapäeval on kasutusel makrod. Selline analoogsüsteem oli programmeeritav pigem füüsiliselt kui numbriliselt. [3]

Hiljem võeti kasutusele servomehhanismid, et saavutada suurem jõud ning täpsus. Algselt kasutati neid sõjatehnikas, täpsemalt USA sõjalaevadel kahuritornide liigutamisel. [3]

Lennunduses on vaja toota palju sarnaseid keerukaid detaile ning samuti on vaja suurt täpsust. Arvjuhtimine (NC *Numeric Control*) sai alguse, kui Parsons ja Sikorsky hakkasid tootma helikopterite rootorilabasid. Seal hakati kasutama perfokaarte inseneriarvutuste tegemiseks. Tulemuste järgi hakati juhtima X- ja Y-telge. See oli esimene tänapäevase 2,5-teljelise masina prototüüp, mis kasutas palju tööjõudu. 1952. a esitleti esimest arvjuhtimisega treipinki. Tollal oli arvjuhtimine veel väga aeglane protsess. [3]

1956. a võeti Massachusettsi Tehnoloogia Instituudis (*Massachusetts Institute of Technology - MIT*) kasutusele reaalaaja arvuti projekt *Whirlwind*. Kui varasemalt arvutati perfokaarte käsitsi, siis selle arvuti abiga saadi tootmisprotsessi pikkust vähendada kaheksalt tunnilt 15-le minutile. Nii sai alguse CNC (*Computer Numeric Control*). Programmi koodi kandjaks olid ikkagi veel perfokaardid. [3]

1960-ndatel tulid kasutusele perfolindid, kuid tõsisemalt muutsid kogu CNC tööstusharu kiiremaks mikroprotsessorid 1970-ndatel. CNC masinate hinnad alanesid ning inimtegevuse

osa tootmises vähendati drastiliselt. 1970- lõpus ja 1980-ndatel hakkasid ka teised riigid arvukalt tootma CNC masinaid, suurimateks tootjateks said Jaapan ja Saksamaa. [3]

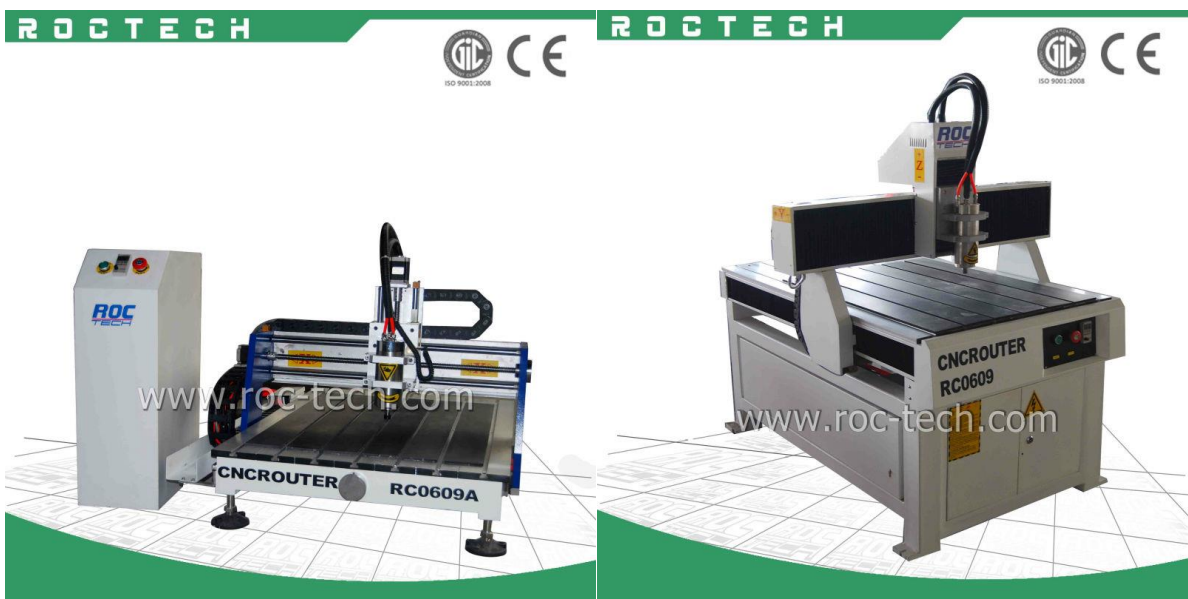
CNC masinate laiem levik tekitas vajaduse standardite järele. Erinevad levinud standardid jäid siiski suuremas osas sarnaseks vektorgraafikat kasutavate plotterite keelele. Nüüdseks on väga levinud standardiks saanud *G-Code* (algselt kasutatud Gerberi teaduslik plotter ja praeguseks kohandatud CNC masinate jaoks). Lisaks sellele on mitmed tootjad hakanud looma ka uusi keeli, et mitte areneda vanast, vaid luua nullist uus, kuid seda vahelduva eduga. [3]

Viimasel ajal on hakatud CNC masinale lisama rohkelt sensoreid, et koguda rohkem andmeid töötuse kohta. [3] Lisatakse erinevaid temperatuuri-, vibratsiooni- ja surveandureid. Kõik selleks, et võimalusel sekkuda tootmisesse ning teha vajalikud muudatused. Pinkide kvaliteet, kiirus ja võimsus on pidevalt kasvanud ning samas on hind tulnud järjest taskukohasemaks, eriti just hobipinkide korral. Pakutakse peaaegu valmis lahendusi ning komplekte.

Iga päevaga on turul järjest rohkem erinevaid masinaid saadaval. Neid toodetakse üle maailma. Kahjuks ei ole Eestis väga palju pakkujaid ning hea hinna ja kvaliteediga pakkujaid pole üldse. Eestis on tegutsenud ettevõtte nimega EDM OÜ alustas tegevust aastal 2013, kuid tundub, et praeguseks on nende turg olematu ning firma tegutsemise kohta internetist infot ei leia. Võrdluseks on toodud valik Hiinast saadavaid CNC pinke ning mõned Euroopast. Kuna selle lõputöö tulemusena valmiv CNC pink hakkab enim kasutust leidma puidu töötlemise alal, siis on võrdlemiseks sobivad pingid mõeldud graveerimiseks.

3.2. TÖÖPINK ROCTECH RC0609A

Hiina toode ROCTECH RC0609A on graveerimiseks ja lõikamiseks mõeldud pink. Sobib väga hästi reklaamide valmistamiseks. Graveerida saab erinevaid pehmemaid materjale nagu messing, alumiinium, plastik, akrüül, puit, MDF (*Medium Density Fibreboard* – keskmise tihedusega puitkiudplaat) ja teisi sarnase kõvadusega materjale. Tolmukaitse kõigil kolmel teljel kaitseb juhtsiine ja kuulkruvi pisikeste osakeste eest ning tagab masina pikema eluea. Ülevaade joonisel 1 ja toote info tabelis 1. [4]



Joonis 1. Tööpink ROC TECH RC0609A

Hinnale lisanduvad veel transpordikulu, tollimaks ja käibemaks. Tegemist on hobimasinistile korraliku tootega. T-soonega töölaud võimaldab kinnitada erinevaid materjale mitmeti ning täpsus on graveerimiseks täiesti piisav. Miinuseks võib lugeda hiinlaste täpsust ja kvaliteeti, tihti peale ei vasta masina passis olevad väärtused reaalsete mõõtmistulemustega.

Tabel 1 ROC TECH RC0609A põhiantmed [4]

| Kirjeldus | Parameeter |
|---|------------------------------------|
| X, Y, Z tööala suurus | 600x900x90 mm |
| Laua mõõtmed | 720x1140 mm |
| Telgede positsioneerimistäpsus liikumisel | $\pm 0,01/300$ mm |
| Positsiooni korratavuse ebatäpsus | $\pm 0,01$ mm |
| Laua pind | T-soonega laud |
| Raami materjal | Teras |
| X, Z struktuur | Ümarsiinid ja TBI kuulkruvi |
| Y struktuur | Hiwin lineaarliugurid ja kuulkruvi |
| Maksimaalne liikumiskiirus | 10000 mm/min |
| Maksimaalne töökiirus | 6000 mm/min |
| Spindli võimsus | 1,5 kW vesijahutusega |
| Spindli kiirus | 0-24000 RPM |
| Juhtmootorite tüüp | Samm-mootorid |
| Tööpinge | 230 VAC, 50 Hz, 60 Hz |

| | |
|----------------------------|--|
| Käsukeel | G-kood |
| Operatsioonisüsteem | Ncstudio/Mach3 |
| Tarkvara | Type3/UcancameV9 (Option: Artcam software) |
| Kaal | 160 kg |
| Hind | \$3500 + transport Hiinast + maksud |

3.3. TÖÖPINK HIGH-Z S-1000 CNC ROUTER

Saksa CNC masinate tootja CNC STEP oli müünud aastaks 2015 seda pinki üle 5600 eksemplari. Firma alustas tööd 2005. aasta algul ning on saavutanud turu enamuse CNC lõikemasinate seas Euroopas oma hinnaklassis. Tooteid pakutakse üle kogu maailma ning neile on antud Saksamaa tehnilise järelevalve ameti TÜV (*Technischer Überwachungsverein*) sertifikaat. [5]



Joonis 2. Tööpink HIGH-Z S-1000 CNC ROUTER [5]

Soontega töölaud lubab kinnitada erinevaid materjale kindlalt paika klambritega, graveerimiseks on hea kasutada MDF (*Medium Density Fiber* – keskmise tihedusega puitkiud)

plaati, et mitte rikkuda alumiiniumist aluslauda. Graveerimiseks ja lõikamiseks sobivad plastid, puit ja pehmemad mitteferriitsed metallid nagu alumiinium, messing ja vask. Kaablid on kaitstud plastikust kaitseketiga, mis ei luba kaablitel liiga väikse raadiusega painduda, et pikendada nende eluiga. Lisaks on paigaldatud mitmed hädastopp-nupud, mis tõstavad ohutust võimaliku vea või probleemi korral. CNC STEP pakub oma pingiga kaasa tarkvara, mille hind ilma masinaga on 1546 €, aga koos masinaga saab selle tasuta kaasa. Lisainfo tabelis 2. [5]

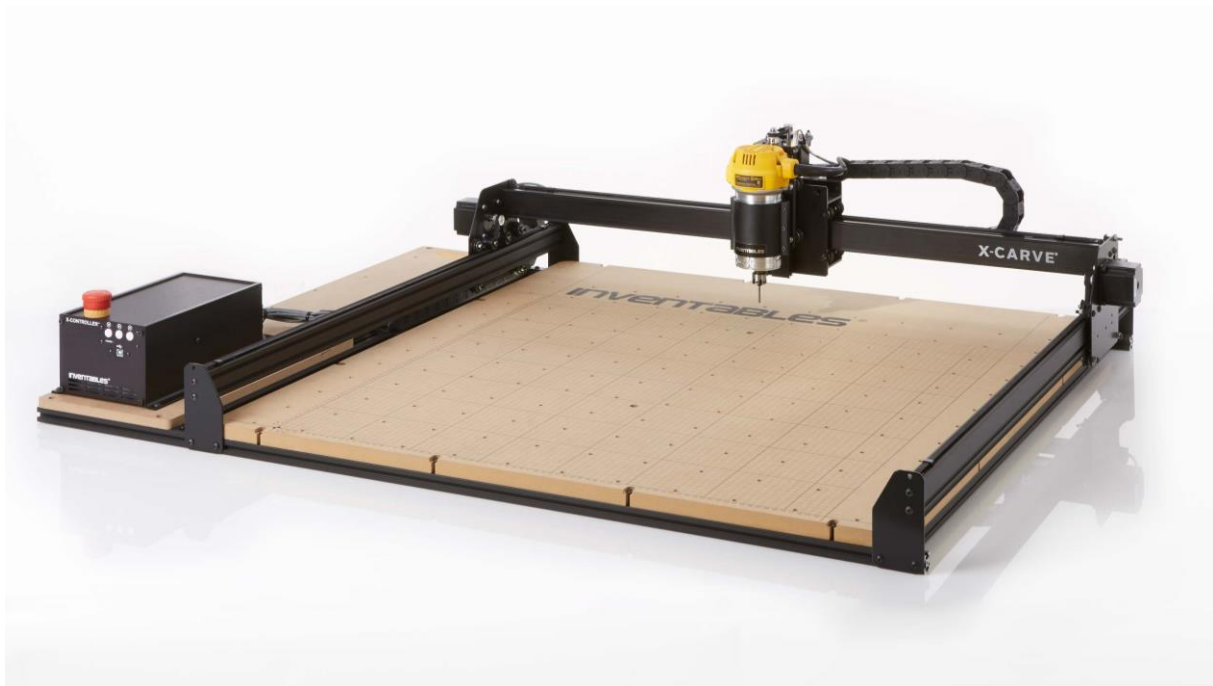
Tabel 2 Tööpingi HIGH-Z S-1000 CNC ROUTER põhiandmed [5]

| Kirjeldus | Parameeter |
|---|--|
| X, Y, Z tööala suurus | 1000x600x110 mm |
| Laua mõõtmed | 1330x690 mm |
| Programmeeritav täpsus | 0,003 mm |
| Positsiooni korratavuse ebatäpsus | ±0,01mm |
| Laua pind | T-soonega laud |
| X, Y, Z struktuur | Ümarsiinid ja Trapezium kuulkruvi |
| Maksimaalne liikumiskiirus, X ja Y | 4000 mm/min |
| Maksimaalne töökiirus | 3000 mm/min |
| Juhtmootorite tüüp | Samm-mootorid |
| Tööpinge | 230 V, 50 Hz |
| Operatsioonisüsteem | WINPC-NC, MACH3, EMC, Linux CNC: Windows / Linux |
| Tarkvara | Täisversioon 3D-Software CAD/CAM ConstruCam-3D koos järeltöötusega Win PCNC ja MACH3 |
| Kaal | 51 kg |
| Hind | 3393 € + transport Saksamaalt |

Tööpink näeb välja väga viisakas ja lihtne (joonis 2). Minimalistlik lähenemine vähendab probleemide teket. X-teljel olevad kaks samm-mootorit tagavad tugeva ning tasakaaluka liikumise. Kuulkravid igal teljel tagavad suure täpsuse ja jäikuse, jättes loksuks +/- 0,03 mm. Kahjuks ei sisaldu hinnas spindel, kuid selle eest on olemas tasuta tarkvara.

3.4. Tööpink X-Carve 1000 mm

Ettevõtte *Inventables Inc.* alustas tööd aastal 2002 ning asub Chicagos. Nende eesmärk on anda loovatele inimestele võimalus oma ideid ellu viia graveerimise ja lõikamise teel. Kodulehel pakutakse kõike, mis võib seonduda 3D graveerimisega, alustades materjalidest ja tööriistadest ning lõpetades valmis CNC komplektide ning tarkvaraga. Masinat ja kõike sinna juurde kuuluvat on võimalik komplekteerida valikuliselt *Inventables* interneti kaubamajas ning seda on võimalik saata üle maailma. Klient peab masina ise kokku panema, kuid osi pole palju ning instruktsioonid on inglise keeles ja videos olemas. Antud töös koostatava masinaga sarnase komplekti kokkupanemisel sain lõpphinnaks umbes 1700 dollarit. See summa on koos spindliga, mille kiirus on 16000-27000 pööret minutis ja võimsus 800 W. Hinnale lisanduvad veel saatekulu, tollimaks ning käibemaks. Sarnane komplekt on mõõtmetega 1000x1000 mm ning tööalaks jääb 750x750 mm. Z-telje töökõrguseks on maksimaalselt 65 mm, mis sobib ainult madalate detailide 3D-graveerimiseks. Positsioonile liikumise kiiruseks on soovitatud 8000 mm/min. Positiivne külg on see, et X-Carve on variantide võrdluses kõige odavam, kuid kahjuks on see ka kõige nõrgem masin. Sobib peamiselt puidu ja plasti graveerimiseks ning lõikamiseks. Pehmemate värviliste metallide jaoks jääb nende samm-mootorite võimsus kahjuks ebapiisavaks. Pilt masinast joonisel 3.



Joonis 3. Tööpink X-CARVE 1000 mm

3.5. Tööpink Rhonmac-CNC RM-6090

Seda masinat saab osta Ühendkuningriikidest, kuid valmistatud on see Saksamaal. Müüakse nime all Rhonmac-CNC, joonis 4. Olenevalt lõiketera tüübist ja kiirusest on võimalik sellega lõigata või graveerida puitu, vahte, kivi ning mõningaid metalle. Masina kere on valmistatud ühes tükis, mis tõstab oluliselt jäikust ning lineaarsed liugurid pakuvad stabiilset pinda olenemata, millist detaili töödeldakse. Samm-mootorite juhtplokid on testitud ning valitud kõrgemast kvaliteedist, mis peaks andma masinale pika eluea. Telgede liugeosad on võimalik katta tolmuakatetega, lisadena saab juurde osta tolmuärastussüsteemi, vaakumtööpinna ja õhkjahutuse. Pöörleva neljanda telje võib masinale lisada töölaua suhtes kas vertikaalselt või horisontaalselt. Info tabelis 3. [7]

Tabel 3 Tööpingi Rhonmac-CNC RM-6090 põhiandmed [7]

| Kirjeldus | Parameeter |
|--|--|
| X, Y, Z tööala suurus | 600x900x100 mm |
| Positsiooni korratavuse ebatäpsus | ±0,01mm |
| Laua pind | T-soonega laud |
| X, Y, Z struktuur | Ümarsiinid ja kuulkrugi (Saksamaa) |
| Maksimaalne töökiirus | 6000 mm/min |
| Juhtmootorite tüüp | Samm-mootorid |
| Tööpinge | 230 V, 50 Hz |
| Kaal | 200 kg |
| Hind | £3769 + transport Ühendkuningriikidest |



Joonis 4. Tööpink Rhonmac-CNC RM-6090 [7]

3.6. Tööpink X8-1500M CNC Desktop Engraving Machine

Hiina tootja OMIOCNC poolt toodetud graveerimispink. Seni võrrelduist võimsaimate mootoritega. Minimalistlik ja puhas disain. Koostatud enamuses alumiiniumelementidest, kaasaarvatud töölaud. Seade on mõeldud peamiselt graveerimiseks või lõikamiseks. Eelnevalt võrrelduist kõige sarnasem käesolevas projektis valmivaga. Põhiandmed on tabelis 4.

Tabel 4 X8-1500M CNC Desktop Engraving Machine põhiandmed. [8]

| Kirjeldus | Parameeter |
|--|-----------------------------------|
| X, Y, Z tööala suurus | 580x790x65 mm |
| Mõõtmed | 1130X900X540 mm |
| Positsiooni korratavuse ebatäpsus | ±0,05mm |
| Laua pind | T-soonega alumiinium laud |
| Raami materjal | 6061-T5 alumiinium sulam |
| X, Z, Y struktuur | Kroomitud ümarsiinid ja kuulkruvi |

| | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Mehaaniline resolutsioon | XYZ-telg : 0.0025 mm/samm |
| Maksimaalne töökiirus | 4000 mm/min |
| Spindli võimsus | 1,5 kW vesijahutusega |
| Spindli kiirus | 3000-24000 RPM |
| Juhtmootorite tüüp | Samm-mootorid, Motor60BYGH-4.2A |
| Tööpinge | 220 V, 50 Hz, 60 Hz |
| Käsukeel | G code/.nc/.ncc/.tab/.txt |
| Operatsioonisüsteem | WIN-XP või WIN7 (32/64bit) |
| Kommunikatsioon | USB 2.0 (Mach3) |
| Kaal | 80 kg |
| Hind | 1900 € + transport Hiinast + maksud |

Lõigata saab erinevaid materjale nagu puidutooted, plastid, vaigud ja värvilised mitteferriitsed metallid (vask, alumiinium, messing jne). [8] Puuduseks pean x-telje koormuslahendust, kuna seda telge liigutab ainult üks mootor ning kuulkrui asub masina keskel. Jäikus võib selle all kannatada. Foto joonisel 5.



Joonis 5. Tööpink X8-1500M CNC Desktop Engraving Machine [8]

3.7. Kokkuvõte

Kolme tootja masinaid valmistatakse väljaspool Euroopa Liitu ning nende hinna määramiseks on vaja eraldi välja otsida lisaks transpordikulule ka tollimaksu suurus ning lisada käibemaks 20%. Tollimaksu saab välja arvutada Eesti tollitariifistiku alusel Maksu- ja Tolliameti kodulehel. Tollimaks arvjuhtimisega pinkidele Hiinast on 1,7%. [9]

Transpordi kulu väärtus on saadud firmalt DHL. [10]

Valuutakursid on võetud *Fx Currency Exchange* kodulehelt. [11]

Tabel 5 Toodete hinna võrdlustabel

| Nimetus ja tootja (riik) | Tööala suurus | Ebatäpsus | Hind + transport + maksud (€) |
|---|----------------------|----------------------|--|
| RC0609A ROCTECH (Hiina) | 900x600x90 mm | ±0,01mm | 3240 + 470 + 731 = 4440 |
| HIGH-Z S-1000 CNC Step (Saksamaa) | 1000x600x110 mm | ±0,01mm | 3393 + 544 = 3937 |
| X-Carve 1000 mm Inventables Inc. (USA) | 750x750x65 mm | 0,075mm – 0,013mm | 1448 + 521 + 355 = 2324 |
| RM-6090 Rhonmac-CNC (UK) | 900x600x100 mm | ±0,01mm | 4359 + 530 = 4889 |
| X8-1500M OmioCNC (Hiina) | 790x580x65 mm | ±0,05mm | 1900 + 470 + 397 = 2767 |
| CNC-Land (Eesti) | 900x630x250 mm | ±0,1mm | 1003 € |

Hinna võrdlustabelist (tabel 5) on näha, et Ühendkuningriikidest CNC pingi ostmise tuleks kõige kulukam ning samas pole tegemist suurima pingiga. Odavaim on mõistagi ise tehtud masin. Valmistoodetest odavaim on Chicago leiutajate poolt valmistatud X-Carve, kuid see masin sobib enamuses pehmete materjalide graveerimiseks ning lõikamiseks. Tabeli 5 seadmetest valiksin valmistootena hiinlaste ehitatud X8-1500M masina. See on teistega võrreldes odavam ning paistab kvaliteetne ning tugev, kuna on kasutatud palju alumiiniumelemente.

4. PINGI KONSTRUKTSIOONI JA E HITUSE KIRJELDUS

4.1. Raam ja teljed

CNC-pingi projekteerimisel tuleb alustada alusraami ja pealisraami ehitusest, sest nende külge kinnitatakse kõik ülejäänud masina elemendid. Valikus on liikuva või liikumatu töötasapinnaga disain. Kuna ping tuleb oma mõõtmetelt piisavalt suur, siis jääb valikusse alles ainult liikumatu tasapinnaga mudel, sest alusplaat on suur ja raske, selle liigutamine on energiamahukas ja keeruline.

Teise suurema valiku tegin y-telje raami kohta. Enamus pinke on suure liikuva y-telje raamiga, mis on kogukad ning omavad liikumisel suur inertsit nagu näiteks joonisel 6 toodu.



Joonis 6. Y-telje raam [12]

Inerti ja raami massi vähendamiseks koostan alusraami, mille parema ja vasaku serva ääred asuvad kõrgemal töötasapinna kohal ning y-telje raami liugurid liiguvad otse alusraami servade peale kinnitatud kroomitud ümarlattidel. Antud töös kasutatav y-telje disain on joonisel 7. See koosneb 15 mm paksusest vesilõikusega välja lõigatud alumiinium plaadist, millele on kinnitatud 20 mm läbimõõduga juhtsiinid.



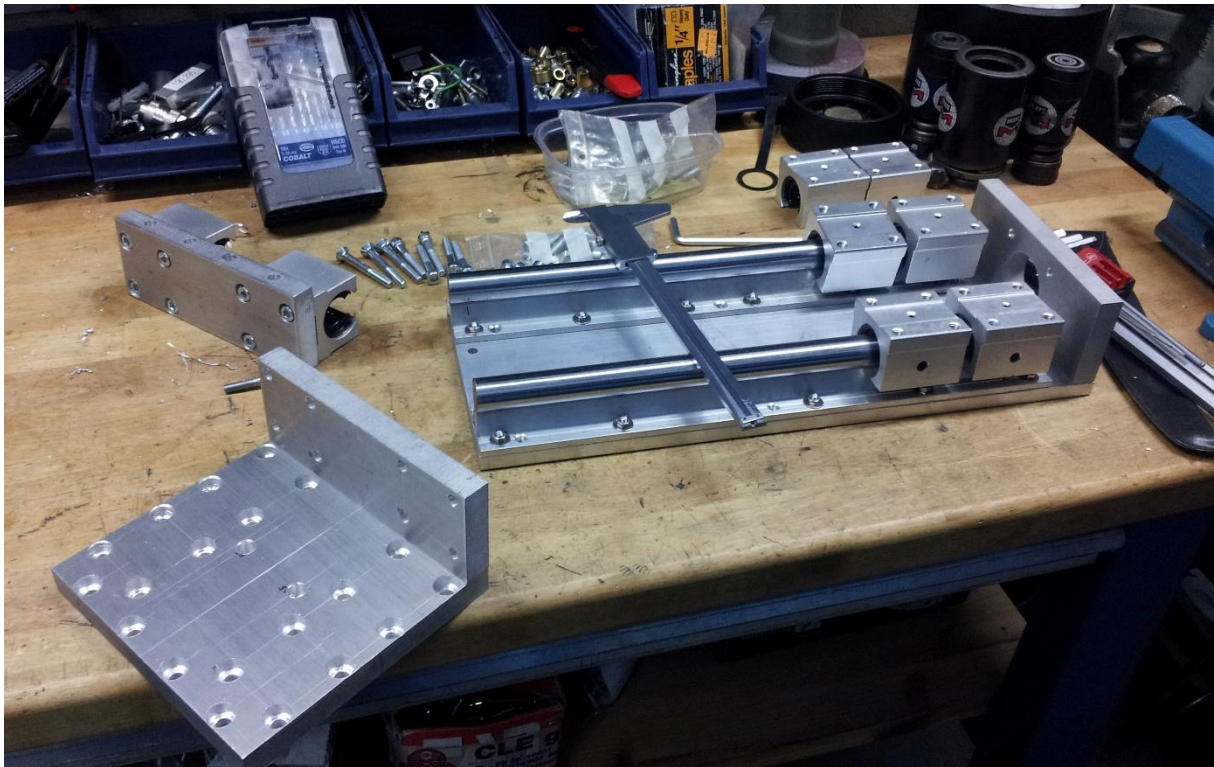
Joonis 7. CNC-Land Y-telje raam

Väikese tolerantsi saavutamiseks peavad raamid olema jäigad, selleks kasutan materjalidena peamiselt terast ja alumiiniumi. Terasprofiili kasutan alusraami ehitamisel. Valisin 50x20 mm nelinurktoru seinapaksusega 2 mm. Valmislõigatud tükid on omavahel kokku liidetud MIG-keevitusõmblusega ning pealt värvitud *Hammerite Hammered* roostevastase värviga (LISA 1 joonis L1).

Pärast alusraami valmimist ning värvi kuivamist sai alustada x-telje juhtsiinide paigaldamisega alusraami ülemistele servadele. Oluline on saada võimalikult paralleelne paigutus. Kuna

keevitatud raam on minu enda valmistatud ning metallitööde teadmiste pagas on väikesevõitu, tuli alusraam mitte just kõige täpsem, erinedes otstest 4 mm. Seetõttu tuli juhtsiini omal kohal liigutada, et vähemalt siinid oleks omavahel paralleelsed. Selleks oli hea kasutada juba kokku polditud y-telje raami koos juhtsiini liuguritega. Liigutades y-telje raami mööda x-telje juhtsiine läksid x-telje siinid ise paralleelselt paika ning tuli ainult märkida aukude puurimise kohad.

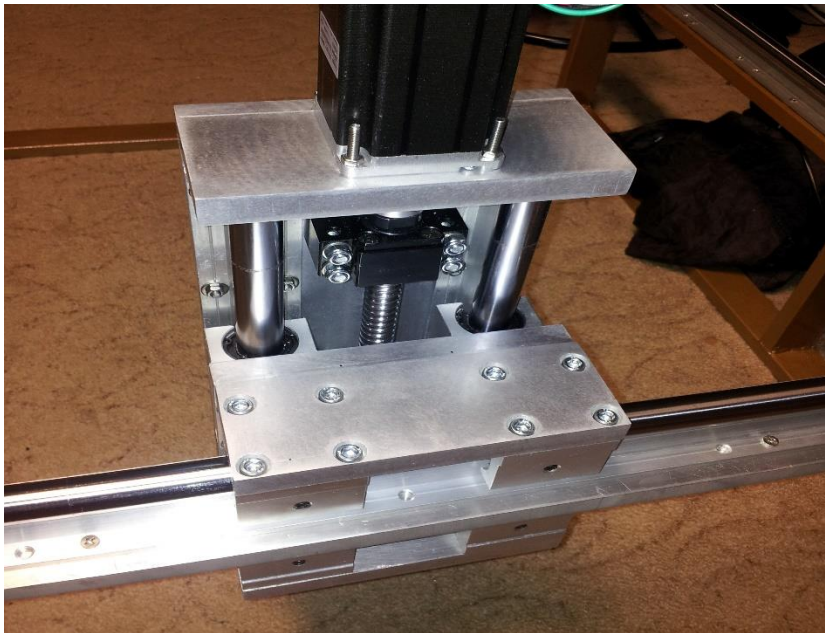
Paigas on nii x-telg kui ka y-telg. Lisada on vaja y-telje liugurid ning z-telg. Detailide täpseks kokkupanekuks peab olema tolerantis olematu lähedane. Selle saavutamiseks tegin kõigepealt arvuti programmis *SolidWorks* 3D mudelid kõigist detailidest ning hakkasin neid seal kokku sobitama. Detailide omavahelised kinnitused on tehtud poltliite abil, selleks alumiiniumi sisse auke puurides ja seda neid keermestades. Abijooned sai alumiiniumi peale kanda täpselt nihiku enda teravike abil nagu on näha joonisel 8 all vasakus nurgas yz-telje ühendusplaadi peal. Joonisel on veel näha 20 mm läbimõõduga juhtsiinid z-telje jaoks ning liugurid nii y-telje kui ka z-telje jaoks.



Joonis 8. Z-telje ehitus

4.2. Ülekanded

Z-telje kuulkruvi koos z-telje samm-mootoriga on näha joonisel 9. Olles pingutanud ära kõik poldid, ei tundu kuskil olevat mingisugust loksut. Enne detailide kokkupanemist määrisin liugurite laagrid laagri määrdeainega ning puhastasin üleliigse määrde. Poldide vahele on lisatud keermeliim *Loctite 243*, mis on keskmise tugevusega keermeliim, mille lahti tuleku pöördemoment M10 poldidel on 26 Nm.



Joonis 9. Z-telje ja y-telje liitumispunkt

Z-telg on liigutatav kuulkruvi kaudu samm-mootori abil. Kasutasin kuulkruvi, kuna sellel on ilma loksuta kuulmutter, tagamaks piisavat jäikust. Kuulkruvi koosneb komplektist, millesse kuuluvad järgmised osad (joonis 10): kuulkruvi (5 mm sammuga ehk üks pööre tagab viie-millimeetrise lineaarliikumise), kuulkruvi ülemine kinnitus BK12 (mootoripoolne) ja alumine kinnitus BF12, kuulmutter, kuulmutri kinnitus, kuulkruvi ja mootori ühenduspuks (6 mm → 8 mm) ja kuulkruvi stopperid 2tk. Detailide täpseks paigutamiseks oli palju abi eelnevalt loodud arvutis 3D mudelist.



Joonis 10. Kuulkruvi komplekt 1605 [18]

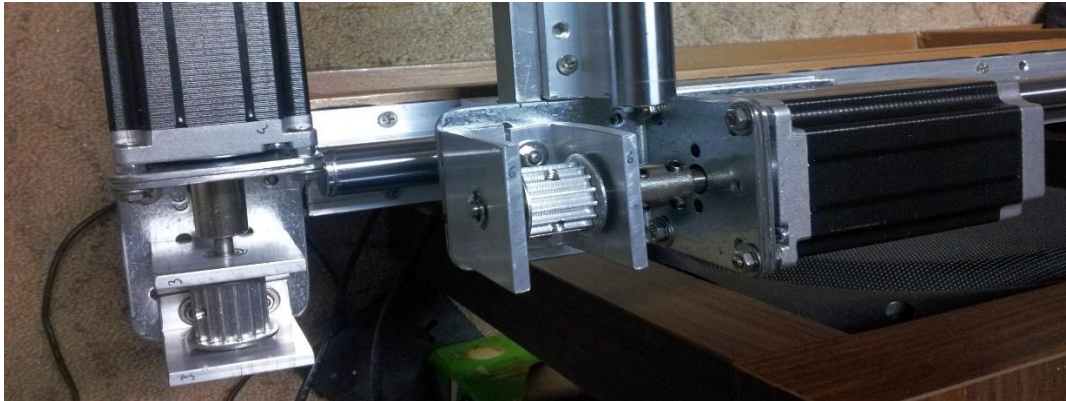
X- ja y-telje ülekandeks on planeeritud hammasrihm ülekanne. See pole küll nii täpne ja töökindel kui kuulkruvi variant, kuid kordades soodsam. Näiteks antud z-telje 350 mm pikkune kuulkruvi komplekt maksis sama palju kui x-telje 1200 mm ja y-telje 800 mm hammasrihma variant kokku. Hammasrihmana kasutasin Hiina ettevõtte *POWGE* valmistatud rihma HTD 5M laiusega 15 mm. See on standardi järgi profileeritud rihm, milles on tugevuseks ja väljavenimise tõkkeks terastrossid, joonis 11. Hammasrihma tõmbetugevust pole välja toodud, kuid antud juhul kasutatud samm-mootorite puhul jääb piiravaks teguriks pigem nende voolutugevus.



Joonis 11. Hammarihm HTD 5M, 15 mm [18]

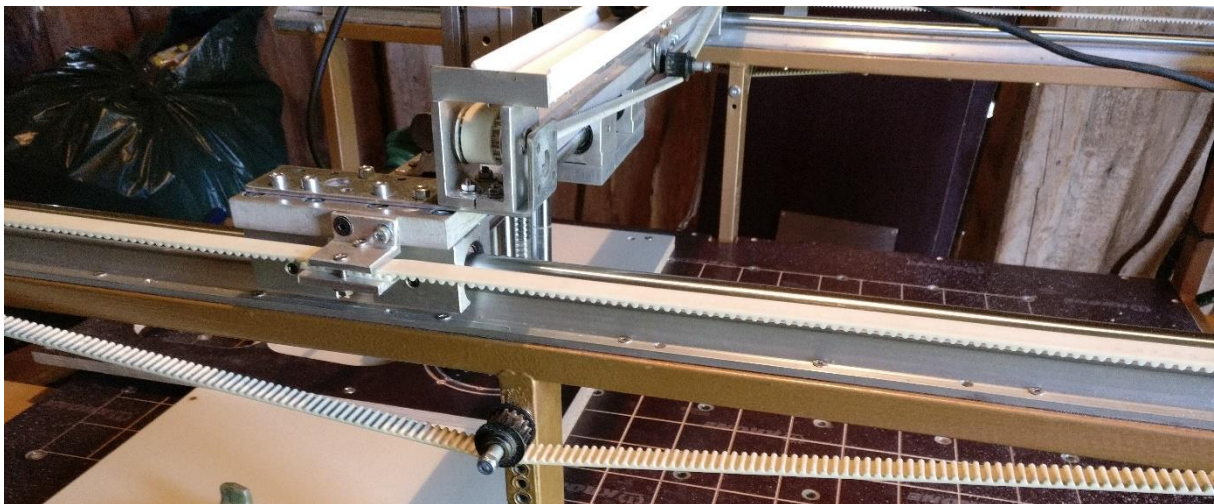
Hammasrihmale on vaja ka hammastega plokk, mis sobiks täpselt antud rihmale. Interneti kaubamajast *Aliexpress* leidsin vastavad plokid, mille augu läbimõõt on 6 mm ja hambaid on 15, hambaprofiil on täpselt hammasrihmale sammuga 5M. Ploki sees on võllile kinnitamiseks kaks sisekuuskant kruvi. Ploki jaoks pidin ehitama kronsteini, mis hoiaks teda täpselt samm-

mootori teljega samas kohas. Selleks kasutasin 50 mm x 50 mm L-profiili alumiiniumist paksusega 5 mm. Märkinud ära kohad, kuhu tuleb ploki võll, puurisin suurema augu õhukese kuullaagri jaoks, mis jääb ploki võlli jaoks. Võll ise on paika pandud stopperseibiga, et laager alumiiniumprofiilist välja ei tuleks. Samm-mootori võll on ühendatud ploki võlliga läbi ühenduspuksi, mille ühel pool on 6 mm auk ploki võlli jaoks ja teisel pool 8 mm auk mootori võlli jaoks. Lahendus x-telje ja y-telje jaoks on joonisel 12.



Joonis 12. Samm-mootori ja ploki ühendus

Joonisel 13 on näha x-telje hammasrihma kinnitus zy raamile ning rihma pingutuseks kolmas hammasratas. Viimast saab liigutada alla poole ehk pingsuse poole sentimeetriste sammudega.



Joonis 13. Hammasrihma pingutus

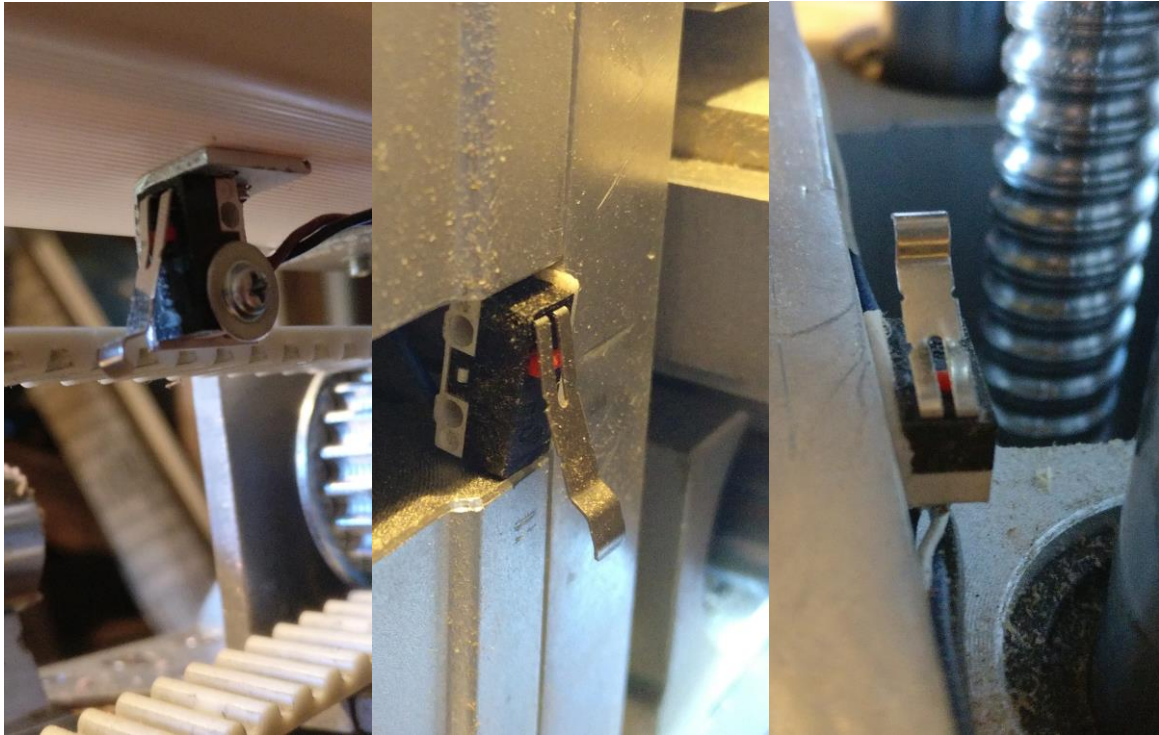
4.3. Kaabeldus

Samm-mootori kaabliks freespingi peal valisin 4x0,75 kontrollkaabli koos varjestusega. Varjestus on oluline, kuna samm-mootoritest käib läbi suure sagedusega erisuunalised voolud ning see tekitab elektromagnetilisi häireid. Kaablid on kaitstud plastist kaabliketiga nagu joonisel 14. See väldib kaabli paindumist väikese raadiuse alla ning hoiab kõiki kaableid korralikult organiseeritult.



Joonis 14. Plastist kaabliket

Lisaks mootorite juhtimisele on freespingi küljes kaablid ka lõpulülite jaoks. Selleks on kasutusel jällegi kontrollkaabel, seekord mõõdus 6x0,5. Telgede lõpu ja alguse lülititena kasutan väikeseid mikrolüliteid, mis on paigutatud freespingi iga telje liikumismaa otspunktidesse.



Joonis 15. Freespingi x-, y- ja z-telje lõpu mikrolülitid

Kokku on neid kuus tükki. Loogika lüliti taga on selline, et lüliti on vabas asendis juhtiv ehk viie voldi suurune signaal liigub läbi lüliti vastavasse kontakti mikrokontrolleris. Kui pinge kaob vastaval digitaalsisendil ära, saab masin aru, et on jõudnud lõpp-punkti ning jääb seisma. Sama juhtub ka siis, kui juhe on katki või vooluring ei ole täiuslik ning ekraanil on näha, milline lüliti on aktiveerunud. Mikrolüliti freespingi küljes on kujutatud joonisel 15.

5. AJAMITE ELEKTROONILISTE JA MEHHAANILISTE ELEMENTIDE VALIK

5.1. Samm-mootor NEMA 23

5.1.1. Tutvustus

On olemas väga erinevaid samm-mootoreid, milledest mõned vajavad erilisi juhtplokke (draivereid). Sagedaselt kasutusel olevatest mootoritest populaarsemad on püsिमagnetiga ja hübriid samm-mootorid, bipolaarsed (üldjuhul 4 juhet) või unipolaarsed (üldjuhul 6 või 8 juhet). Mida suuremad on mootori gabariidid, seda võimsam see üldjuhul on. Teine suurem erinevus on sammude arv ühe täispöörde sooritamiseks. Lihtsamad algavad neljast sammust pöörde peale (sammu suurus on 45 kraadi) ning keerukamad on juba 400 sammu pöörde peale (sammu suurus on 0,9 kraadi). Võlli järgi on erinevusi mitmeid: standardne ühe võlli otsaga mootor, kahe võlli otsaga ehk võll läbib mootorit ning keermega võllid, mida kasutatakse peamiselt lineaarajamites. [14] Antud töös olen valinud mootorid läbiva võlliga, sest hiljem on plaan kinnitada võlli teise otsa käepide, millega saab täpselt mootori asendit muuta.

Valisin selle mootori, kuna see on oma mõõtudel kõige võimsama hoidetugevusega. Hinnavahe palju nõrgemate mudelitega oli kaduvväike, seega ei hakanud väiksemaid vaatamagi. Lõikamisel vajaminev arvutatav jõud sõltub väga paljudest teguritest nagu näiteks materjali tugevusest, etteandekiirusest, lõiketera kujust, freesi kiirusest, juhtsiinide ja laagrite hõõrdetakistustest ja paljudest teistest parameetritest. Seetõttu lähtusin oma valikul teiste poolt valmis tehtud töödest ja foorumi ning ettevõtete soovitudest.

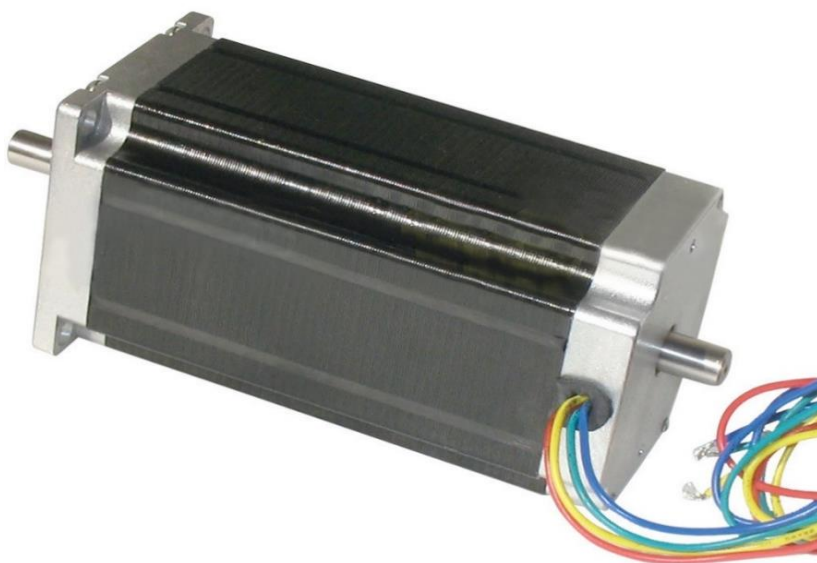
Plaanis on kasutada 1/16 mikrosamme, kuid vastavalt tabelile 6 jääb esialgselt jõumomendist alles ainult 9,8 % ehk 0,29 Nm hoidetugevust. Mikrosammude kasutamine muudab masina töö tunduvalt sujuvamaks, tekitab töötamise ajal vähem mehhaanilist müra ning vähendab resonantsi probleeme, kuid seda hoidetugevuse arvelt.

Tabel 6 Hoidetugevuse sõltuvus mikrosammust [20]

| Mikrosamm / täissamm | % hoidetugevus / mikrosamm |
|----------------------|----------------------------|
| 1 | 100 % |
| 2 | 70,71 % |
| 4 | 38,27 % |
| 8 | 19,51 % |
| 16 | 9,8 % |
| 32 | 4,91 % |
| 64 | 2,45 % |
| 128 | 1,23 % |
| 256 | 0,61 % |

5.1.2. Kirjeldus

Joonisel 16 on kujutatud 3 Nm hoidetugevusega samm-mootorit NEMA 23. Tegemist on läbiva 8 mm võlliga mudeliga, mille sammu pikkuseks on 1,8 kraadi ehk ühe pöörde peale on 200 sammu. Mõõtmed on mootoril järgmised: otsaplaat on 57 x 57 mm ja pikkus 112 mm. Mähisevool on kuni 3 amprit, takistus 1,6 oomi ja induktiivsus 6,8 mH. Kaalub 1,4 kg. Juhtmete värvikood on järgmine: punane A+, roheline A-, kollane B+ ja sinine B-, joonis 16. [13]



Joonis 16. Samm-mootor NEMA 23

Samm-mootori ühendamisel on oluline jälgida mähiste polaarsust, et tagada võlli õiges suunas pöörlemine. Selleks on peamiselt kaks lihtsat võimalust. Esimene variant on muuta ühe mähise polaarsust, näiteks, kui mähiste otsad on ühendatud ABCD ning võll pöörleb vastupäeva, siis muutes juhtmete järjekorda ABDC saame päripäeva liikumise. Teiseks võib ümber tõsta mähiste järjekorda, $ABCD \rightarrow CDAB$. Kui aga juhtmete ümbertõstmine on problemaatiline, siis on võimalik pöörlemise suunda muuta ka tarkvaraliselt.

5.2. Samm-mootori draiver DM542A

5.2.1. Tutvustus

DM542A draiver on täielikult digitaalne samm-mootori draiver, mis sisaldab täiendatud digitaalset signaaliprotsessori algoritmi, mis põhineb mootorijuhtimise tehnoloogia viimasel sõnal. Mõeldud kasutamiseks kahe pooluspaariga samm-mootorile. DM542A draiveri puhul on saavutatud enneolematu süsteemi sujuv koostöö, hõlmates optimaalset jõumomenti ning kõrvaldatud on ka ebastabiilsus keskmisel koormusel. Draiveri automaatne mootorituvastus ja parameetrite seadistus lubab DM542A draiverit kasutada paljude erinevate samm-mootorite korral. Võrreldes analoogsignaali-mootori juhtimisplakkidega, eraldab DM542A vähem soojust, müra ning pakub sujuvamat liikumist. Draiveri üldvaade on joonisel 17. [1]

Valisin selle draiveri, kuna see oli mootorite ja toiteplakkide komplektiga koos. See draiver on ideaalne taskukohaste seas, juhtimaks samm-mootorit NEMA 23, olles omadustelt natuke võimsam kui mootor ise.



Joonis 17. Samm-mootori draiver DM542A [1]

5.2.2. Omadused

- Anti-resonants pakub optimaalset jõumomenti ja kõrvaldab ebastabiilsuse keskmisel koormusel.
- Automaatne mootori identifitseerimise ja parameetrite seadistuse tehnoloogia pakub optimaalset tulemust erinevate samm-mootorite korral.
- *Multi-Stepping* (multi-sammud) võimaldab madala resolutsiooniga sammu sisendist saada kõrge resolutsiooniga mikro-samm väljundit, mis parendab mootori sujuvamat liikumist.
- 15 erinevat mikro-sammu resolutsiooni valimise võimalust: 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 25600, 1000, 2000, 4000, 5000, 8000, 10000, 20000 ja 25000.
- Sujuvkäivitus ilma „hüppeta“.
- Sisendpinge vahemik 18-50 V alalispinget.
- Kaheksa valikut hetkevoolu piiramiseks: 1 A, 1,46 A, 1,91 A, 2,37 A, 2,84 A, 3,31 A, 3,76 A ja 4,20 A.

- Sisendimpulsi maksimaalne sagedus on 200 kHz, TTL (*transistor-to-transistor logic*) sobivus ja optiliselt isoleeritud sisend.
- Automaatne voolu vähendamine tühiolekus.
- Sobib kahe- ja neljapooluseliste mootoritele.
- PUL/DIR (impulss ja suund) ja CW/CCW (päripäeva ja vastupäeva pöörlemine) toetus.
- Liigpinge ja –voolu kaitse. [1]

5.2.3. Spetsifikatsioon

Tabelis 7 on toodud ära draiveri DM542A põhiandmed.

Tabel 7 DM542 andmetabel [1]

| Parameeter | DM542A | | | |
|-----------------------|--------------------------|----------|------------------------------|------|
| | Miinumum | Nominaal | Maksimum | Ühik |
| Väljundvool | 1.0 | - | 4.2 | A |
| Sisendpinge | +20 | +36 | +50 | VDC |
| Loogika signaali vool | 7 | 10 | 16 | mA |
| Impulsi sisendsagedus | 0 | - | 200 | kHz |
| Pulsilaius | 2.5 | - | - | µs |
| Pulsi pinge | 5 | - | 24 | VDC |
| Isolatsioonitakistus | 500 | | | MΩ |
| Jahutus | Konvektsioon | | | |
| Töökeskkond | Keskkond | | Vältida tolmu, õli, niiskust | |
| | Töökeskkonna temperatuur | | -10 °C ... + 45°C | |
| | Niiskus | | 40 % RH – 90 % RH | |
| | Töötemperatuur | | 70 °C Max | |
| | Vibratsioon | | 5,9 m/s ² Max | |

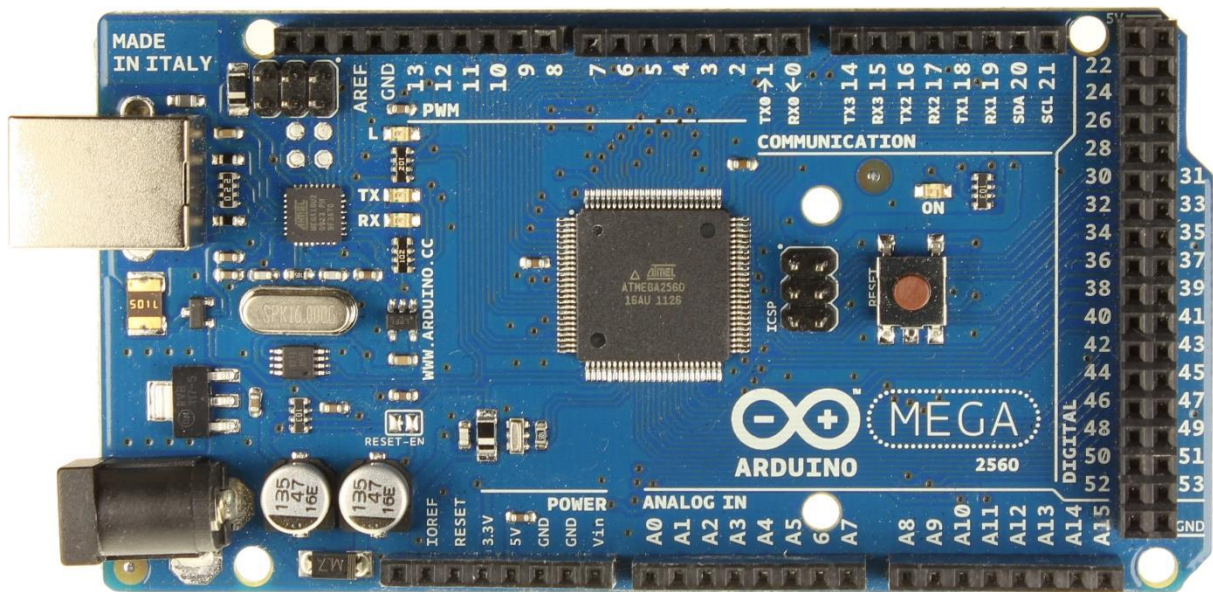
Antud töös on draiverid seadistatud kolme esimese bitiga OFF-ON-OFF ehk 2,36 A peale nominaalis ning 3,0 A maksimumis. Samm-mootorite sammud on seadistatud bittidega 5 kuni 8 ehk ON-ON-OFF-ON ehk sammude arvuks pöörde peale on 3200.

6. JUHTIMISSÜSTEEMI VALIK JA ELEKTRILISE SKEEMI KOOSTAMINE

Peamised kaks suunda CNC masina juhtimiseks on personaalarvutil ja iseseisev mikrokontrolleril põhinev juhtimine. Personaalarvuti puhul on tegemist otsese juhtimisega arvuti poolt läbi ühenduskaablite. Varasemalt kasutati kommunikatsiooni loomiseks peamiselt paralleel- või jadapordi ühendust, kuid tehnoloogia areng on jõudnud sinnamaale, et praegu on võimalik CNC kontrolleri ja arvuti vahel luua ühendust nii traadiga kui ka traadita. Galvaaniliste ühenduste puhul on kasutusel nii USB-port kui ka võrgukaabel ning traadita ühenduse puhul kasutatakse sinihammast (*Bluetooth*) ja traadita interneti ühendust (*WiFi*). Iseseisva mikrokontrolleri korral saab kasutada ka mälukaartilt (*SD-card*) eelnevalt valmistatud koodijada. Sellisel juhul pole arvutit ning juhtimistarkvara CNC pingi juhtimiseks üldse vajagi.

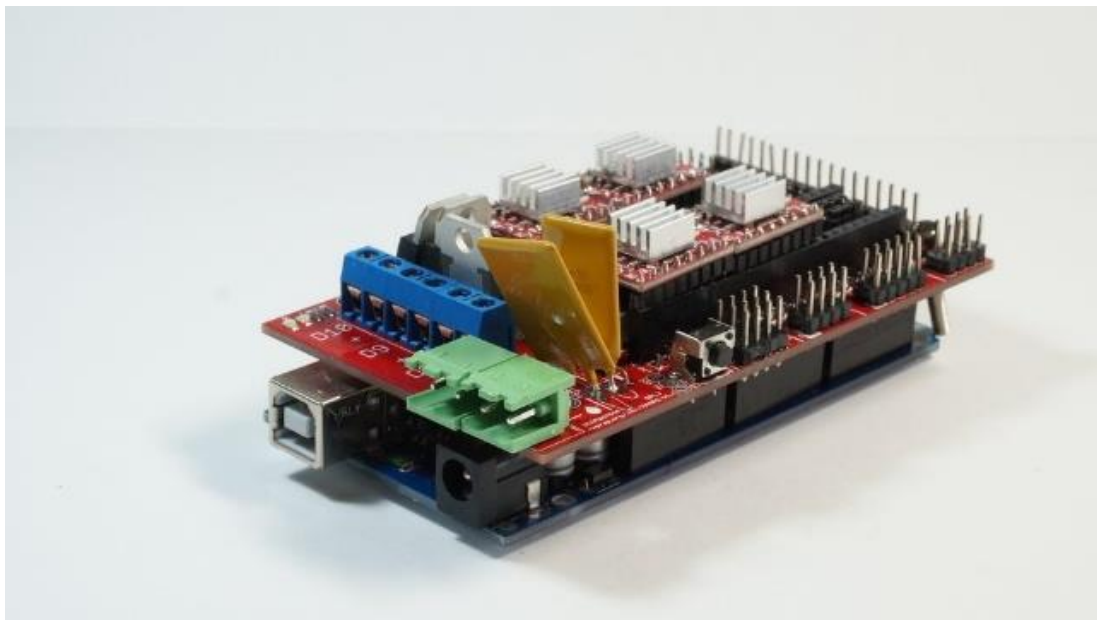
6.1. Mikrokontroller

Antud töös kasutan AVR mikrokontrollerit ATMEGA 2560 koos arendusplaadiga, mis on tuntud nime all kui *Arduino Mega 2560*, joonisel 18. Sellel on 54 sisendit/väljundit (milledest 15 saab kasutada pulsilaiusmodulatsiooni väljunditena), 16 analoogsisendit, 4 riistvara jadaühenduse porti, sagedus on 16 MHz, ühendus arvutiga toimub läbi USB liidese. Sisendpingena saab kasutada alalispinget maksimaalselt 6-20 volti, aga soovitatud on 7-12 volti, tööpingeks on 5 V. Välmälu (*Flash Memory*) on 256 kB, staatilist muutmälu (*SRAM - Static Random Access Memory*) on 8 kB ja elektriliselt kustutatavat püsikälu (*EEPROM - electrically erasable programmable read-only memory*) 8 kB. [15]



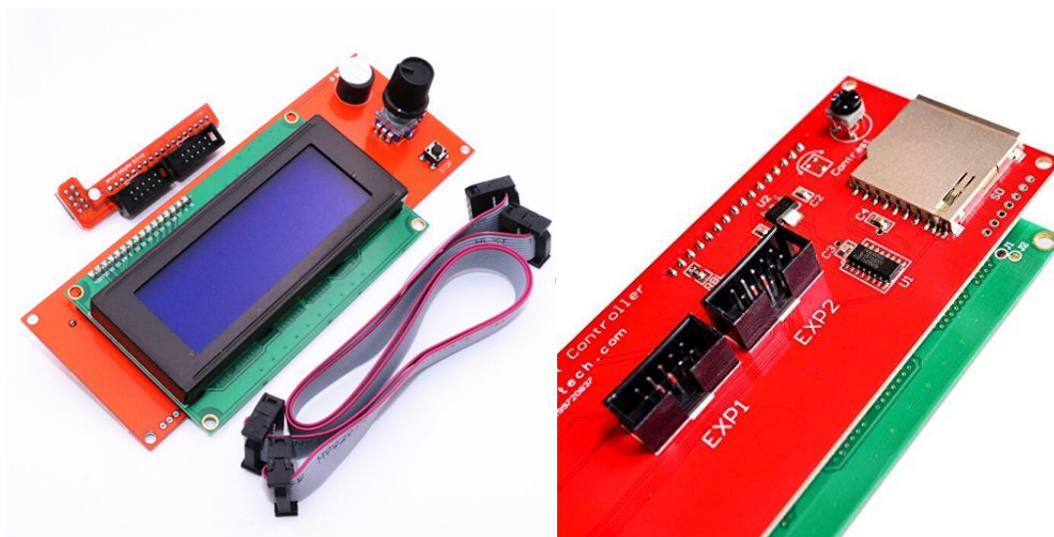
Joonis 18. Mikrokontroller Arduino Mega 2560

Valisin sellise mikrokontrolleri, kuna esialgselt oli plaanis ehitada 3D printer ning see komplekt sisaldas lisaks kontrollerile veel laiendusplaati RAMPS 1.4, joonisel 19, mis on mõeldud lihtsama 3D printeri juhtimiseks. Sellele plaadile saab otse kinnitada väiksemat sorti samm-mootori draiverid voolupiiranguga kuni 1 A.



Joonis 19. Laiendusplaat RAMPS 1.4

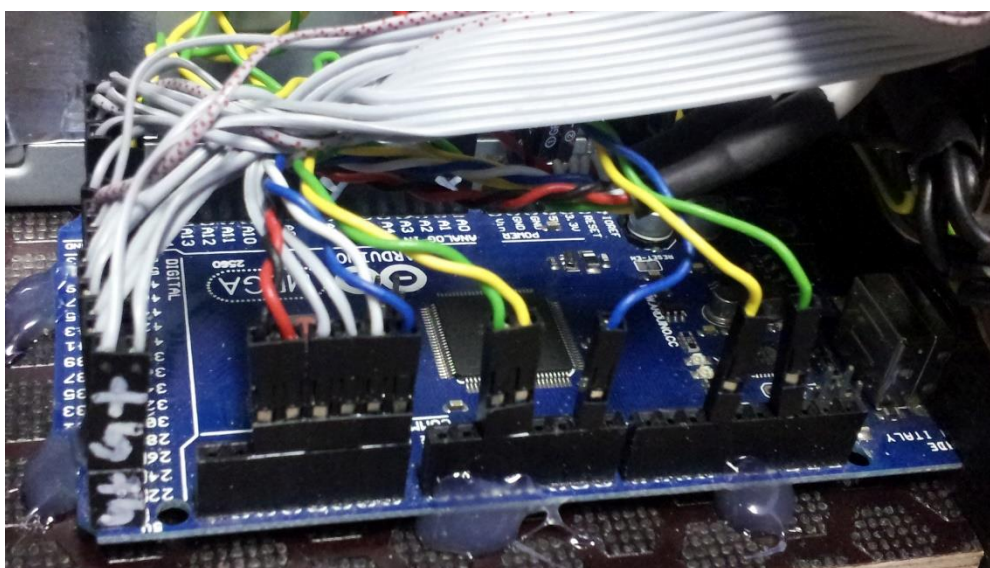
Lisaks kuulub komplekti veel neljarealine ja kahekümne tähemärgi pikkune ekraan, millel on enkoodriga surunupp lüliti, mälukaartilugeja ning algseadistuse nupp, joonisel 20.



Joonis 20. Laiendusplaadi RAMPS 1.4 ekraan ja mälukaartilugeja

RAMPS 1.4 laiendusplaat ühendub ATMEGA 2560 plaadi külge täpselt nagu joonisel 19 ning lintkaablitega on RAMPS 1.4 plaadile külge poogitud ekraan koos mälukaartilugejaga.

Antud töös olevad samm-mootorid on RAMPS 1.4 paigaldavatele draiverite jaoks liiga võimsad. Samas ei ole CNC lõikepingi puhul üldse vaja 3D-printerile iseloomulikke funktsioone nagu prindipea ja põhjaplaadi soojendus. Seetõttu otsustasin RAMPS 1.4 plaadi vahelt üldse ära võtta ning ühendada ekraani, mälukaartilugeja ja kõik ülejäänud otse ATMEGA 2560 arendusplaadile. Selleks kontrollisin galvaaniliselt üle kõik juhtmed ja kontaktid ning kasutasin abiks ka RAMPS 1.4 andmelehte ning elektriskeemi. Tulemus on joonisel 21.



Joonis 21. Ekraani juhtmed otse ATEMGA 2560 kontrolleri külge

Ärajäetud trükkplaadi RAMPS 1.4 ühenduste asendustabel näitab millistele ATMEGA 2560 jalgade külge mälukaartilugeja ja ekraani trükkplaat otse sobib. Terminal 1 ja terminal 2 määravad ära kümnekohalise pistiku ühendusklemmi asukohta mõlemas pistikus nagu seda on näha joonisel 20. Tabeli 8 teine ja neljas tulp näitavad ATMEGA 2560 mikrokontrolleri ühendusklemmi asukohta. Täht „D“ näitab, et tegemist on digitaalse sisend-väljund klemmiga.

Tabel 8 RAMPS 1.4 trükkplaadi asendustabel

| Terminal 1 | ATMEGA2560 | Terminal 2 | ATMEGA2560 |
|----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| klemmi number | klemm | klemmi number | klemm |
| 1 | D37 | 1 | D50 |
| 2 | D35 | 2 | D52 |
| 3 | D17 | 3 | D31 |
| 4 | D16 | 4 | D53 |
| 5 | D23 | 5 | D33 |
| 6 | D25 | 6 | D51 |
| 7 | D27 | 7 | D49 |
| 8 | D29 | 8 | D41 |
| 9 | GND | 9 | GND |
| 10 | +5V | 10 | Ei kasutata |

Joonisel 22 on näidatud põhimõtteline elektriskeem. See hõlmab ainult minu poolt tehtud muudatusi ja lisa, mis on seotud mikrokontrolleri kasutamisega selles töös. Ülejäänud ATMEGA 2560 arendusplaadi ühendused on välja jäetud ning neid saab vaadata mikrokontrolleri kodulehelt. Lihtsuse mõttes on ka tabel 8 andmed elektriskeemist välja jäetud. Elektriskeem on joonistatud kasutades interneti tarkvara *SchemeIt*, kus saab tasuta kasutajana luua jooniseid ja neid salvestada ning ka eksportida. [19]

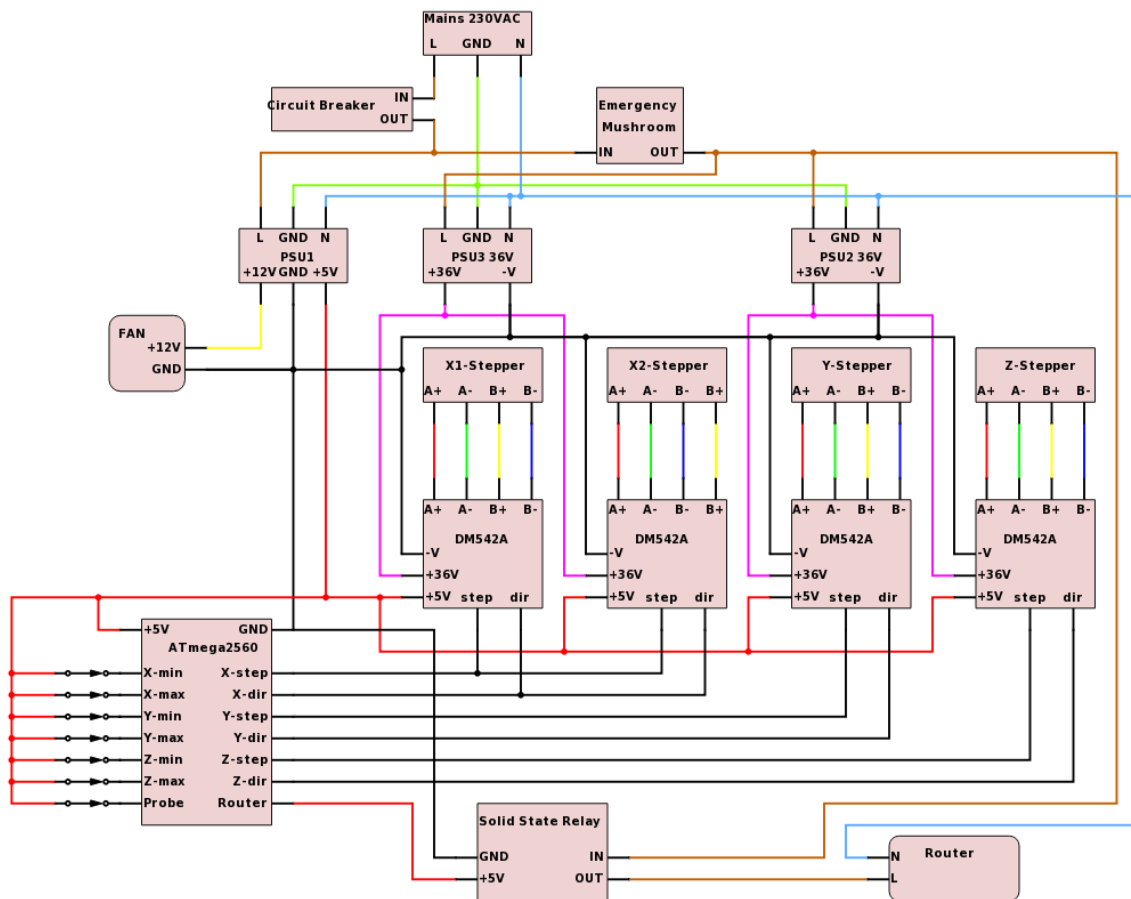
6.2. Elektriskeem

Joonis 22 algab võrgust vahelduvvoolu võtmisega läbi kaitselüliti, mille tüüp on B10. Seejärel antakse toide edasi toiteploki PSU1, mis loob alalisvoolu pingega 12 volti ja 5 volti. Esimene pinge on mõeldud 12 cm läbimõõduga arvutiventilaatori toiteks, mis on töös kogu aeg, kui

kontrollerikast on pingestatud ning kaitselüliti suletud asendis. Alalispinge 5 volti on toiteks mikrokontrollerile ning samm-mootorite draiveritele, lisaks saab sellest toite ka ekraan, mälukaartilugeja ja piirlülid. Kontrollerikasti peal on seenekujuline ohutuslüliti, mis lülitab välja kasti jõuahelad. Toide jääb alles kontrolleritele ja ventilaatorile. See on selleks, et võimaliku vea korral jääks ekraanile alles info, mis võib aidata võimaliku vea tuvastamisel.

Mikrokontrolleri digitaalsisend „Probe“ on mõeldud sondi jaoks, mis vastava käsu korral hakkab mõõtma töötasapinna asendit z-telje suhtes. Käsuiga G32 hakkab freespink sondiga mõõtma tasapinnal etteantud punkte ning teeb vastavad arvutused korrektuuriks.

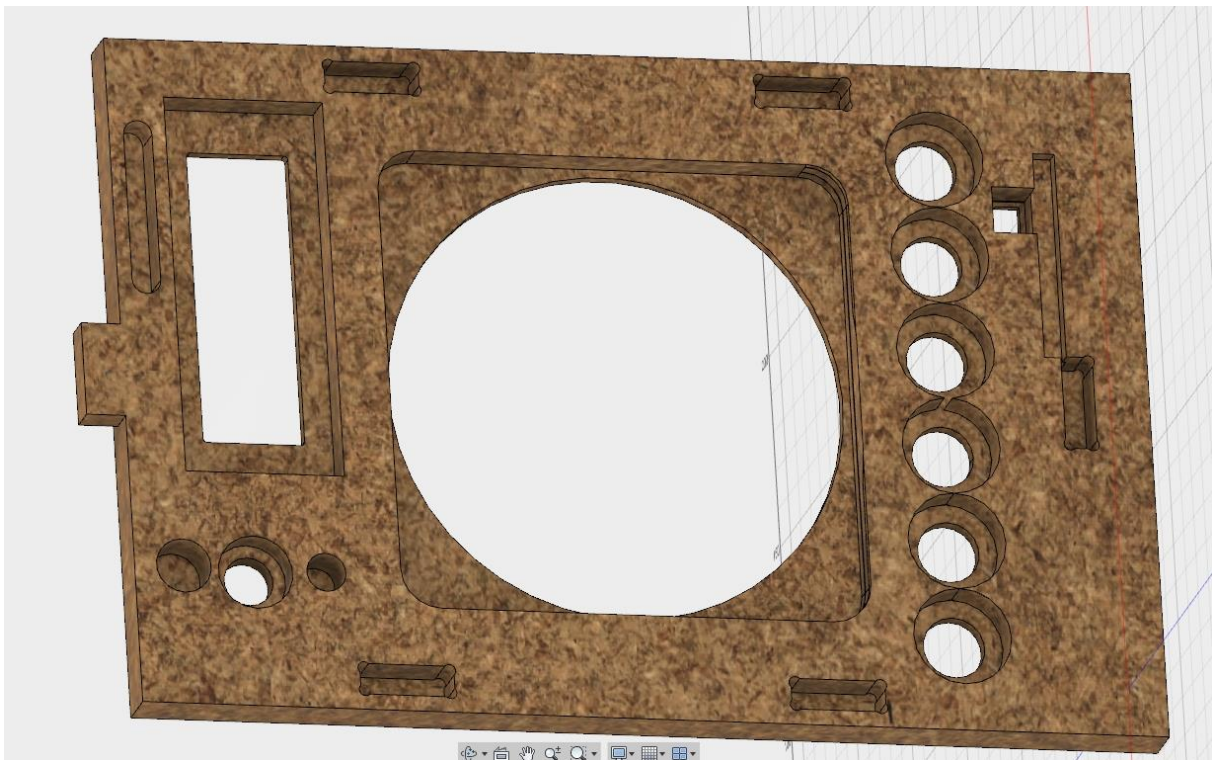
Digitaalväljund „Router“ on kasutusel freesimootori tööle ja seisma panekuks. G-koodis on selleks käsud M106 ja M107. G-koodi kohta täpsemalt juhtimisprogrammi koostamise juures.



Joonis 22. Põhimõtteline elektriskeem

7. JUHTIMISPROGRAMMI KOOSTAMINE

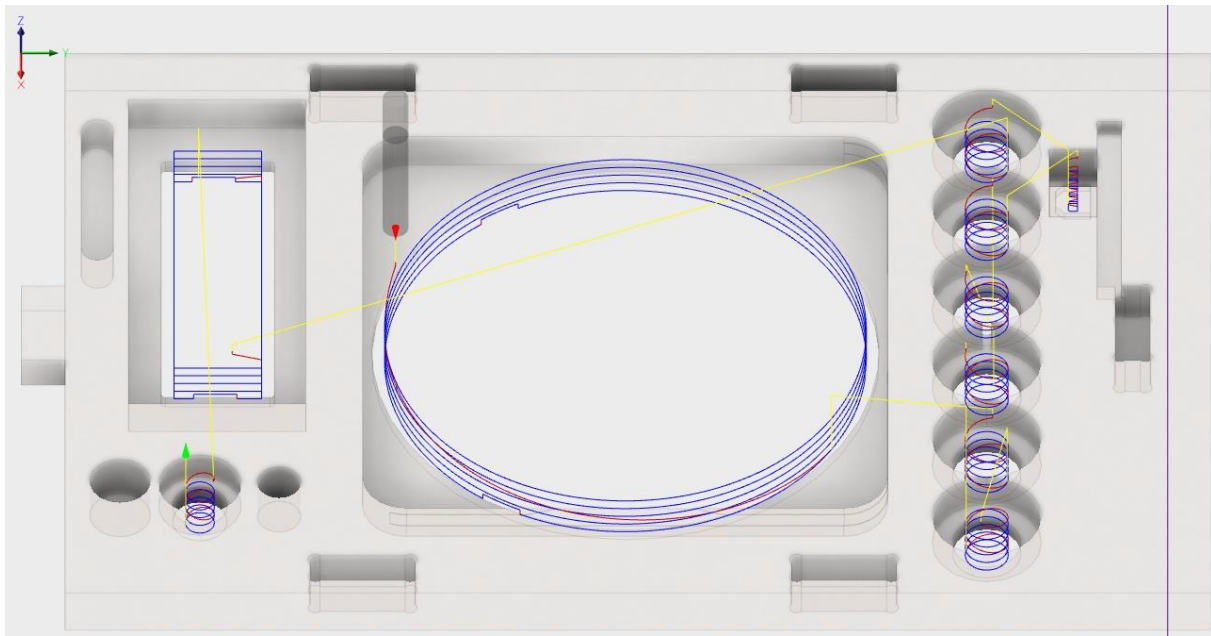
Kõik arvjuhtimisega freespingil toodetud asjad saavad alguse ideest ja disainist. Disainid jagunevad peamiselt kahe- ja kolmedimensionaalseteks vektorgraafikaga joonisteks. Neid mudeleid saab kas alla laadida interneti keskkonnast nagu näiteks <https://grabcad.com> või luua ise täiesti uus 3D-mudel kasutades selleks vastavaid tarkvarasid. Populaarsed jooniste tegemise vabavara programmid vektorgraafikas on *Google SketchUp* 3D jooniste ja *InkScape* 2D jooniste jaoks. Keerukamad programmid on 3D jaoks *SolidWorks* ja õppe-eesmärgil vabalt kasutatav *Autodesk Fusion 360*. Joonisel 23 on kujutatud antud töös oleva freespingi kontrollrikasti esipaneel.



Joonis 23. Autodesk Fusion 360 3D mudeli näide

Valmis 3D mudelist tänapäeval üksnes ei piisa, et arvjuhtimisega lõikepink sellest valmis toote välja freesiks. Mudeli põhjal on vaja luua tööriistale töötlemisrada, mis arvestab täpselt tööriista mõõtmeid ning lõikamiskiirust. Tarkvarasid, mis taolisi nõudeid täidaks nimetatakse CAM (*Computer Aided Manufacturing* - arvutipõhine valmistamine) tarkvaradeks. Olemas on mitmeid professionaalseid programme nagu näiteks *EdgeCam*, *Aspire*, *MeshCam*, *BamCam* ja *HSMWorks Fusion 360*. Antud töös olen kasutanud *HSMWorks Autodesk Fusion 360*, kuna see on õppe-eesmärgil vaba litsentsiga ning see genereerib korralikku G-koodi keerukatest

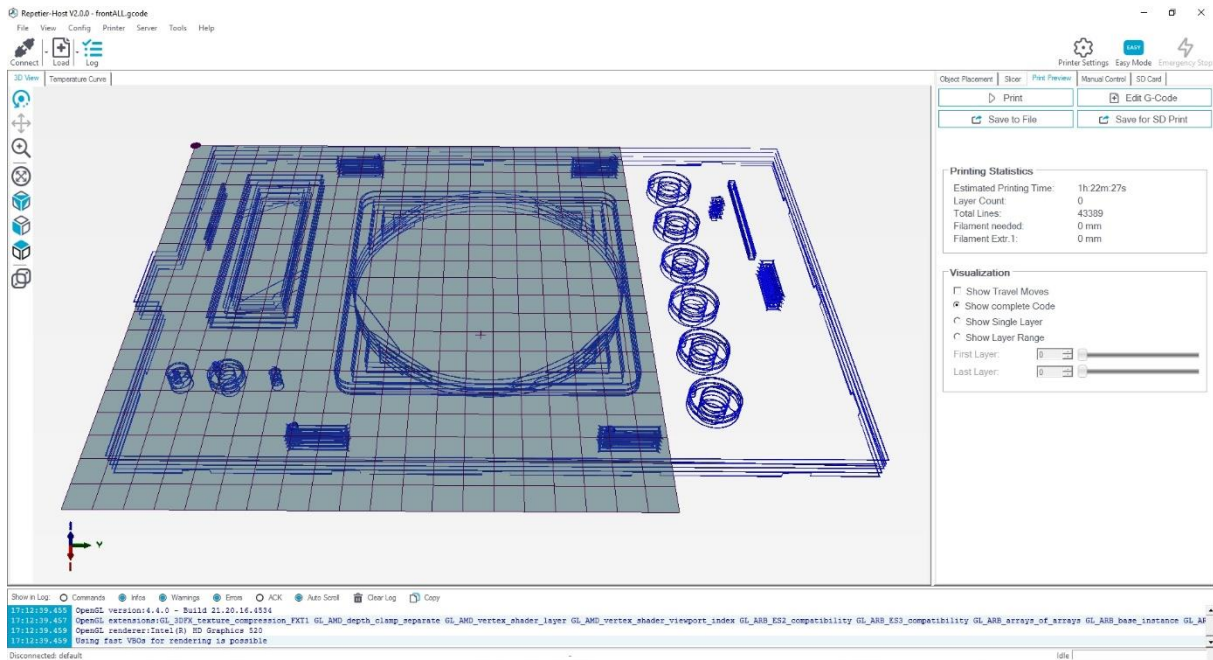
lõigetest. Vabavaraaliselt on võimalik lisada *Google SketchUp* programmile lisaliides *SketchUcam*. Küsitluste põhjal on kasutajasõbralikuimaks valitud just *Fusion 360*. Joonisel 24 on näidatud lõiketööriista töotlusrada lõikamiseks välja kontrollerkasti suuremad avad. Joonisel on näha ka, et suurematele detailidele saab jätta väiksed kinnituskohad, et ärälõigatav osa freesimise ajal lõiketera ette ei viskuks.



Joonis 24. Kontrollerkasti aukude lõikamise töotlusraja näide

Pärast töotlusradade määramist kasutatakse post-protsessorit loomaks arvjuhtimispingi kontrolleriis olevale tarkvarale loetav G-kood. *Fusion 360* programmi puhul kasutasin post-protsessorit, mis sobiks ristkoordinaadistikus töötavale 3D printerile, kuna antud töös kasutataval kontrolleriil on peal 3D printeri püsivara. Selleks on valmis kirjutatud vastav MPCNC-Fusion360-V6-Marlin-V1 post-protsessor. Tulemuseks on fail, mille laiend on .gcode.

Järgmiseks programmiks, millega detaili lõikamise töotluskoodi sobitada antud töös olevale masinale, on *Repetier Host V2.0.0*, mis on vabalt allalaetav leheküljelt www.repetier.com. Samal lehel on võimalik seadistada püsivara oma masina parameetrite järgi ning see hiljem alla laadida otse *Arduino Mega 2560* mikroprotsessorile koos RAMPS 1.4 laiendusplaadiga. Joonisel 25 on ekraanitõmmis programmist *Repetier Host v2.0* ning selles on avatud *Fusion 360* post-protsessoriga loodud G-kood ning sinisega on näha töotlusrada lõikepeale.

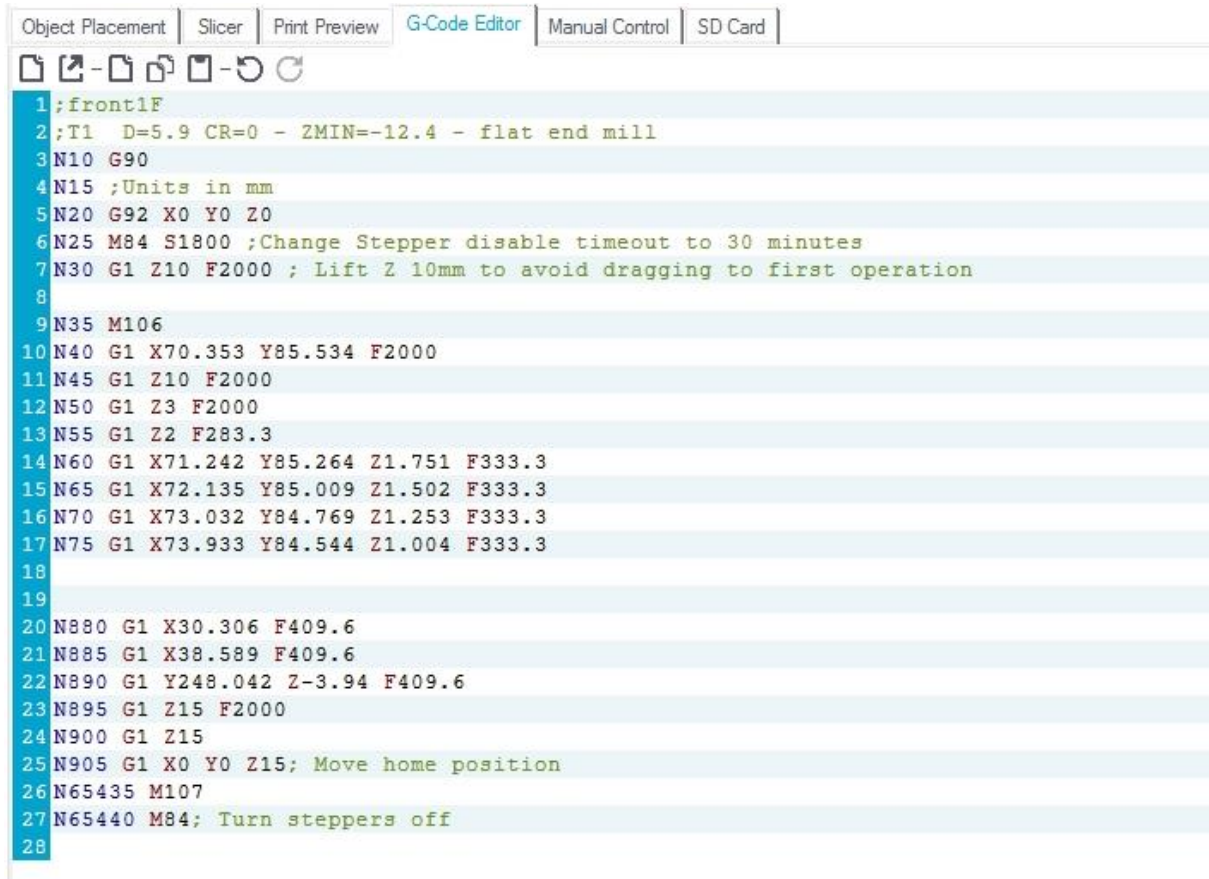


Joonis 25. Repetier Host v2.0 ekraanitõmmis

G-koodi freespinki saamiseks on olemas kaks võimalust. Esimene võimalus on kasutada USB kaablit püsivalt pingi ja tarkvara vahel ning teine on salvestamisvõimalus SD-mälukaardile. Foorumites on pikemaid töid soovitatud teha SD-kaardi kaudu, kuna USB ühendus võib katkeda või saada häiritud ning pärast seda jookseb kontrolleri mälu puhver tühjaks ning lõikamis- või printimistöö jääb poolikuks. Antud püsivara ei suuda uuesti ühendust luua ilma kontrolleri taaskäivitust tegemata. Seega osutub peamiselt valikuks joonisel 25 „Save for SD Print“, seejärel moodustub fail laiendiga .gco, mis on sobilik mälukaardilt töö alustamiseks.

Joonisel 26 on näidatud G-koodi näidis, millest on kustutatud ruumi säästmiseks koodi keskmine osa ehk näha on algus ja lõpp. N koodirea ees näitab reanumbrit. Lühend G90 määrab ära absoluutse positsiooni, mille järgi kõik muud koordinaadid on. G92 määrab detaili koordinaadistiku nullpunkti asukoha võrreldes lõikepeaga. Antud juhul on ette nähtud, et enne lõikamise algust tuleb lõikepea liigutada mudeli koordinaadistiku x,y,z algpunkti koordinaatidega 0,0,0. järgmine käsk M84 S1800 määrab taimeriga samm-mootorite välja lülitamiseks kui töö lõppemisest on möödunud 30 minutit ehk 1800 sekundit. Käsk G1 on lineaarne interpolarisatsioon ehk lineaarne liikumine millele järgneb liigutatav telg koos kaugusega, antud juhul Z10 ehk Z telg liigub 10 mm töötasapinnast kõrgemale kiirusega 2000 millimeetrit minutis ehk F2000. Seejärel on koodi päis läbitud ning algab töötuskäskude täitmine. M106 paneb tööle ventilaatori, aga kuna 3D printeri sellist funktsiooni pole freeslõikamise puhul vaja siis kasutan seda väljundit läbi tahkis rele (SSR – *Solid State Relay*)

freesi tööle panekuks. Read numbritega N40 kuni N895 on löikepea töötlusrajad. Koodi lõpetuseks liigutatakse löikepea algpunkti ning jäetakse 15 millimeetri kõrgusele töötasapinnast. Pärast seda lülitab käsk M107 välja ventilaatori ehk antud juhul freesimootori. Lõpetuseks lülitatakse välja samm-mootorite hoidevool käsuga M84. [17]

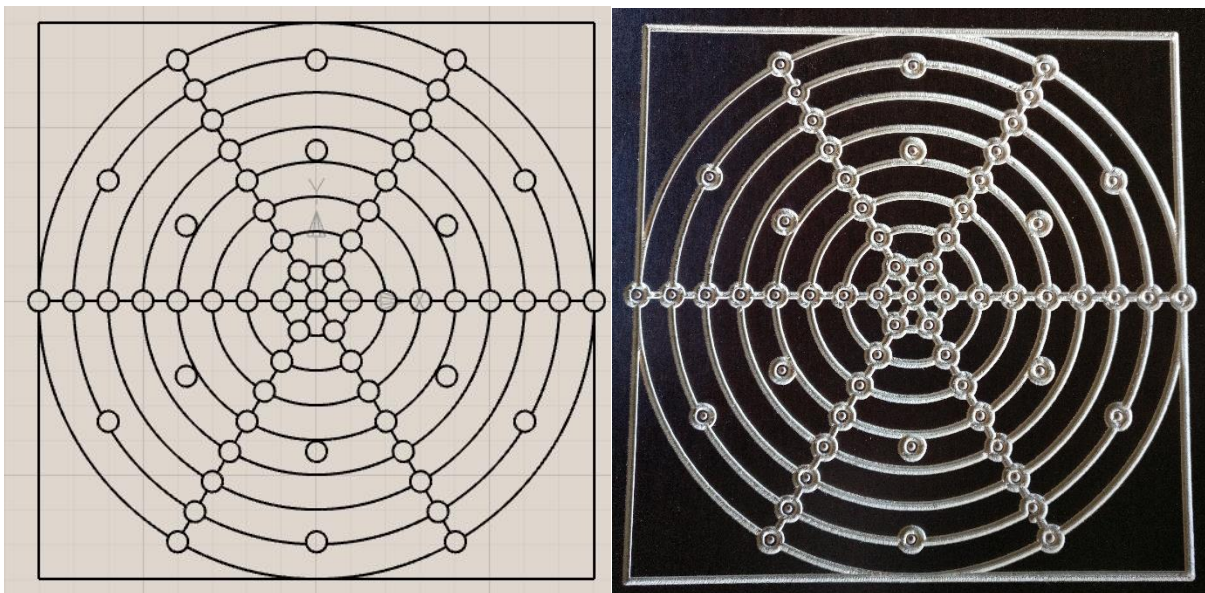


```
1;front1F
2;T1 D=5.9 CR=0 - ZMIN=-12.4 - flat end mill
3N10 G90
4N15 ;Units in mm
5N20 G92 X0 Y0 Z0
6N25 M84 S1800 ;Change Stepper disable timeout to 30 minutes
7N30 G1 Z10 F2000 ; Lift Z 10mm to avoid dragging to first operation
8
9N35 M106
10N40 G1 X70.353 Y85.534 F2000
11N45 G1 Z10 F2000
12N50 G1 Z3 F2000
13N55 G1 Z2 F283.3
14N60 G1 X71.242 Y85.264 Z1.751 F333.3
15N65 G1 X72.135 Y85.009 Z1.502 F333.3
16N70 G1 X73.032 Y84.769 Z1.253 F333.3
17N75 G1 X73.933 Y84.544 Z1.004 F333.3
18
19
20N880 G1 X30.306 F409.6
21N885 G1 X38.589 F409.6
22N890 G1 Y248.042 Z-3.94 F409.6
23N895 G1 Z15 F2000
24N900 G1 Z15
25N905 G1 X0 Y0 Z15; Move home position
26N65435 M107
27N65440 M84; Turn steppers off
28
```

Joonis 26. G-koodi näide

8. TESTIMINE JA TULEMUSTE ANALÜÜS

Testimine on vajalik, et veenduda freespingiga lõigatud tulemuse vastavust tarkvaraliselt loodud joonistele. Selleks lõin *Autodesk Fusion 360* keskkonnas lihtsa, kuid matemaatiliselt korrektse joonise, kus on olemas punktid, ringid ja ka nelinurk. Teekonnad on ette valmistatud nii, et mingit lõiget ei tehtaks järjest vaid tuleb pidevalt liikuda üle jooniste, et kontrollida korratavaust. DXF formaadis joonis on joonisel 27 vasakul pool ning vineerile graveeritud tulemus paremal.



Joonis 27. Testimise joonis vasakul ja lõigatud tulemus paremal

Nihikuga kontrollides saab väita, et tulemus on päris rahuldav. Ruudu diagonaalid on täpselt võrdsed ning küljepikkused ei erine ka teineteisest. Ringide raadiuse samm on 10 mm ja see on täpselt mõõdetav valmis detaili pealt. Punktid on freesitud eri aegadel ja kohtades, kuid kõik joonel olema peavad punktid asuvad täpselt seal, kus planeeritud. Ainult z-telje sügavusega on näha veidi muutusi. See tuleneb pigem sellest, et varasemalt tehtud töötasapinna kalibreerimine vajab uuendamist ning mälus on vanad andmed, mis muudavad z-telje kõrgust eri punktides. See on lihtsalt lahendatav uuesti kalibreerimisega.

Täpsuse parandamist saab tõsta ka paremate tööriistade kasutamisega. Hetkel on freesiteraks odav Hiina toode. Tera hind jääb kuskile 1-3 euro kanti, kuid kvaliteetsed terad maksavad samas 20-40 eurot ja ülespoole. Esialgseteks katseteks ja hobikorras freesimiseks sobivad odavad lõiketerad küll, sest ikka võib juhtuda valesti moodustatud töötlusraja tõttu või veast koodis, et

tera murduks vastu detaili äärt. Praeguse lõiketeraga oli võimalik lõigata välja kontrolleriakastile mitu seinat, ning siis tuli juba tera vahetada nüristumise tõttu.

Puidu puhul on tähtis ka kiudude asetus lõikamissuuna suhtes. Vineeri puhul on tähtis ainult esimene kiht, sest teised kihid on omavahel risti. Oluline on see seepärast, et kui hakata lõikama puidust detaili äärt ning freesi tera lõikab detaili suhtes väljapoole, siis võib tera välja rebida puidu kiudu ning rikkuda kogu töö. Terava tera puhul ei ole see nii määrav, aga on hea meeles pidada ning edaspidi töötlusradasid luues arvestada.

Kiirus on samuti oluline faktor freesimise puhul. Iga lõiketera tera (lõiketera võib koosneda mitmest teravikust) peab saama õige koguse laastu ära lõigata ning terale peab jääma ruumi see laast lõikealalt välja visata. Liiga kiire pöörlemise korral hakkab tera mitte lõikama vaid siluma ning see tekitab lisakuumust, mis viib puidu kärssamiseni. Liiga aeglaselt lõigates, aga hakkab tera puidult kiude kiskuma ning tulemuseks on karvane puidulõike äär või hoopiski tera purunemine.

Testimisel selgus, et hea on paigutada töödeldava detaili üks sirge serv paralleelselt x- või y-telje suhtes. Eriti vajalik on see siis, kui on vaja freesida detaili mõlemat poolt. Referentsiks freesisin läbi detaili ehk antud juhul läbi 12 mm paksuse veekindla vineeri ühe augu, mis jääb koordinaatide alguspunktiks mõlemale poole. Seda on näha joonisel 28 üleval vasakus nurgas ja joonisel 29 all vasakul nurgas.



Joonis 28. Esipaneel seestpoolt vaadatuna

Joonisel 28 on näha kontrollrikasti esipaneeli lõpetatud freesimist seest poolt. Seda plaati on lõigatud mitmes jaos. Kõigepealt on välja freesitud suuremate taskute läbivad avad ehk ventilaatori, ekraani ja läbiviikude kohad. Seejärel on freesitud välja nende avade ääred ning tappide augud. Järgmisena on kontuurina freesitud detaili perimeeter ning alles jäetud detaili kinnitamiseks mõeldud väiksed saarekesed, mida hiljem saab lihtsalt noaga läbi lõigata. Väiksemate taskute freesimine toimus palju väiksema teraga s.o. vahetada tuli tera. Sama tera läks kasutusse ka tapiaukude nurkade vormimiseks, sest 6 mm läbimõõduga tera ei suuda luua ristkülikule nurka.

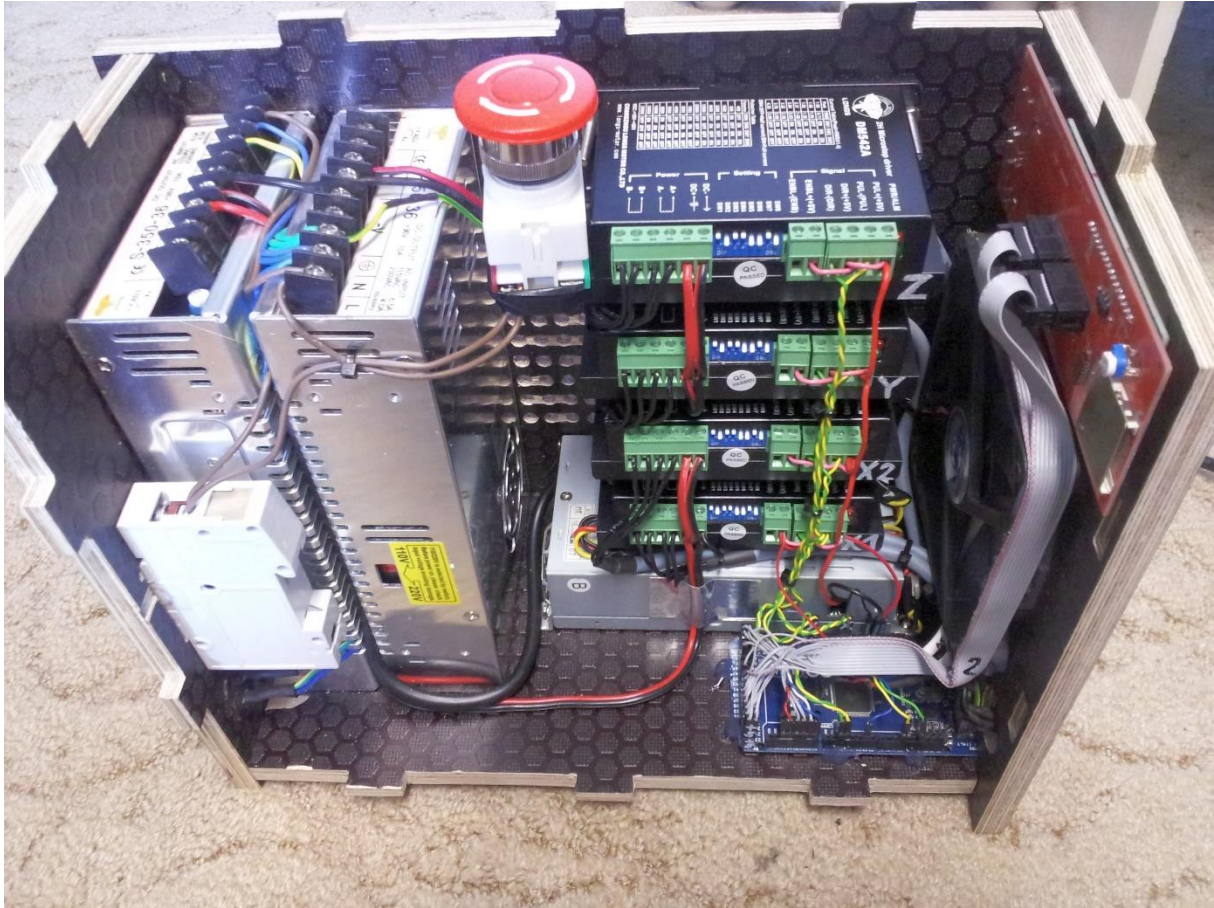


Joonis 29. Esipaneel väljast poolt vaadatuna

Joonisel 29 on kujutatud kontrolleriaksti esipaneeli eestpoolt vaadatuna. Sellel on näha graveeritud läbiviikude nimed ning osaliselt maha freesitud tapp. Vältimaks töötasapinna vigastamist läbiva löike korral, on töölauale paigutatud puidust lisapaneel, millele võivad löikamisjäljed jääda ning mis on kergesti vahetatav. Selle paneeli külge on jäigalt kruvidega kinnitatud töödeldav detail.

Testimise käigus olen välja freesinud kontrolleriaksti kõik paneelid. Kasti seinad on mõeldud omavahel kokku käima tappidega, mida ei ole näha. Mõne detaili olen pidanud uuesti tegema, kuid seda eelkõige seetõttu, et juhtsiinil liugurite kalibreerimise kruvid olid lahti tulnud ning freespinkis tekkis loks. Selle tõttu tulid ringid välja ovaalsetena ning x-telje suunas löiked polnud õigete mõõtudega. Parandasin selle vea koos keerme liimiga ning edaspidi on freespink korralikult töötanud.

Joonisel 30 on kujutatud kontrolleriaksti ilma pealmise ja vasaku kaaneta. Kasti on kolm toiteploki, neli draiverit, kaitselüliti, ventilaator, ohutusüliti, ekraan ja mikrokontroller. Tahkis rele ja pistikupesad freesi jaoks asuvad vasaku paneeli küljes. Ventilaator kõige ees suunab õhuvoolu läbi samm-mootorite draiverite ning see saab välja kas läbi toiteplokkide tagaosas või läbi õhutusavade kasti paremas küljes.



Joonis 30. Kontrollerikasti installatsiooni vaade

Freespingi kasutamisel on näha, et samm-mootorite toiteplokkide ventilaatorid ei hakkagi tööle. See tuleneb sellest, et toiteplokkid on piisava võimsusvaruga ning kogu võimsust ei kasutata ära. See aga näitab, et normaalse töötamise juures ressursi jagub.

Töö eesmärk oli saavutada maksimaalne ebatäpsus 0,1 millimeetrit, mis ka saavutati. Teoreetiline ebatäpsus 47 mikromeetrit ei ole enam praktiline, kuna raamid ikkagi painduvad veidi läbi. Lisaks võib väike lõtk jääda ka rihmülekande pärast.

9. FREESPINGI HIND

Antud töös oli plaan jääda freespingi maksumusega alla tuhande euro. Tabelis 9 on näidatud põhiliste komponentide nimekiri ning hind, mis on juba arvutatud koos maksude ning kogusega.

Tabel 9 Detailide maksumuse tabel

| Nimetus | Hind |
|--|--------|
| NEMA 23 samm-mootorid 4 tk, DM542A samm-mootorite draiverid 4 tk ja 36 V 350 W toiteplokid, 2 tk | 308 € |
| Juhtsiinid kolme telje jaoks 6 tk ja liugurid, 12 tk | 250 € |
| Z-telje kuulkrugi komplekt koos kinnitustega ja kuulmutter | 60 € |
| 50x20x2mm nelikanntoru, 12 m | 25 € |
| Hammerite metallivärv, 250 ml | 7 € |
| Kontrollkaablid | 23 € |
| Mikrolülitid, 6 tk | 5 € |
| Hammasrihm HTD 5M, 10 m | 40 € |
| Hammasrattad, 9 tk | 38 € |
| Terasnurgad, 9 tk | 15 € |
| 5mm paksused kuullaagrid läbimõõduga 12 mm, 18 tk | 12 € |
| Plastist kaablikett, 3 m | 11 € |
| Töötasapind veekindlast vineerist, 1100x800x25 mm | 9 € |
| Poldid, kruvid ja mutrid | 30 € |
| Kontrollerikasti nupud, läbiviigud ja vineer | 20 € |
| Mikrokontroller ja RAMPS 1.4 ekraan | 30 € |
| Alumiiniumplaadid kood vesilõikusega | 75 € |
| Ülafreesi alumiiniumist hoidja läbimõõduga 65 mm | 20 € |
| Muud kulutused | 25 € |
| KOKKU: | 1003 € |

Tabelit 8 uurides selgub, et kui tööaega mitte arvestada, siis hinnapiiri järgimine sai enam-vähem täidetud. Muude kulutuste all mõtlen neid väljaminekuid, mis võivad jääda märkamata, sest polnud piisavalt suured. Tabelist välja jäetud kulutused on arvestatud õppekuludesse ning

projekti käigus enese harimisse. Samuti ei ole ma hinna sisse arvestanud juba olemasolevat ülafreesi Makita RT0700CX2J, mis on 710 W ning harjadega. Parem variant oleks harjadeta, võimsam ja kiiruse muutmisvõimalusega vesijahutusega frees, kuid see tähendab lisa väljaminekuid ning esialgu piisab ka juba varem soetatud tööriistast.

10. KOKKUVÖTE

Töö eesmärgiks oli ehitada freespink ja lisada sellele arvjuhtimine. Ehitus sai alguse projekteerimisest *SolidWorks* keskkonnas, luues põhimõtteline 3D mudel, millel puudu ainult pisemad detailid. Pingi suuruse määras kõige rohkem hind, sest juhtsiinid ning täpsus on freespinkide puhul kõige tähtsam. Kogu projekti eelarve oli umbes tuhat eurot, mis hiljem selgus, et ka sinna kanti jäi. Taoline projekt ei olnud autorile esimene arvjuhtimisega pingi ehitamine, kuid see on esimene lõplikult valminud. Varasem versioon oli puidust ning täpsus ja tugevus polnud piisavad. Vajadusest korralikuma hobifreespingi järele ajendas seda mõtet lõputööna kasutama.

Uurides mitmeid turul olevaid sarnaste mõõtudega arvjuhtimisega pinke, jõudsin järeldusele, et kui pea võtab, tuleb see endale ise ehitada. Nii on igati soodsam ja saab teha nii nagu endale sobib. Parima hinnaga detaile sain enamuse tellides Hiina interneti kaubamajadest. Hindadele Hiinast lisandub muidugi veel postikulu, tollimaks, mis polnud väga suur (0-2,5%) ja käibemaks, kuid siiski on see odavam, kui Euroopast ostes. Kokku sai komponente tellitud, nii Hiinast, Saksamaalt, Ühendkuningriikidest ja Eestist. Kõike asju poleks Eestist osta saanudki ja kui oleks, siis kohalik neljakordne hind paneb siiski tooted soetama välismaalt. Antud töös olev freespink läks maksma veidi üle tuhande euro, kuid jäi suhteliselt täpselt eelarvesse. Lähim konkurent võrreldavaist toodetest on Hiina OMIOCNC, mis on siiski üle 2,7 korra kallim, kui ise tehtuna. OMIOCNC on küll täpsem (viga 0,05 mm), kuid tehes oma raamides väikseid muudatusi kaovad ära ka väikesed painded ning saavutan oma pingil samaväärse täpsuse.

Freespingi alusraami ehitusel kasutasin nelikanttoru kuna see andis x-teljele paraja laiuse paigutamaks x-telje juhtsiini. Hiljem järgi mõeldes oleks võinud kasutada veidi paksemat terasprofiili kui kaks millimeetrit. Hea oleks olnud 4 mm paksune profiil, mida oleks parem keevitada olnud ja ka tulemus oleks tugevam ning jäigem jäänud. Keevitust olen õppinud ainult põgusal kursusel TTÜ-s ning video keskkonnas *YouTube*, kuid sellest piisas oma töö lõpule viimisel. Haljas terasraam on väljastpoolt üle värvunud roostet tõrjuva värviga Hammerite, sisemine osa jääb korrosioonitõrjeta. Alusraami jäikust aitab parandada 32 millimeetri paksune veekindlast vineerist töölaud, mis on väikese sammuga kruvitud igast küljest raamile.

Alumiiniumist osad on eelnevalt projekteeritud arvuti programmis *SolidWorks* ja vesilõikusega parajaks lõigatud osatühingus Ossmet. Olen rahul, et eelneva pingi puidust osad said vahetatud kõik alumiiniumiosade vastu. Veidi keerulisem on seda töödelda, kuid tulemus jääb tugevam, ilusam ja jäigem kui puit konstruktsiooni korral. Jäikuse murekoht on pigem liugelaagritel, mille laagri C-kujulise kesta kere külge reguleerimise kruvi on ainult 5 sentimeetri pikkuse kesta kohta ühes kohas keskel. Seda saaks parandada lisades mõlemale poole reguleerimiskruvi veel kaks keermeetatud auku ja sisekuuskant kruvi jagamaks koormust ja tihendades ühtlaselt laagrit ümber juhtsiini.

Puitu lõikab freespink nii nagu peab. Parandada saab ainult etteande kiirust ja tera pöörlemiskiirust. Lisaks teeb kvaliteedi oluliselt paremaks professionaalsete terade kasutamine. Pehmemaid metalle pole ma veel proovinud lõigata, kuna hetkel käib veel ehitus tolmuärastussüsteemi loomisel. Metallide freesimisel peab kindlasti arvestama suurema ajakuluga, kuna etteande kiirused on väikesed ning korraga lõigatakse õhemat kihti.

Samm-mootorid on sellel freespingil võimsad, isegi nii palju, et ei pea kasutama maksimaalset voolu. Draiverid on 80 W võimsusega ja annavad välja 4,2 A, kuid antud hetkel on see piiratud 3 A peale, sest sellest testimise järel piisas.

Juhtimissüsteemi puhul on mul hea meel, et sain eemaldada süsteemist üleliigse RAMPS 1.4 plaadi, mis otse Atmega2560 arendusplaadile peale käib. See oli mõeldud 3D printerile ning väiksemate samm-mootorite draiveritega maksimum 1 A vooluga. RAMPS 1.4 ekraani ja mälukaardi lugeja kaablid tuli otse mikroprotsessori jalgadele ühendada.

Enne lõikamise algust tuleb 3D tarkvaraga valmis saadud mudel teha arusaadavaks *Repetier* programmile mikrokontrolleris. Selleks loon Fusion 360 programmiga töötlusrajad ning need tõlgitakse *Repetier-Host* programmiga arusaadavaks ning salvestan mälukaardile. Mälukaardiga töötamine on töökindlam, kui USB kaudu ühenduses olemine. Kunagi programmide arenedes võib see probleem kaduda, kuid praegu jääb SD-kaardi variant.

Tulemuste analüüsis on näha, et töötasapind ei ole veel päris täpne ja tasane. Selle parandamiseks on kõige täpsem viis lisada töötasapinnale lisaplaat ja see pindfreesida masina enda freesiteraga ühel kõrgusel. Praegu pole aga sellist tera kuskilt laenata ning see on kallis, et selleks seda osta. Teina lahendus on kasutada sondi, et ära mõõta töötasapinna tasand ning selle järgi kogu z-telg sättida, see pole aga nii täpne ja eeldab kõrge siledusastmega töötasapinna olemasolu. Ka sirge paks vineerplaat võib kuskil keskel olla veidi tasapinnast kas alla või

ülespoole punnis. Muidu lõikab frees täpselt ja ei esine mingeid kõrvalekaldeid. Jäikust saab parandada raami konstruktsioonide ümbertegemisega või z-telje lühendamisega.

Üldiselt võib tööga rahule jääda ning annan kümne palli süsteemis projektile kõva kaheksa.

Lõplik freespink koos kontrolleriastiga on lisas 1 joonistel L2 ja L3.

KASUTATUD KIRJANDUS

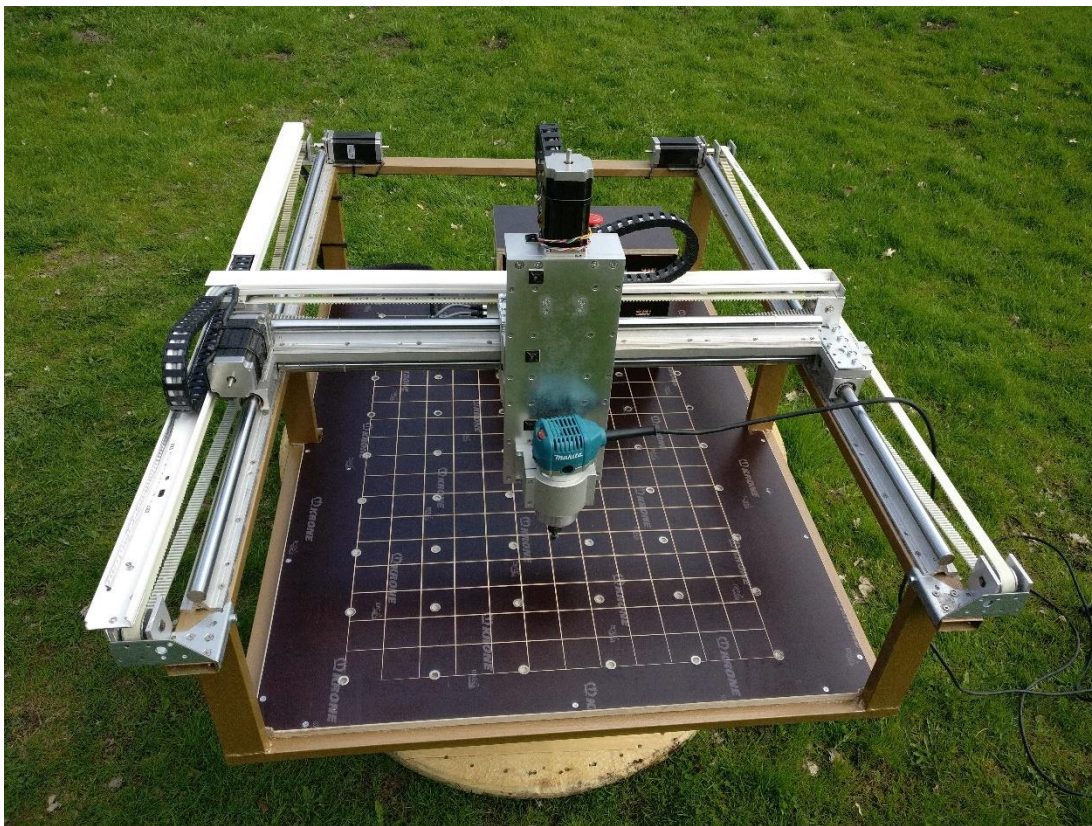
- [1] Changzhou Longs Motor Co., Ltd kodulehekülg
http://www.longs-motor.com/productinfo/detail_12_80_131.aspx Vaadatud 29.03.2016.a.
- [2] Samm-mootori draiveri andmeleht
<http://www.omc-stepperonline.com/download/pdf/DMSeries.pdf> Vaadatud 24.02.2016.a.
- [3] Wikipedia lehekülg
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_numerical_control Vaadatud 24.02.2017.a.
- [4] Alibaba kaubamaja lehekülg
https://www.alibaba.com/product-detail/RC0609A-Small-CNC-Cutting-Machine-CNC_60090793022.html?s=p Vaadatud 21.03.2017.a.
- [5] Cnc-Step kodulehekülg
<https://www.cnc-step.de/en/high-z-s-1000-cnc-router-1000-x-600-x-110-mm-trapezium-screws/> Vaadatud 21.03.2017.a.
- [6] Inventables, Inc. kodulehekülg
<https://www.inventables.com/technologies/x-carve/customize#1000mm> Vaadatud 21.03.2017.a.
- [7] Rhonmac-cnc kodulehekülg
[http://www.rhonmac-cnc.co.uk/pro_cnc_routers.htm#RM-6090/60150 CNC Routing Machine](http://www.rhonmac-cnc.co.uk/pro_cnc_routers.htm#RM-6090/60150_CNC_Routing_Machine) Vaadatud 21.03.2017.a.
- [8] OMIOCNC kodulehekülg
<https://www.omiocnc.com/makerzonelist/cnc-router-for-makerzone/x8-1500m-cnc-desktop-engraver.html> Vaadatud 21.03.2017.a.
- [9] Eesti Maksu- ja Tolliameti kodulehekülg
<https://apps.emta.ee/emts/index.jsp> Vaadatud 22.03.2017.a.
- [10] DHL Eesti kodulehekülg
<http://www.dhl.ee/et.html> Vaadatud 22.03.2017.a.
- [11] Fx Currency Exchange kodulehekülg
<http://www.fx-exchange.com/> Vaadatud 22.03.2017.a.
- [12] Foto asukoht veebis
<http://g03.a.alicdn.com/kf/HTB1CALBHpXXXXcXaXXXq6xXFXXXo/wood-router-cnc-engraving-font-b-machine-b-font-3040-cnc-DIY-CNC-frame-15mm-thick.jpg>
Vaadatud 22.03.2017.a.
- [13] Ebay.com lehekülg
<http://www.ebay.com/itm/NEMA23-425-oz-in-Dual-shaft-stepper-stepping-motor-3-0A-/300607193493> Vaadatud 29.03.2017.a.
- [14] Adafruit lehekülg
<https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors/types-of-steppers> Vaadatud 29.03.2017.a.
- [15] Arduino Mega 2560 lehekülg
<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560> Vaadatud 29.03.2017.a.

- [16] TTÜ õppematerjali asukoht
http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/IN660/CAD_CAM%20ja%20CN-C-tehnoloogia%20-%20slaidid.pdf Vaadatud 9.05.2017.a.
- [17] RepRap G-koodi lehekülg
<http://reprap.org/wiki/G-code> Vaadatud 9.05.2017.a.
- [18] Aliexpress.com kodulehekülg
www.aliexpress.com Vaadatud 10.05.2017.a.
- [19] DigiKey kodulehekülg
www.digikey.com Vaadatud 10.05.2017.a.
- [20] „Microstepping Myths and Realities“ by Micromo
http://www.micromo.com/media/wysiwyg/Technical-library/Stepper/6_Microstepping-%20WP.pdf Vaadatud 16.05.2017.a.

LISA 1



Joonis L1. MIG keevitusega alusraami kokkupanek



Joonis L2. Tööpingi üldvaade eest



Joonis L3. Tööpingi üldvaade vasakult