

MANUAALFREESPINGI ÜMBEREHITUS ARVPROGRAMMJUHITAVAKS FREESPINGIKS

RECONSTRUCTION AND CONVERSION OF A MANUAL MILLING MACHINE TO COMPUTER NUMERICAL CONTROL

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Hardi Tambets

Üliõpilaskood: 185370EAAB

Juhendaja: Madis Lehtla, vanemlektor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Hardi Tambets

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Manuaalfreespingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freespingiks”,

mille juhendaja on Madis Lehtla, vanemlektor,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

17.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loominguulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Hardi Tambets	<i>Lõputöö liik:</i> Bakalaureusetöö
<i>Töö pealkiri:</i> Manuaalfreespingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freespingiks	
<i>Kuupäev:</i> 17.05.2021	55 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Vanemlektor Madis Lehtla	
<i>Sisu kirjeldus:</i> Käesolevas töös vaadeldakse populaarseid arvjuhtimiskontrollereid ja hinnatakse nende sobivust käesoleva freespingi ümberehitusprojektiga. Ümberehituse jooksul leitakse kõne all olevale freespingile sobivate liikumiskiiruste saavutamiseks vajalike ajamite omadused ja valitakse välja konkreetsed ajamid, trapetskeermega käigukruvid asendatakse kuulkruvidega ja disainitakse ning valmistatakse muud ümberehituseks vajalikud komponendid. Freespingi juhtsüsteemi, toiteahelate ja muu elektroonika kohta koostatakse montaažiskeemid ning realiseeritakse elektrikiip. Projekteeritud freespink monteeritakse ning selle funktsionaalsust katsetatakse katsedetaili valmistamise teel. Valminud detaili täpsust hinnatakse mõõtmise teel. Töö lõpus tuuakse välja võimalikud arvjuhitava freespingi edasiarendused ja ümberehitusprojekti vältel ilmnunud probleemid.	
<i>Märksõnad:</i> Arvjuhtimisingid, CNC, freespingid, ümberehitus	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Hardi Tambets	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Reconstruction and conversion of a manual milling machine to Computer numerical control	
<i>Date:</i> 17.05.2021	55 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Senior Lecturer Madis Lehtla	
<i>Abstract:</i> <p>The thesis looks at popular computer numeric controllers and evaluates them for use in a conversion of a manual milling machine to a computer controlled milling machine. During the conversion project, suitable drivers are found for driving the axis of the machine at given speeds, original trapezoidal lead screws are replaced with ball screws and other necessary components for the conversion are designed and manufactured. Electrical schematics are compiled for the milling machine's control, power and other electronic assemblies, and an electrical cabinet is assembled. The designed milling machine is assembled and tested by producing an inspection part. The part's dimensional accuracy and surface finish are inspected. In the end of the thesis possible further improvements and problems that arose during the project are discussed.</p>	
<i>Keywords:</i> Computer numerical control, CNC, milling machines, reconstruction, conversion	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Manuaalfreespingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freespingiks
Lõputöö teema inglise keeles:	Reconstruction and conversion of manual milling machine to computer numerical control
Üliõpilane:	Hardi Tambets, 185370EAAB
Eriala:	Elektroenergeetika ja mehhatroonika
Lõputöö liik:	Bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Madis Lehtla
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	01.11.2020 – 18.05.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tallinna Tehnikaülikooli Robotiklubis teostatavates projektides on sageli vajadus valmistada etteantud kuju ja omadustega detaile. Tänapäeval on detailide joonised ja andmed üldjuhul arvutiga koostatud, mistõttu ei piisa detailide valmistamiseks manuaalsest freespingist. Ligipääs ülikoolis olemasolevatele arvjuhtimisega tööpinkidele on sageli üliõpilastele piiratud ning uue tööpingi soetamine pole Robotiklubile jõukohane. Seega on olemasoleva tööpingi ümberehitus atraktiivne võimalus.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida saadaval olevaid arvjuhtimiskontrollereid ja juhtsüsteeme ning muuta manuaalfreespink Optimum BF20L arvprogrammjuhitavaks, säilitades samal ajal ka käsijuhtimise võimalus.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Analüüsida seni tehtud manuaaltööpinkide rekonstrueerimislahendusi ja arvjuhtimiskontrollereid kasutades Interneti otsingumootoreid
- 2) Millised on ümberehituseks vajalikud elektroonika ja mehhaanika komponendid ning kuidas neid edukalt rakendada?
- 3) Hinnata on ümberehitatud tööpingi võimekust ja täpsust

4. Lähteandmed

Töös kavatakse tugineda autori freesimistöde alastele kogemustele ja arvjuhitavate tööpinkide kohta kogutud teadmistele. Vajadusel konsulteeritakse õppejõududega ning Robotiklubi liikmetega.

5. Uurimismeetodid

Juht- ja jõuelektroonika valikul langetatakse otsus toetudes tootjate kataloogiandmetele ja eelnevalt teostatud sarnastetele projektidele. Töö käigus rakendatakse ümberehituseks vajalike detailide 3D modelleerimist. Vajalike mehhaanika-komponentide parameetrite määramiseks kasutatakse matemaatilist lähenemist. Valminud CNC freespingi täpsust hinnatakse mõõtmiste teel.

6. Graafiline osa

- 1) Juhtelektroonika elektriskeemid
- 2) Disainitud detailide joonised ja telgede koostajoonised

7. Töö struktuur

SISSEJUHATUS

1. Ülevaade käsijuhtimisega freespinkide moderniseerimise võimalustest ja kasutatavatest juhtsüsteemidest
2. Süsteemi mehaanikaosa disain
 - 2.1. Telgede ajamid
 - 2.2. Telgede kruvid ning muud detailid
3. Juht- ja elektrisüsteem
 - 3.1. Arvjuhtimis kontrollid
 - 3.2. Ajamid ja seotud ahelad
 - 3.3. Toiteahelad
4. Ümberehituse teostamine
 - 4.1. Elektroonikakilbi montaaž
 - 4.2. Telgede koostamine
 - 4.3. Tööpingi häälestamine ja kasutus

KOKKUVÕTE

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kirjandusallikatena kasutatakse:

- 1) Kirjandusallikaid varem läbiviidud rekonstrueerimisprojektide kohta
- 2) Kasutatud elektroonika ja mehhaanikadetailide tootjate dokumentatsiooni
- 3) Käesoleva freespingi eksploatatsioonijuhendit
- 4) Erinevaid tootekatalooge

9. Töö etapid ja ajakava

1) Taustainfo kogumine	01.11.20
2) Mootorivaliku arvutused, mootorite ja ajamite valik	01.12.20
3) Juhtahelate elektroonika detailide, teljekruvide ja ostutoodete valik	01.01.21
4) 3D mudeli koostamine	18.01.21
5) Vajalike lisadetailide tootmine ja ostutoodete modifitseerimine*	01.03.21
6) Elektroonika testimine*	15.03.21
7) Tehnilise lahenduse osade funktsionaalne katsetamine*	12.04.21
8) Töö kirjaliku osa koostamine	19.04.21
9) Freespingi häälestamine, testimine ja valmimine	01.05.21
10) Lõputöö esitamise tähtaeg	18.05.21

* Punktide ajakava ja sisu võib muutuda seoses komponentide valiku, tarnete ja rahastamisega seotud põhjustel.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	10
Lühendite ja tähiste loetelu	11
SISSEJUHATUS	12
1. FREESPINKIDE ÜMBEREHITUS JA KASUTATAVAD KONTROLLERID	14
1.1 Saadaval olevate juhtsüsteemide ülevaade ja võrdlus	15
1.1.1 Firma Centroid kontroller Acorn	15
1.1.2 Firma Newfangled Solutions tarkvarapaketid Mach3 ja Mach4 <i>Hobby</i>	16
1.1.3 Firma Masso CNC arvjuhtimissüsteemid	17
1.1.4 Tarkvarapakett Linux CNC	18
1.1.5 Juhtsüsteemide võrdlus	20
2. SÜSTEEMI MEHAANIKAOSA DISAIN JA PROJEKTEERIMINE	22
2.1 Tööpingi mehaanikaosa 3D modelleerimine	23
2.2 Telgede ajamite projekteerimine	24
2.2.1 Pöördemomentide arvutus	24
2.3 Käigukruvid ja muud detailid	26
2.3.1 Käigukruvid	26
2.3.2 Mootori ja kuulkrumutri kinnitused	28
3. JUHTSÜSTEEM JA AJAMITE ELEKTROONIKAOSA	30
3.1 Arvjuhtimiskontroller	30
3.2 Ajamid ja nende juht- ja kontrollahelad	32
3.3 Toite- ja lisaahelate projekteerimine	33
3.3.1 Toiteahelad	33
3.3.2 Lisaahelad	34
4. ÜMBEREHITUSE TEOSTUS	35
4.1 Elektroonikakilbi montaaž	35
4.2 Freespingi montaaž	36
4.3 Freesi häälestamine ja kasutus	37
4.4 Võimalikud edasiarendused	41
KOKKUVÕTE	42
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	44
LISAD	47
Lisa 1. Käigukruvide tööjoonised	48
Lisa 2. Elektrikilbi montaažiskeemid	51

EESSÕNA

Käesoleva töö teema sõnastas töö autor, baseerudes oma huvile erinevate metallitöötlusmasinate vastu. Töö eesmärgiks on uurida ja kirjeldada manuaalfreespingi ümberehitust, eesmärgiga luua arvjuhitav freespink ja seeläbi anda Tallinna Tehnikaülikooli Robotiklubile ja selle liikmetele suurem vajalike detailide valmistamise võimekus.

Töö autor tänab TTÜ Robotiklubi juhatust, kes lubas oma freespingi kallal tegutseda ja Mehhaanika ja tööstustehnika instituuti, mille liikmed olid abiks vajalike treimis- ja freesimistöodega.

Lühendite ja tähiste loetelu

- CNC – arvjuhtimine (ingl k *computer numerical Control*)
- VMC - vertikaalne masintöötluskeskus (ingl k *vertical machining centre*)
- HMC - horisontaalne masintöötluskeskus (ingl k *horizontal machining centre*)
- EDM - elektroerosioontöötlus (ingl k *electrical discharge machining*)
- CAM - raalvalmistamine (ingl k *computer aided manufacturing/machining*)
- 2D, 2,5D ja 3D – kahe või kolme dimensiooniline. 2,5 dimensiooniline freesimistö
- PLC - programmeeritav loogikakontroller (ingl k *programmable logic controller*)
- PWM – pulsilaiusmodulatsioon (ingl k *pulse-width modulation*)
- MDI – manuaalne G koodi sisestamine arvjuhtimiskontrollerisse (ingl k *manual data input*)
- MPG – arvjuhtimispingi juhtpult (ingl k *manual pulse generator*)
- GPIO – üldotstarbeline sisend/väljund (ingl k *general purpose input/output*)
- OS – operatsioonisüsteem
- VGA – VGA pistikühendus analoog videosignaali edasikandmiseks (ingl k *video graphics array*)
- PSU – toiteplokk (ingl k *power supply unit*)
- PID - proportsionaal, integraal ja diferentsiaal (ingl k *proportional, integral and derivative*)
- DRO – digitaalne koordinaadi kuvar (ingl k *digital readout*)

SISSEJUHATUS

Freespingid olulised töövahendid metalli, puidu, plasti ja muude materjalide töötlemisel. Nende abil pole keeruline valmistada täpseid mõõtmeid ja kindlaid geomeetrilisi omadusi nõudvaid detaile. Kuigi manuaalfreespingid, pingid mille telgede liikumist juhib operaator vahetult, on tänapäeval endiselt olulisel kohal, ei ole nendega võimalik või otstarbekas valmistada modernseid raalprojekteeritud detaile. Nimetatud detailid koosnevad sageli kumerpindadest ja teistest mitteristtahuk või -silinder pindadest. Kirjeldatud detailide täpseks valmistamiseks on otstarbekam rakendada arvjuhitavaid tööpinke (CNC pinke), näiteks vertikaalseid või horisontaalseid töötlemiskeskuseid (VMC ja HMC), mitmeteljelisi trei- ja freespinke, elektroerosioontöötluspinke (EDM) ja muid kaasaegseid arvjuhtimisega tootmismasinaid.

Arvjuhitavate freespinkide kasutamist alustatakse arvuti abil projekteeritud kolmemõõtmelise mudelist. Mudelit töödeldakse seejärel vabalt valitud raalvalmistustarkvara (CAM tarkvara) abil. Selles määratakse ära toorik, lõiketööriistad, lõikerajad, lõikekiirused, ettenihked ning teised detaili valmistamiseks vajalikud parameetrid. Lõpptulemusena koostab CAM tarkvara G-koodist koosneva tekstifaili, mis sisaldab tööpingi juhtimiseks vajalikku informatsiooni pingi kontrolleri arusaadavas formaadis. Valminud fail võib olla masinaspetsiifiline või universaalne olenevalt CAM tarkvaras kasutatud postprotsessorist.

Tallinna Tehnikaülikooli Robotiklubis läbiviidavate projektide käigus on sageli vaja valmistada eelkirjeldatud viisil projekteeritud detaile. Kuna ligipääs ülikooli tööpinkidele on piiratud, jõuti järeldusele, et Robotiklubile kuuluva manuaalfrees- ja puurpingi Optimum BF20L ümberehitus oleks otstarbekas. Ümberehitatud tööpink ei oleks esialgu kasutusmugavuse poolest samal tasemel turul saadaolevate sama suurusjärgu arvjuhtimisega freesidega, kuid peaks olema suuteline läbi viima automaatsuurimistöid, 2D ja 2,5D freesimistöid ning ka väiksemal määral 3D freesimistöid. Samuti peab ümberehitatud pingil säilima manuaal-koordinaatpuurpingi võimekus, seega peab puutumata jääma tööpingi pinool ning säilima telgede käsitsi liigutamise võimalus.

Käesoleva töö esimene osa tegeleb olemasolevate arvjuhtimissüsteemide uurimise ja tutvustamisega, pidades silmas nende potentsiaalset sobivust konkreetse projektiga. Vaadeldakse süsteemide tehnilist lahendust kui ka eelnevates projektides avaldunud kasutusomadusi ja kolmandate osapoolte hinnanguid. Osa eesmärgiks on leida käesolevale projektile kõige paremini sobiv arvjuhtimiskontroller.

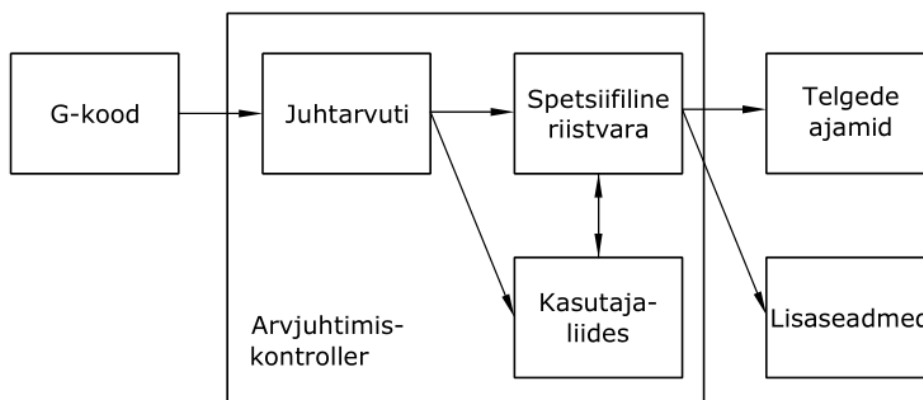
Teine ja kolmas osa keskenduvad ümberehituseks vajalike mehaanika ja elektroonika detailide valikule. Kirjeldatakse projekti tarbeks loodud detaile ja nende valmistamist, tööpingis asendatavaid mehaanikakomponente ja nende asendamise põhjuseid ning pingile esitatud nõuete täitmiseks sobivaid ajameid.

Töö neljas osa tegeleb ümberehituse teostuse ja pingi häälestamisega. Kirjeldatakse tööpingiga kaasneva elektrikilbi koostamist, pingi häälestamist, hinnatakse valminud tööpingi täpsust ja suutlikkust ning tuuakse välja pingi parendamiseks edasised sammud ja võimalused.

Kogu töö jooksul kasutatakse 3D modelleerimiseks raalprojekteerimistarkvara Solidworks [1]. Raalvalmistusprogrammidest kasutatakse Siemens NX-i *Manufacturing* [2] moodulit.

1. FREESPINKIDE ÜMBEREHITUS JA KASUTATAVAD KONTROLLERID

Arvjuhitavate (CNC) tööpinkide ja nende juhtsüsteemide kõige olulisemaks detailiks on arvjuhtimiskontroller, mis koosneb nii juhtarvutist, ajamitega ühenduse loomiseks mõeldud riistvarast kui ka kasutajaliidesest. Üldistatud arvjuhtimissüsteemi ehitust kirjeldab joonis 1.1, kus arvjuhtimissüsteemi sisendina on kujutatud G-koodi ja väljundina tööpingi telgede ajamite liikumist ning ühendatud lisaseadmete tööd. Kasutajaliidesena võib antud kontekstis silmas pidada nii juhtarvuti vahendusel kuvatud graafilist kasutajaliideset kui ka tööpingi manuaaljuhtimiseks kasutatavaid juhtpulte ja muid füüsilisi juhtelemente.



Joonis 1.1 Arvjuhtimissüsteemi skeem

Arvjuhtimisega pinkidel kasutatavate kontrollerite valik on lai ning tehniliste lahenduste poolest mitmekesine [3]. Tööstuslikuks kasutamiseks mõeldud kontrollerid on tihti täielikult autonoomsed ja vajavad tööks üksnes operaatorit ja G-koodi. Vähemintensiivsemaks tööks või hobikasutuseks mõeldud kontrolleritel on tööd juhtiv arvuti ja ajamite liigutusi ajastavad elemendid teineteisest eraldatud eraldiseivateks mooduliteks. Samas leidub ka puhtalt Windowsi või Linuxi operatsioonisüsteemidega varustatud arvutitel põhinevaid juhtsüsteeme, mis suhtlevad arvuti rööpvärati (paralleelpordi) vahendusel masina ajamite ja lisaseadmetega. Konkreetne lahendus eeldab juhtarvutil paralleelpordi olemasolu ja selle kokkusobivust kasutatava tarkvaraga.

Kontrollerite laiast valikust hoolimata on lõppkasutaja jaoks kasutuskogemus tihti sarnane, sest kõik kontrollerid baseeruvad sarnastel G-koodi standarditel ja juhitavad tööpingid on tihti sarnased. Seega mängib ümberehitusprojektides kontrolleri valikus tähtsat rolli paigaldamislihtsus ja juhtsüsteemi elluviija subjektiivne hinnang

kontrollerile. Kuna enamuse järgnevalt kirjeldatud kontrolleritest on suunatud hobikasutajatele, pärineb töö autori hinnang paljuski hobikasutajate jagatud kogemustel, mida koondavad spetsialiseerunud internetifoorumid [4] [5].

1.1 Saadaval olevate juhtsüsteemide ülevaade ja võrdlus

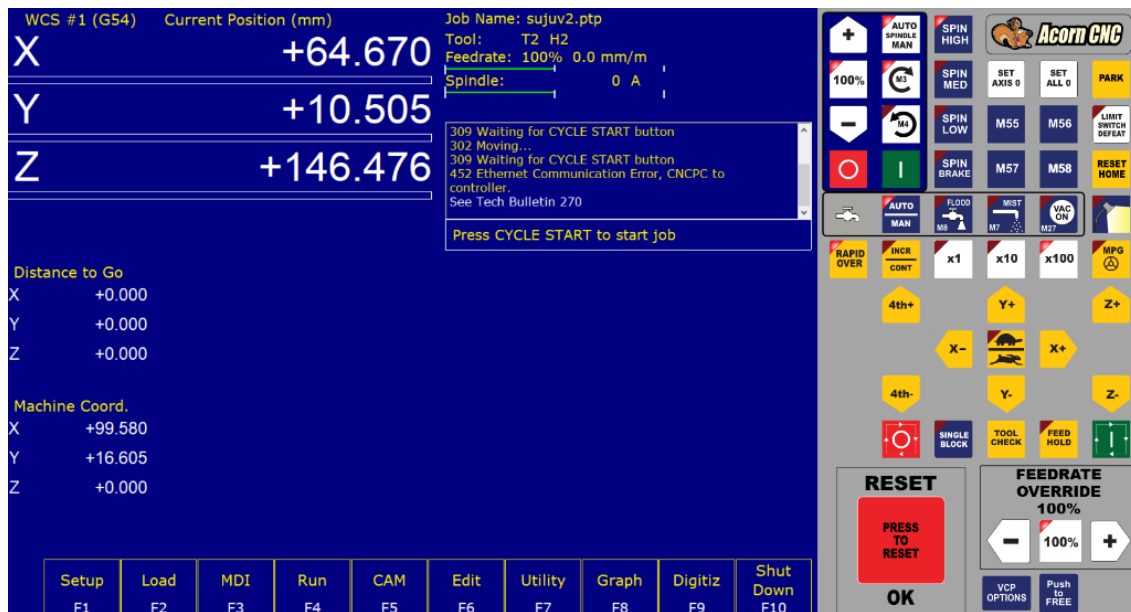
Järgnevalt tutvustatakse freespinkide ümberehitustel kasutatavaid enamlevinud ja hobikasutajate seas populaarsemaid arvjuhtimiskontrollereid ning kaalutakse nende sobivust käesoleva projektiga. Toodud kontrollerid ei esinda arvjuhtimiskontrollerite kogu spektrit, mis ulatub täielikult tööstusele suunatud kontrolleritest, nagu Siemens Sinumerik seeria [6], Mitsubishi kontrollerite seeria [7] ning teised, kuni mikrokontrollerite põhiste arendusplaatidel töötavate juhtsüsteemideni, nagu Grbl [8]. Mainimist vääriks veel arvjuhtimissüsteemid FlashCut CNC [9], Tormach Pathpilot [10] ja WinCNC [11]. Samuti leidub erinevaid tööstusrobotite ja servoajam süsteemide kontrollereid, mis suudavad küll G-koodi interpreteerida ja selle põhjal tööd teha, kuid pole otseselt arvjuhitavete metallitöötuspinkide kontekstis rakendatavad.

1.1.1 Firma Centroid kontroller Acorn

Töös välja toodud kontrolleritest kõige uuem, Centroid Acorn [12], kujutab endast juhtarvutist eraldiseisvat arvjuhtimiskontrollerit, mida juhitakse Windowsil põhineva tarkvaraga CNC12 [13]. Juhtarvuti ühendub kontrolleriga võrgukaabli kaudu ja vastutab kasutajaliidese, seadistuse ja G-koodi töötlemise eest, kontroller aga ajamitele saadetava info ajastuse ning sisendite ja väljundite eest.

Kontroller on võimeline samaaegselt juhtima nelja telge. Telgi juhitakse samm ja suund impulssjuhtimisega. Spindli juhtimiseks on kontroller varustatud pinget reguleeriva analoogväljundiga, pinge vahemikus null kuni kümme volti. Lisaks omab kontroller kaheksat optiliselt isoleeritud digitaalsisendit ja kaheksat digitaalväljundit ning PLC võimekust.

Juhtarvutis kuvatav kasutajaliides (Joonis 1.2) võimaldab lisaks klassikalisele arvjuhtimissüsteemi võimekusele manuaalset G-koodi sisestamist (MDI), tööriistaradade visuaalset kuvamist ning lihtsatele geomeetrilistele kujunditele taandatavate operatsioonide programmeerimist ehk interaktiivprogrammeerimist. Kasutajaliides toetab ning tootja soovib puutetundliku ekraani kasutust. Kasutatav ekraan peab olema külgede suhtega 16:9.



Joonis 1.2 Firma Centroid tarkvarapaketi CNC12 graafiline kasutajaliides

Puudustena võib välja tuua kontrolleri M koodidele vastavate makrokäskude ja PLC funktsionaalsuse kasutuse keerukuse ja juhtsüsteemi võrdlemisi kinnise tarkvarakeskkonna. Nimetatud funktsioonide kasutamiseks peab modifitseerima kasutajaliidesest eraldiseisvaid tekstifaile, millel puudub tekstisisestuse veakontroll. Kinnise tarkvarakeskkonna all peetakse silmas platvormi piiratust kindlatele lisaseadmetele nagu näiteks juhtmevaba juhtpult (MPG) ja asjaolu, et kasutajal pole kergelt realiseeritavat võimalust integreerida kolmandate osapoolte toodetud lisaseadmeid.

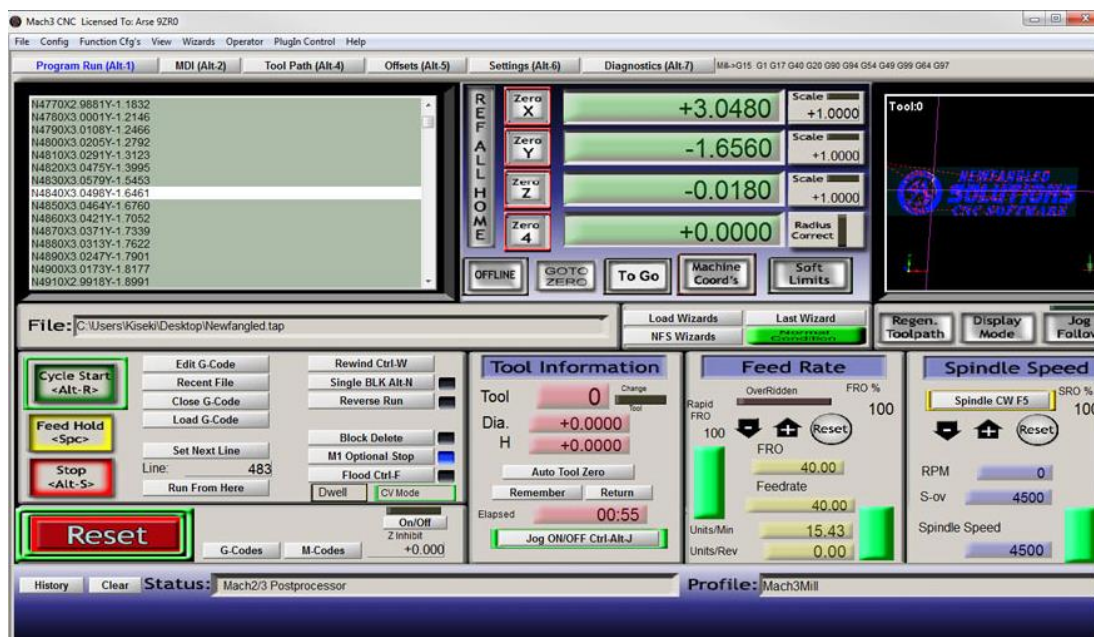
1.1.2 Firma Newfangled Solutions tarkvarapaketid Mach3 ja Mach4 Hobby

Firma Newfangled Solutions pakett Mach3 [14] ja sama toote uuem versioon Mach4 kujutavad endast Windowsi operatsioonisüsteemiga arvutitel jooksvat arvjuhtimistarkvara, mida saab kombineerida erinevate riistvaralahendustega. Tarkvaraga ühilduvat riistvara valik on lai, kuna ühilduvuse tagamine on jäetud riistvaratootjate hoolde. Iga erineva riistvaralahendusega käib kaasa Mach tarkvaraga ühilduv pistikprogramm.

Riistvaraplaadid võivad ühenduda juhtarvutiga kas paralleelpordi, USB või Etherneti ühenduse kaudu. USB ja Etherneti ühenduse puhul kasutatakse riistvara, mis simuleerib paralleelporti.

Riistvara leidub alates lihtsakoelistest kolme- ja nelja teljega laiendusplaatidest, millel on piiratud arv lisaväljundeid [15], kuni 6 teljeliste kontrollritereni [16], mis on varustatud mitmete lisavõimalustega nagu PWM väljundid ja sisendid enkoodrite jaoks.

Mach3 on pikemat aega olnud üks hobikasutajate lemmikuid tänu võrdlemisi madalale hinnale ja kergele kasutatavusele. Populaarsust on kasvatanud ka konkureerivate toodete puudus Mach3-e pika eluea alguses ning graafilise kasutajaliidese (Joonis 1.3) konkreetseks otstarbeks kohandamise võimalus.



Joonis 1.3 Firma Newfangled Solutions paketi Mach 3 kasutajaliides [17]

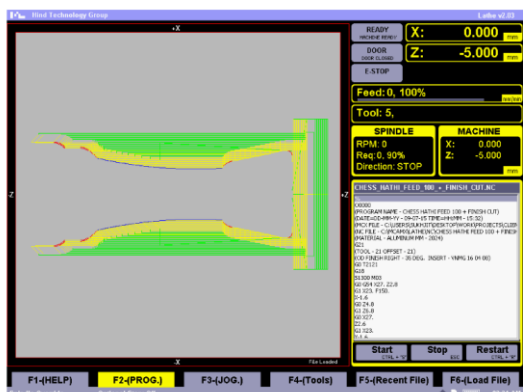
Puudustena võib välja tuua asjaolu, et telgede ajamite juhtsignaalide ajastus põhineb juhtarvuti protsessoril. Kuna Windowsi operatsioonisüsteem, millel antud tarkvara põhineb, ei ole reaalaaja rakendustele orienteeritud, võib kriitiliste juhtsignaalide saatmises esineda viivitusi. Kuigi modernsest riistvarast koosnevatel juhtarvutitel on konkreetne probleem vähem märgatav kui aastakümne vanustel arvutitel, säilib siiski viivituste tekkimise võimalus.

Mach4-ga ühilduva riistvara valik pole tarkvara uudsuse ja riistvara tootjate leige suhtumise tõttu kuigi lai. Samuti on kritiseeritud paketi puudulikku dokumentatsiooni ja tarkvara mitmeid vigu.

1.1.3 Firma Masso CNC arvjuhtimissüsteemid

Firma Masso CNC arvjuhtimiskontrollerid [18] kujutavad endast kergele või keskmisele tööstuskasutusele sihitud juhtarvutivabu kontrollereid. Praktiliselt võttes on tegu kaks ühes lahendusega, kus on ühendatud juhtarvuti ja arvjuhimiskontroller koos lisa sisendite ja väljunditega. Kontrolleri külge ühendatakse ekraan graafilise kasutajaliidese

(Joonis 1.4) tarvis ning arvutihir ja klaviatuur. Saadaval on ka puuetundlikku ekraani tugi.



a)

b)

Joonis 1.4 Firma Masso CNC a) graafiline kasutajaliides, b) G3 kontrolleri [19]

Kontroller on varustatud 18 lisa väljundi ja 24 optiliselt isoleeritud lisa sisendiga, kahe analoogsisendiga ja ühe väljundiga spindli tarbeks. Spindli juhtimine toimub kas juhtpinge või PWM-iga. Kontrolleriga on võimalik juhtida kolme kuni viit telge. Telgede ajamite juhtimiseks on kasutatakse impulssjuhtimist suuna ja sammu läbi.

G-koodi faili liigutamiseks kontrollerisse on võimalik kasutada USB mäluulka või internetiühendust WiFi ühenduse näol. G-koodi failide loomine ja käsitsi kirjutamine on võimalik ka otse kontrolleris.

Kuigi Masso kontrolleritel on olemas interaktiivprogrammeerimise tugi, piirdub see vaid nelja lihtsa operatsiooniga. Puuduvad puurimis operatsioonid.

Masso kontrolleri negatiivse küljena võib välja tuua kõrge hinna, mis on käesolevas töös väljatoodud juhtsüsteemide omast, olenevalt variandist, kaks kuni kolm korda kallim. Samuti tuleb mainida makrokäskude muutmise võimaluse puudumist. Klassikaliselt muudetavad käsud, nagu tööriistavahetused ja kodupositsiooni leidmine, on muudetavad vaid tootja poolt ette määratud valikute piires.

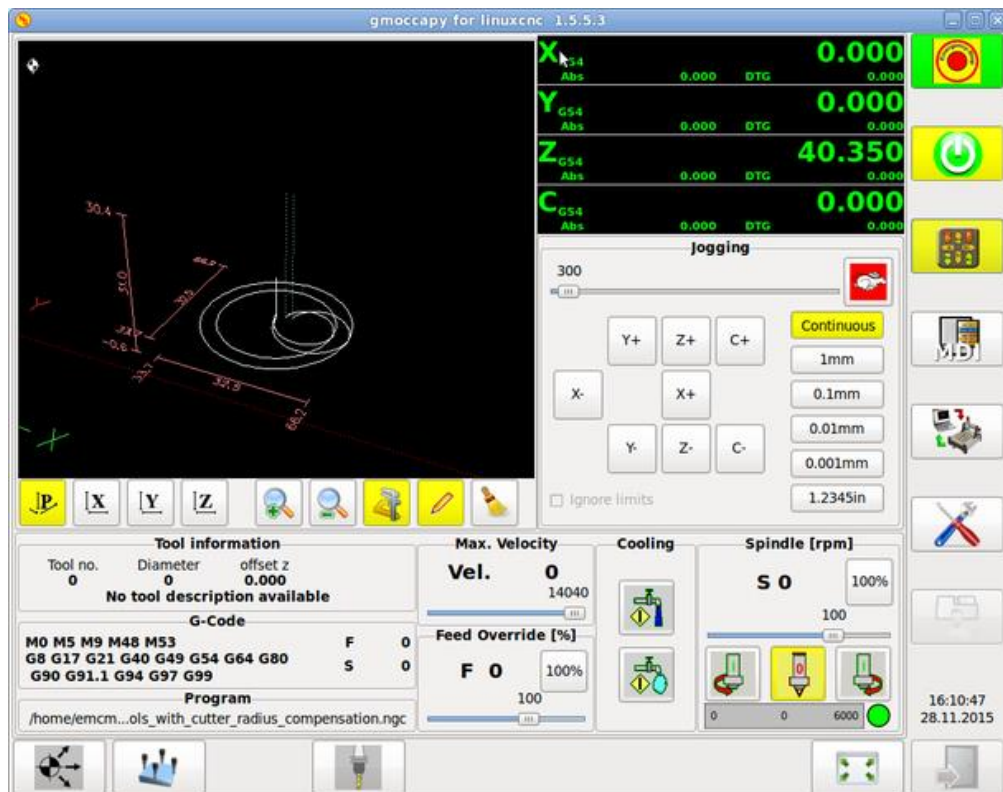
1.1.4 Tarkvarapakett Linux CNC

Linux CNC [20] on paindlik tarkvarapakett arvjuhtimissüsteemidele. Nimele vastavalt on tegu Linuxi operatsioonisüsteemil töötava avatud lähtekoodiga programmiga, mis kasutab Linuxi reaalaraja laiendusi, et saavutada parimat ajastustäpsust.

Sarnaselt eelkirjeldatud lahendustele vajab LinuxCNC eraldiseisvat juhtarvutit, mis tegeleb kasutajaliidese haldamise ja kuvamisega (Joonis 1.5) ning juhitava masina juhtimiseks vajalike signaalide genereerimise ja haldamisega. Ideaalis peaks masina

juhtimisel kasutama vaid selleks otstarbeks mõeldud arvutit, tagades nii parima võimaliku jõudluse minimeerides juhtarvutis jooksvate ebaoluliste programmide arvu.

Riistvaraga suhtlus toimub kas otse läbi paralleelpordi või mõne liikumiskontrolleri vahendusel. Sarnaselt Mach tarkvaraga on ühilduvate liikumiskontrollerite ja laianuduskaartide valik võrdlemisi lai. Populaarsed on Mesa liikumiskontrollerid [21], mis oma suure hulga üldotstarbeliste sisendite ja väljunditega (GPIO) võimaldavad juhtida keskmisest keerukamaid arvjuhtimispinke. Suur lisäühenduste hulk võimaldab teostada suletud juhtimiskontuuriga (tagasisideahelaga) servoajamite juhtimist.



Joonis 1.5 Üks LinuxCNC mitmest kasutajaliidest [22]

LinuxCNC nõrga küljena võib välja tuua tema massiivsuse ja lõputu modifitseerimise võimaluse, mis on küll praktilisest vaatepunktist suur pluss, kuid ei pruugi kõige paremini sobituda kõigi rakendusvaldkondadega.

1.1.5 Juhtsüsteemide võrdlus

Järgnevalt on välja toodud eelnevalt kirjeldatud juhtsüsteemide erinevad omadused (Tabel 1.1). Kõik andmed pärinevad eelnevalt toodud süsteemide dokumentatsioonist.

Tabel 1.1 Juhtsüsteemide võrdlustabel

	Centroid Acorn	Mach 3	Mach 4 (Hobby versioon)	Masso G3	LinuxCNC
Juhtarvuti operatsioonisüsteem	Windows 10	Windows 2000 või uuem*1	Windows XP või uuem	Juhtarvuti puudub	Linux*2
Nõuded juhtarvutile ja kuvaritele	Protsessori võimsuse alampiir, 4 GB muutmälu, Ethernet ühendus, 16:9 suhtega kuvar	≥1 GHz protsessor, 512 MB muutmälu, videokaart 32 MB muutmäluga	≥2 GHz protsessor, 1GB muutmälu, videokaart 256 MB muutmäluga	16:9 suhte ja VGA ühendusega kuvar	≥256 MB muutmälu, arvuti peab läbima latentsuse testi
Riistvara lahendus	Juhtarvuti ja eraldiseisev riistvara	Juhtarvuti ja eraldiseisev riistvara või rööpvärati ühendus	Juhtarvuti ja eraldiseisev riistvara	Kaks ühes juhtsüsteem ja riistvara	Juhtarvuti ja eraldiseisev riistvara või rööpvärati ühendus
Juhitavad süsteemid	CNC frees- ja treipingid	CNC frees- ja treipingid, laser- ja plasma- pingid	CNC frees- ja treipingid, laser- ja plasma- pingid, 3D printerid	CNC frees- ja treipingid, laser- ja plasma- pingid	Vastavalt operaatori oskustele*3
Maksimaalne juhitav telgede arv	4	6	6	5	9
Impulssjuhtimise sagedus	100, 200 või 400 kHz	25 kuni 100 kHz või vastavalt välisele riistvarale	20 kuni 200 kHz või vastavalt välisele riistvarale	110 kHz	Vastavalt välisele riistvarale
PLC võimekus või lisafunktsioonide programmeeritavus	Jah, CNC12-le omases programmeerimiskeeles	Jah, Cypress Basic keeles	Jah, Lua skriptide näol	Ei	Jah
MDI juhtimine	Jah	Jah	Jah	Jah	Jah
Interaktiivprogrammeerimine	Jah	Jah	Jah	Jah	Jah
Lisaväljundeid	8*4	Vastavalt välisele riistvarale	Vastavalt välisele riistvarale	18	Vastavalt välisele riistvarale
Puutesensori toetus	Jah	Jah	Jah	Jah	Jah

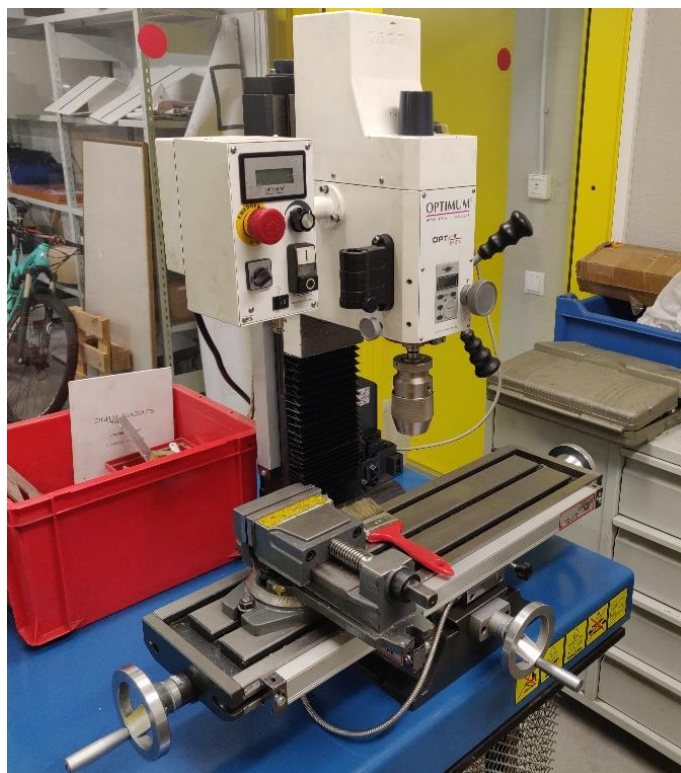
Tabeli 1.1 jätk

	Centroid Acorn	Mach 3	Mach 4 (Hobby versioon)	Masso G3	LinuxCNC
Automaatne tööriista pikkuse mõõtmine	Jah	Jah	Jah	Jah	Jah
Graafilise kasutajaliidese modifitseerimine	Minimaalne	Jah	Tehniliselt võimalik Lua skriptidega	Ei	Jah
Hind	250€, soovil laiendatud tarkvarapakett 133€	145€ + riistvara*5 150€	166€ + riistvara*5 150€	680€ (nelja teljeline variant)	Tasuta + riistvara*6 ~250€
<p>*1 Rööpvärati kasutamisel on vajalik 32 bitine Windows operatsioonisüsteem *2 Linuxi distributsioonid Ubuntu ,Debian ja Gentoo on soovitatud *3 Kuna tegu on avatud lähtekoodiga tarkvarale on rakendusvaldkonnad väga laiad *4 Laiendatav lisa riistvaraga *5 <i>Ethernet smoothstepper</i>-i [16] näitel *6 Mesa FPGA kaardi [23] näitel</p>					

2. SÜSTEEMI MEHAANIKAOSA DISAIN JA PROJEKTEERIMINE

Tööpingi ümberehitamiseks on vaja eelnevalt koguda infot ümberehitatava pingi potentsiaalsetest võimetest. See on vajalik ümberehituseks vajalike detailide valikuks pädeva otsuse langetamiseks. Seega tuleb eelnevalt tutvuda pingi algseisundiga (Joonis 2.1) ning defineerida nõuded, mis on esitatud ümberehitatud pingile.

Freepink Optimum BF20L on varustatud 850 W spindlimootoriga ja spindliga mille pöörlemiskiirust saab sujuvalt reguleerida vahemikus 90 kuni 3000 pööret minutis. Spindli pinooli käik on 50 mm. Freepink on varustatud koordinaatlauda ja Z-teljes liigutatava ning kummalegi küljele 90 kraadi ulatuses keeratava spindli koostuga. Koordinaatlauda liikumisulatus X-teljes on 480 mm ja Y-teljes 175 mm, Z-telje liikumisulatus on 280 mm [24]. Kogu masina mass on 115 kg, millest moodustavad koordinaatlaud ~32 kg ja spindli koost ~35 kg.



Joonis 2.1 Freepink Optimum BF20L enne ümberehitust

Peale ümberehitust peavad säilima või suurenema telgede liikumisulatused, alles jääma spindli koostu kallutamisevõimalus ja pinooli liikumine. Säilima peab telgede manuaalse liigutamise võimalus kasutades selleks ettenähtud käsirattaid. Peale ümberehitust peab olema võimalik spindli sisse-välja lülitamine ja sujuv kiiruse reguleerimine kasutades

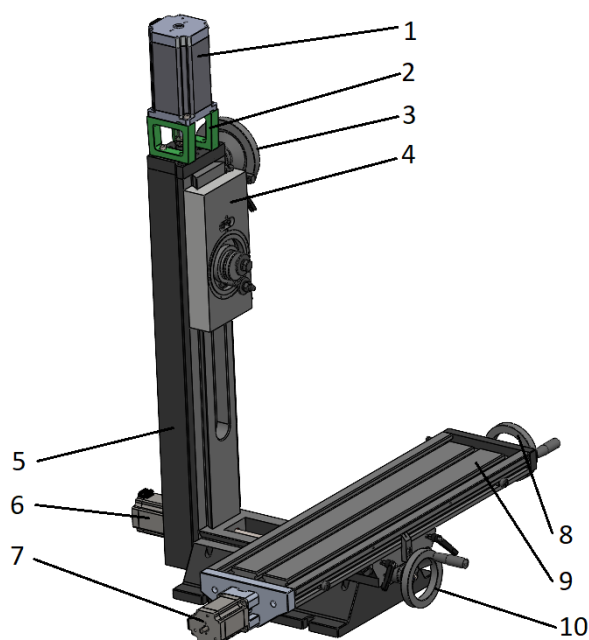
originaalseid lüliteid. Viimane punkt tuleneb tõsiasiast, et pingi kasutamise võimalus puurpingina on ülimalt oluline.

Arvjuhtimisega tööpinkide iseloomustuses on kõige olulisemal kohal telgede liikumiskiirused ja võimalikud kiirendused. Kuna ümberehitatava pingi näol on tegu väikese pingiga, millel puudub suur vibratsioone summutav mass ja töö ajal esinevad painded on freespinkide kohta suured, ei ole mõistlik loota ümberehitatud pingist suuri liikumiskiirusi ja kiirendusi (ega ka täpsust). Autori hinnangul on mõistlikeks maksimaalseteks liikumiskiirusteks igas teljes $v = 4000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ja kiirendusteks $a = 6,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Arvjuhitavatele pinkidele on oluline ka käigukruvide ja liikuvate teljeosade vahelise lõtku vähendamine. Seega peab ümberehitatud pink omama piisavalt väikest lõtku, et seda oleks võimalik juhttarkvaras kompenseerida.

2.1 Tööpingi mehaanikaosa 3D modelleerimine

Tehtava töö visualiseerimiseks ja vajalike uute detailide disainimiseks oli vajalik luua tööalusest freespingist täpne 3D mudel. Disaini protsessi kiirendas asjaolu, et käsitletavast manuaal freespingist oli juba saadaval väga detailne mudel [25]. Töö autoril jäi ainult ümberehituse muudatused sisse viia (Joonis 2.2).



Joonis 2.2 Freespingi 3D mudel peale modifitseerimist. 1 – Z-telje mootor, 2 – Z-telje mootori kinnitused, 3 – Z-telje käsiratas, 4 – Z-telje kelk, 5 – Z-telje vertikaalne keha, 6 – Y-telje mootor, 7 – X-telje mootor, 8 – X-telje käsiratas, 9 – töölaud, 10 – Y-telje käsiratas

2.2 Telgede ajamite projekteerimine

Eelnevalt esitatud liikumiskiiruste ja kiirenduste saavutamiseks on vaja varustada masina teljed piisavalt võimsate ja piisavat momenti arendavate mootoritega. Järgneva arvutuskäigu, mis põhineb allikal [26], eesmärk on leida mootorite ja vastavate draiverite valiku aluseks olev ajami vajalik pöördemoment.

2.2.1 Pöördemomentide arvutus

Tööpingi X- ja Y-teljed on momendiarvutuste vaatenurgast identsed. Reaalseks erinevuseks on Y-telje vaheplaat, mille mass on kaasatud järgnevatesse arvutustesse. Mootori arendatav moment T koosneb kahest komponendist: T_c – pidevaks liikumiseks vajalik moment ja T_a – kiirenduseks vajalik moment. Pidevaks liikumiseks vajalik moment leitakse valemiga

$$T_c = \frac{F_a \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (2.1)$$

kus F_a - teljesuunaline jõud mida ajam peab ületama, N,
 P - käigukruvi keermesamm, m,
 η - käigukruvi kasutegur, mis antud juhul $\eta = 90\%$ [27].

F_a leitakse järgmiselt

$$F_a = F + m \cdot g \cdot \mu \quad (2.2)$$

kus F - freesimisest tulenev teljesuunaline jõud, eeldatakse $F = 90$ N [28],
 m - töölaua ja sellel oleva rakise massi, eeldatakse $m = 52$ kg,
 g - $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ raskuskiirendus,
 μ - töölaua staatiline hõõrdetegur (malm malmil), $\mu = 0,2$ [29].

Arvutatakse teljesuunaline jõud ja pidevaks liikumiseks vajalik moment:

$$F_a = 90 + 52 \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 192 \text{ (N)} \quad (2.3)$$

$$T_c = \frac{192 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,9} = 0,18 \text{ (Nm)} \quad (2.4)$$

Kiirenduseks vajaliku momendi T_a leidmiseks lahendatakse valem

$$T_a = J \cdot \omega' \quad (2.5)$$

kus J - liikuva koostu inertsmoment, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,
 ω' - käigukruvi nurkkiirendus, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$.

Inertsmoment J koosneb komponentidest:

$$J = J_m + J_{vk} + J_{tl} + J_s \quad (2.6)$$

kus J_m - mootori rootori inertsmoment, $J_m = 0,00007$, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ [30],
 J_{vk} - käigukruvi inertsmoment, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,
 J_{tl} - töölaua inertsmoment, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,
 J_s - siduri inertsmoment, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

Järgnevalt leitakse käigukruvi inertsmoment:

$$J_{vk} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{käigukruvi}} \cdot (r_{\text{käigukruvi}})^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,56 \cdot (0,008)^2 = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2.7)$$

kus $m_{\text{käigukruvi}}$ - telje käigukruvi mass, kg,
 $r_{\text{käigukruvi}}$ - telje käigukruvi raadius, m,

töölaua inertsmoment:

$$J_{tl} = m \cdot \left(\frac{P}{2 \cdot \pi} \right) = 52 \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right) = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2.8)$$

ja viimaks siduri inertsmoment:

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{sidur}} \cdot ((r_{\text{sidur}})^2 + (R_{\text{sidur}})^2) = \frac{1}{2} \cdot 0,2 \cdot ((0,004)^2 + (0,01)^2) = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2.9)$$

kus m_{sidur} - siduri mass, kg,
 r_{sidur} - siduri sisediameeter, m,
 R_{sidur} - siduri välidiameeter, m.

Käigukruvi nurkkiirendus avaldub valemiga

$$\omega' = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60 \cdot t} \quad (2.10)$$

kus N - töölaua maksimaalsele kiirusele vastavat käigukruvi pöörete arv minutis,
 t - töölaua maksimaalse kiiruse saavutamise aeg, s,

mis leitakse vastavalt:

$$N = \frac{v}{P} = \frac{4000}{5} = 800 \text{ (min}^{-1}) \quad (2.11)$$

ja (kiirus v , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$t = \frac{v}{a} = \frac{0,067}{6,67} = 0,01 \text{ (s)} \quad (2.12)$$

Nüüd on olemas kõik kiirenduseks vajaliku momendi arvutamiseks:

$$\omega' = \frac{2 \cdot \pi \cdot 800}{60 \cdot 0,01} = 8378 \text{ (rad} \cdot \text{s}^{-2}) \quad (2.13)$$

$$J = 0,0007 + 1,8 \cdot 10^{-5} + 3,3 \cdot 10^{-5} + 1,16 \cdot 10^{-5} = 1,324 \cdot 10^{-4} \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2.14)$$

$$T_a = 1,324 \cdot 10^{-4} \cdot 8378 = 1,11 \text{ (Nm)} \quad (2.15)$$

Kogu töölauda liigutamiseks vajalik moment selgub summas:

$$T = T_c + T_a = 0,18 + 1,11 = 1,29 \text{ (Nm)} \quad (2.16)$$

Võttes katteteguriks $k = 1,5$ leitakse, et freespingi X- ja Y-telje ajamiseks sobiks mootor, mis arendab vähemalt momenti $T_k = 2 \text{ Nm}$.

Vertikaaltelje (Z-telg) ajam peab liigutama vertikaalse asetusega spindlit, spindli mootorit ja kinnitusplaate. Z-telje ajami momendi leidmiseks viiakse läbi sarnane arvutuskäik, mis erineb eeltoodust järgmiselt:

teljesuunaline jõud, mida ajam ületama peab leitakse valemiga

$$F_a = F + m_z \cdot g \quad (2.17)$$

kus m_z – Z-telje liikuv mass, kg, $m_z = 35 \text{ kg}$.

$$F_a = 90 + 35 \cdot 9,81 = 433 \text{ N} \quad (2.18)$$

Mootori rootori inertsmomendi väärtuseks võetakse $J_m = 0,0002 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ [30].

Arvutuste tulemusena selgub, et Z-telje liigutamiseks vajalik moment

$$T_z = 2,75 \text{ Nm} \quad (2.19)$$

ja peale katteteguri $k = 1,5$ rakendamist selgub, et Z-telje ajamiseks sobiks mootor, mis arendab vähemalt momenti $T_k = 4,1 \text{ Nm}$.

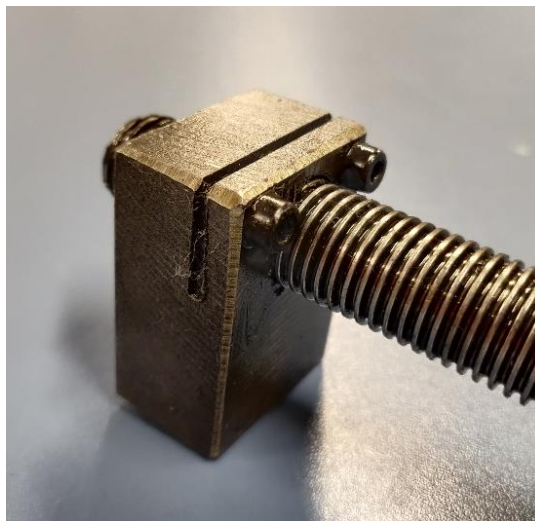
2.3 Käigukruvid ja muud detailid

2.3.1 Käigukruvid

Freespingi X- ja Y-telg olid varustatud nelja millimeetrise sammu ja 16 mm diameetriga trapets-käigukruvide ja vastavate veomutritega. X- ja Y-teljes mõõdetud lõtk osutus tarkvaras kompenseerimiseks liialt suureks – 0,3 mm. Kuigi originaalsed veomutrid olid varustatud lõtku vähendamise abinõuga (Joonis 2.3), otsustati masina kõik trapetskruvid asendada kuulkrudega, mis leiavad arvjuhitavate pinkide hulgas universaalset kasutust. Seda järgnevatel põhjustel:

- Kuulkruid omavad trapetskruvidest palju suuremat kasutegurit [27]. Trapetskruvide tööpõhimõte toetub kruvi ja mutri hõõrdumisele, mis loomu pooldest on kasutegurit vähendav protsess. Trapetskruvi kasutegurit on võimalik suurendada vaid vähendades mutri ja kruvi vahelist hõõrdejõudu. Viimane tegevus suurendab juba niigi suurt lõtku ja seetõttu ei ole aktsepteeritav. Kuulkrude tööpõhimõte seevastu toetub kuullaagrite pidevale veeremisele, tegevusele kus praktiliselt hõõrdumine puudub.

- Kuulkruvid omavad väikest lõtku, millest on abi suurema positioneerimistäpsuse saavutamisel. Ideaalne lahendus omaks nullilähedast lõtku, kahjuks on selle saavutamiseks vaja lihvitud keermetega kuulkruve ja/või lõtkuvastaseid topelt kuulkruvimutreid, mis antud pingi ümberehitusel jäävad kõne alt välja tänu oma suurele maksumusele ja üleliigsele täpsusele. Teine, säästlikum võimalus väiksema lõtku saavutamiseks on kasutada kuulmutris ettenähtust suuremaid kuullaagreid. Antud meetodit käesolevas töös ei rakendata, kuid märgitakse, et lõtku edasise vähendamise vajadusel oleks see väärt uurimist.



Joonis 2.3 Lõtku vähendamise abinõu trapets-veomutri küljes

Kuulkruvide valikul tuleb silmas pidada kruvide ja mutrite mõõtmeid. Kuulmutrid on suuremate mõõtmetega kui freespingis olnud trapetsmutrid ja seega peab nende kasutuselevõtul freesi detaile modifitseerida.

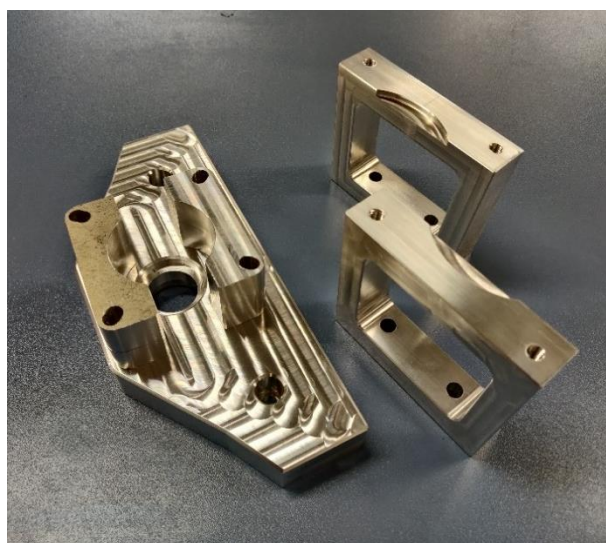
Käesolevas töös võeti kasutusele DIN standarditele vastavad „1605“ ja „2005“ rullitud kuulkruid ja kuulmutrid SBC Linear [31]. X- ja Y-telje kuulkruid on 16 mm diameetriga, Z-telje kuulkruid 20 mm diameetriga ja viie millimeetrise keermesammuga. Tootja andmetel esineb kuulkruide ja kuulmutri vahel kruvi telje suunas 0,05 mm suurune lõtk, mis on piisavalt väike juhttarkvaras kompenseerimiseks.

Üleliigse ümberehituse vältimiseks otsustati uute käigukruvide kinnitamiseks kasutada juba olemasolevaid ühendusi ja laagreid. X-telje puhul tähendas see operaatore poolt vaadates parempoolse töölaua otsa koostu täielikku säilimist. Säilitati parempoolne koost, kuna see sisaldas radiaal-tugilaagrit, mis eemaldas veokruvi kinnitamisel tekkiva teljesuunalise lõtku. Vasakpoolsesse töölaua otsa kinnitati hiljem mootor, seega käigukruvi vasakpoolne ots töödeldi kasutatava siduri jaoks sobivaks. Y-telje puhul säilis telje operaatore poolne osa X-teljega samal põhjusel. Z-telje kruvi ülemist osa

modifitseeriti käsiratta ja mootori kinnituste tarvis. Uute käigukruvide tööjoonised on toodud lisas 1.

2.3.2 Mootori ja kuulkruvimutri kinnitused

Telgede mootorite kinnitamisel püüti hoida uuendatud masina gabariite võimalikult väiksena, vältida potentsiaalsete lõtkude lisamist süsteemi ja tagada lihtsat manuaalset juhtimist. Mootorite kinnitamiseks disainitud detailid on nähtavad joonisel 2.4. Nii Y kui ka Z-telje mootorite kinnitamiseks freesikere valudetailidele oli vajalik freesi detailide pindade siledaks freesimine, tagamaks mootorite ja telgede kolineaarsust ja kinnituspunkte olemasolu (Joonis 2.5).



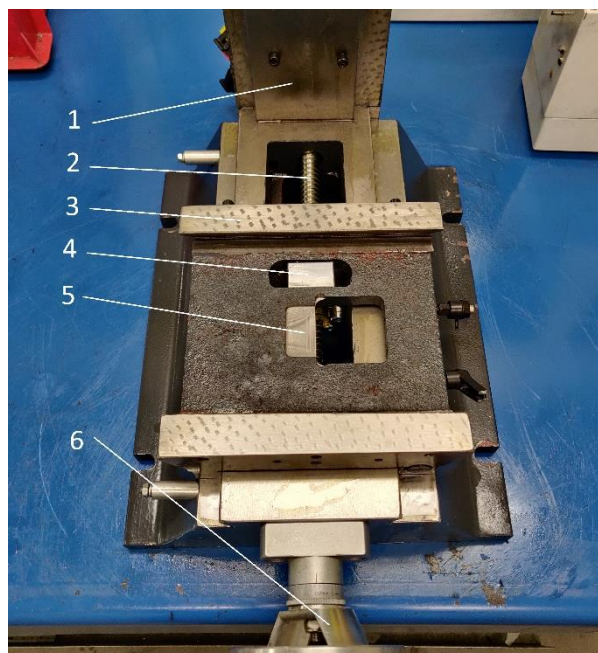
Joonis 2.4 Mootorite kinnitusdetailid. Vasakul X-telje mootorikinnitused koos töölaua otsaga, paremal Z-telje distants mootorikinnitused



Joonis 2.5 Y-telje mootori kinnitusala Z-telje vertikaalse keha tagaküljel

Mootorite võllide ja käigukruvide ühendamiseks kasutati kergelt kättesaadavaid vibratsioone summutavaid kolmeosalisi sidureid, mis koosnevad kahest võllikinnitusest ja nende vahelisest polümeer detailist. Kaaluti ka täismetallist lõõtsa tüüpi sidurite kasutust, kuid kasutatavate sammumootorite vibratsiooni tõttu otsustati selle vastu.

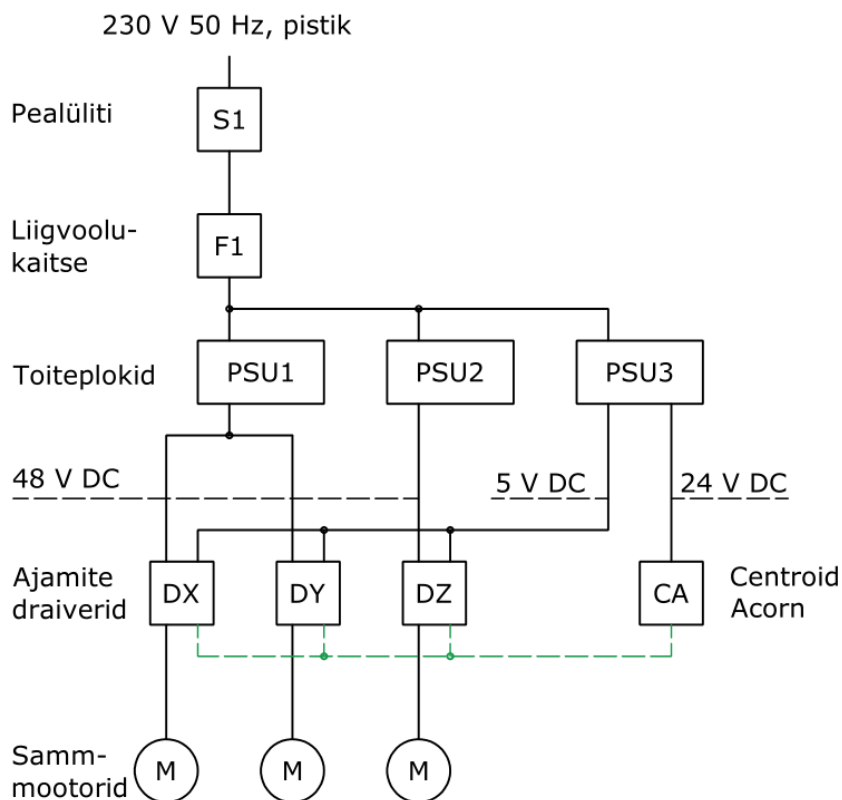
Kuulmutrite ja liikuvate teljeosade vahelised kinnitused disainiti kasutama vanu trapetsmutrite kinnituspunkte. Mutrite mahutamiseks tuli töölaua aluspinda ja Y-telje kelku lõigata avad (Joonis 2.6). X-telje kuulmutri ülemine äärik eemaldati samal põhjusel. Tagantjärele vaadates oleks olnud targem ohverdada umbes 80 millimeetrit töölaua X-telje suunalisest liikumisest ja kinnitada X-telje kuulmutter Y-telje supordi välise ääre külge, tagades seeläbi parema jäikuse.



Joonis 2.6 Paigaldatud Y-telje kelk, 1 – Z-telje vertikaalkeha, 2 – Y-telje kuul kruvi, 3 – Y-telje kelk (suport), 4 – Y-telje kuul kruvi mutri kinnitus, 5 – X-telje kuul kruvi mutri mahutamiseks lõigatud ava, 6 – Y-telje käsiratras manuaaljuhtimiseks

3. JUHTSÜSTEEM JA AJAMITE ELEKTROONIKAOSA

Järgnev peatükk kirjeldab joonisel 3.1 toodud põhiliste elektriühenduste projekteerimist ja olemust. Täpsem elektriskeem on toodud lisas 2.



Joonis 3.1 Elektriühenduste plokkskeem, mustaga märgitud toiteühendused, rohelisega märgitud signaaliühendused

3.1 Arvjuhtimiskontroller

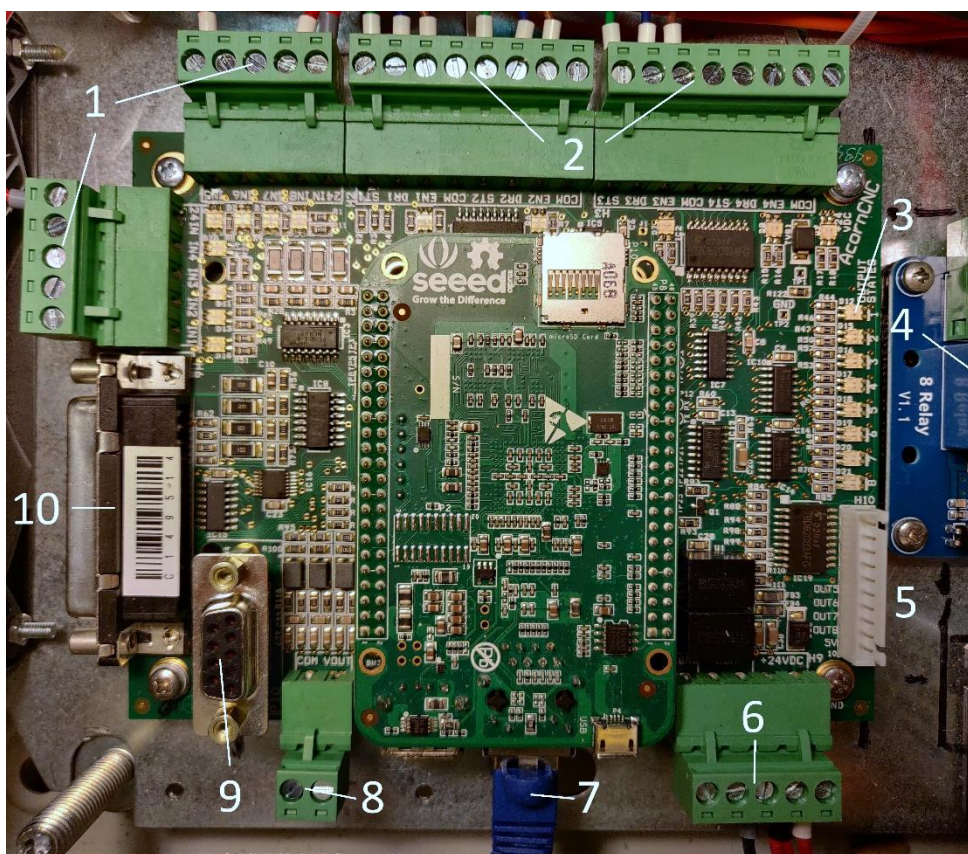
Käesolevas ümberehitusprojektis valiti keskseks arvjuhtimiskontrolleriks Centroid Acorn (Joonis 3.2). Põhilised valikukriteeriumid, millele toetudes otsus tehti olid järgnevad.

Kuigi konkreetne riistvara on võrdlemisi uus, on selle tootja pikka aega tegelenud tööstuslikul tasemel vanemate metallitöötuspinkide ümberehitusega. Samuti põhineb riistvaraga kaasnev juhtarkvara CNC12 sama tootja tööstuslikul kontrolleri variandil. Võrreldes teiste kontrolleri kandidaatidega pakub Acorn tööstuskontrolleritele omast robustsust ilma nendega kaasas käiva hinna ja installatsioonikeerukuseta.

Acorn ja selle juhtarkvara ei ole seotud konkreetse juhtarvutiga. Suure liikmete hulgaga Robotiklubi kontekstis annab see võimaluse igal freespingi kasutajal kasutada juhtarvutina oma isiklikku arvutit ning säästab seeläbi ühe arvuti, mis vastasel juhul

oleks täielikult pühendatud freespingile. Uue juhtarvuti kasutamiseks on vajalik sellesse installeerida juhttarkvara ja rakendada eelnevalt koostatud ja freespingile omast konfiguratsioonifaili. Piirates ligipääsu nimetatud konfiguratsioonifailile saab efektiivselt piirata freesi kasutajate hulka ja seeläbi hoida kolmandaid osapooli freesi või ennast vigastamast.

PLC funktsionaalsus tagab ehitatava süsteemi laiendamise võimaluse ja suurendab tulevikukindlust. Seeläbi on võimalik tulevikus lisada freespingile erinevaid lisaseadmeid, nagu automaatne tööriistavaheti ja -lukusti, automatiseeritud jahutus ja määrdesüsteem ning potentsiaalselt ka väline MPG.



Joonis 3.2 Juhtplaat Centroid Acorn, 1 – kaheksa üldotstarbelist sisendit, 2 – telgede juhtimise väljundid, 3 – üldotstarbeliste väljundite indikaator tuled, 4 – releelaat, 5 – releelaadi ühendus ja kaheks üldotstarbelist väljundit, 6 – toiteühendused, 7 – juhtarvuti ühendus Etherneti kaabli kaudu, 8 - analoogväljund, 9 – enkoodri sisend, 10 – DB25 pistik telgede juhtimise ja üldotstarbeliste väljunditega.

3.2 Ajamid ja nende juht- ja kontrollahelad

Tööstuslikud arvjuhtimispingid kasutavad telgede positsioneerimiseks servomootoreid. Ideaalis võiks neid ka käesolevas projektis rakendada, kuna kinnise tagasisideahelaga servomootorid tagavad kiire, vaikse ja efektiivse positsioneerimise. Nende arendatav moment püsib sama pea kogu pöörlemiskiiruse ulatuses ning servomootorid on perioodiliselt ülekoormatavad. Kahjuks kaasneb enamike servosüsteemidega kõrge hinnasilt, mis käesoleva projektiga kokku ei sobi. Seega tuleb kaaluda alternatiive.

Väikesemõõdulistes täpset positsioneerimist nõudvates masinates, nagu 3D printerid ja väiksemad koordinaat freesid, leiavad kasust sammootorid. Seda põhiliselt nende madala hinna tõttu. Servomootoriga võrreldes langeb sammootorite arendatav moment pöörlemiskiiruse tõustes. Samuti ei ole sammootorid energia tarbimise suhtes efektiivsed, sest nende ehitusest tulenevalt tarbivad need pidevalt energiat. Sammootorid kuumenevad kergelt. Sammootoritele omase sammumise tõttu on adekvaatse positsioneerimistäpsuse saavutamiseks vajalik kasutada mikrosamm-talitust võimaldavaid draivereid. Avatud tagasiside ahelaga sammootoritega kaasneb sammude „kaotamise“ risk. Oodatust suurema koormuse tõttu ei pruugi mootor sellele saadetud juhtimpulssidele vastavalt reageerida. Kuna avatud tagasisideahelaga süsteemide puhul on mootorile ette antud sammude hulk ainuke positsiooni defineeriv näitaja, võivad sammude „kadumisega“ kaasneda ohtlikud tagajärjed. Seega tuleb kaaluda tagasisidestatutud sammootoril põhinevaid süsteeme.

Käesolevas töös otsustati kasutada firma Leadshine enkoodritega varustatud sammootoreid ja vastavaid draivereid [32] (Tabel 3.1).

Tabel 3.1 Kasutatud ajamid

	Mootor	Draiver
X- ja Y-telje ajam	ES-M22430	ES-D808
Z-telje ajam	ES-M23440	ES-D808

Vastavalt peatükis 2.2 arvatule arendavad valitud X- ja Y-telje mootorid maksimaalset momenti 3,0 Nm ja Z-telje mootor momenti 4,0 Nm. Valitud mootorid on varustatud 1000 impulsiliste enkoodritega, mis viie millimeetrise sammuga kägukruviga kombineerides annavad minimaalseks teoreetiliseks masina liigutuseks viis mikromeetrit. Üks mootori täissamm on võrdne 1,8° mootori völli pöördega.

Valitud draiverid reguleerivad mootorisse sisenevat voolu enkoodri andmete ehk positsioonierinevuse põhjal. Suurema erinevuse korral vool kasvab ning vea puudumisel piiratakse voolu seadistatava alampiirini. Seeläbi on eemaldatud sammootoritele omane sammude „kaotamise“ probleem. Kui positsioonierinevus kasvab seadistatavast

piirist kõrgemaks, väljastab draiver kontrolleri veasignaali, mille peale kontrolleri töö seiskab.

Lisaks mootorit läbiva voolu ja lubatava positsioonivea seadistamisele on võimalik käesolevaid draivereid programmeerida Leadshine Pro Tuner [33] tarkvaraga. Tarkvara lubab seadistada sisendeid ja väljundeid kas *active high* või *active low* signaalidele, katsetada mootorite liikumist ilma välise kontrolleri, seadistada ühendatud mootorile vastava enkoodri impulsside arvu ning seadistada draiveri voolu juhtimise regulaatori PID parameetreid. Viimaste häälestamine toimub tagamaks võimalikult kiiret ja täpset telgede liikumist.

Kasutatavad draiverid rakendavad sammootorite täpseks juhtimiseks mikrosammlitust [34]. Talitus rakendab mootori mähiste sinusoidaalvoolule lähenevat voolu ja saavutab seeläbi mootori täissammudest väiksemad liikumised. Käesolevaid draivereid on võimalik seadistada kasutama mikrosamme alates 200 (täis sammud) kuni 40 000 sammuni mootori pöörde kohta. Kuna mootorid on varustatud 1000 impulssiliste enkoodritega ei ole 1000-st mikrosammust pöörde kohta suurematel väärtustel täpsuse saavutamise vaatepunktist praktilist rakendust, sest enkooder ei suuda eraldada väiksemaid liikumisi kui üks tuhandik täispöördest ja teljed saavad tahes tahtmata lötku ulatuses löiketööst tulenevate jõudude mõjul liikuda. Praktikas muudavad kõrgemad mikrosammu väärtused mootoreid küll vaiksemaks ja vähendavad vibratsioone. Viimast asjaolu silmas pidades seati käesolevas töös mikrosammude arvuks 3200.

3.3 Toite- ja lisaahelate projekteerimine

3.3.1 Toiteahelad

Sarnaste väikesemõduliste freespinkide ümberehitustel on süsteemi toiteks kasutatud kaht varianti. Esiteks eraldiseisval trafol ja alaldil põhinevat toitesüsteemi [35] ja teiseks eraldiseisvate toiteplokkide näol vahelduv/alalisvoolu muunduritel põhinevat süsteemi [36]. Trafol põhinevate toiteahela plussiks on masina aeglustuste ja mootorite suunavahetuste ajal tekkivate liigpingete neutraliseerimine. Trafode vastu räägib aga nende mass ja suured gabariidid. Pooljuhtmuundurid paistavad silma laia valiku ja mitmete lisafunktsioonidega. Kuigi ajamite tekitatud liigpinged on potentsiaalselt pooljuhtmuunduritele ohu allikaks on vajadusel nende vältimiseks mitmeid võimalusi [37].

Toiteallikate valikuks on vajalik teada vajaminevat võimsust. Eelkirjeldatud ajamid tarbivad toiteks alalispinget vahemikus 24 kuni 75 V. X- ja Y-telje mootorid tarbivad

maksimaalselt viis amprit voolu mähise kohta ja Z-telje mootor maksimaalselt 5,5 A mähise kohta. Kõik mootorid on kahemähiselised, seega ajamite tarbitava voolu maksimaalväärtuseks on 31 A.

Käesolevas töös võeti asutusele firma Meanwell [38] toitemuundurid tööpingega 48 V ja koguvõimsusega 1600 W Kasutusele võeti kaks muundurit. Z-telje ajami toiteks üks 600 W võimsusega muundur ja X- ja Y-telje toiteks üks 1 kW võimsusega muundur. Selline võimsuste jaotamine muundurite vahel tagas majanduslikust vaatepunktist kõige soodsama lahenduse. Võrgupingega ühendati elektrikilp pistikühenduse ja toiteplokid pealüliti ja kahepooluselise kaitselüliti kaudu (Tabel 3.2).

Tabel 3.2 Kasutatavad toiteplokid, pealüliti ja kaitselüliti

Komponent	Mudel	Kirjeldus
PSU1	Meanwell RSP-1000-48	1 kW, 48 V, DC
PSU2	Meanwell HRPG-600-48	600 W, 48 V, DC
PSU3	Nimetu toiteplokk	60 W, 24 ja 5 V, DC
Pealüliti S1	Siemens 3LD3054-0TK51	-
Automaatkaitselüliti F1	ABB S202-C13	2P, C13

3.3.2 Lisaahelad

Ohutuse tagamiseks varustati ümberehitatud frees kahe hädastopp nupuga. Üks paigutati elektrikilbi uksele ja teine spindli juhtimise paneelile, kus paiknes ka originaalne spindli hädastopp lüliti. Hädastoppnupud katkestavad vajutusel kolme ahelat. Kaks neist on ühendatud spindli originaalse juhtelektroonikaga, kolmas arvjuhtimiskontrolleri sisendiga.

Arvjuhtimis tööpingi nullpositsiooni leidmiseks on masin varustatud kolme lõpulülitiga, iga telje kohta üks. Lõpulülitid on ühendatud jadamisi kontrolleri sisendite kokkuhoidmise ja juhtmerägastiku vähendamise eesmärgil. Telgede nullasendi leidmine toimub üks telg korraga. Tegu on harilikult suletud lülititega, seega kui üks telg on oma liikumisega ühe lüliti avanud saab kontroller liikunud telje nullpunkti kindlaks määrata.

Ventilatsiooni tagamiseks varustati elektrikilp kahe ventilaatoriga, mida on võimalik kilbi uksele oleva lüliti kaudu peatada.

4. ÜMBEREHITUSE TEOSTUS

Järgnev peatükk kirjeldab freespingi eri osade ümberehituse teostust ja kommenteerib ehituse käigus tehtud otsuseid ja avastatud puuduseid.

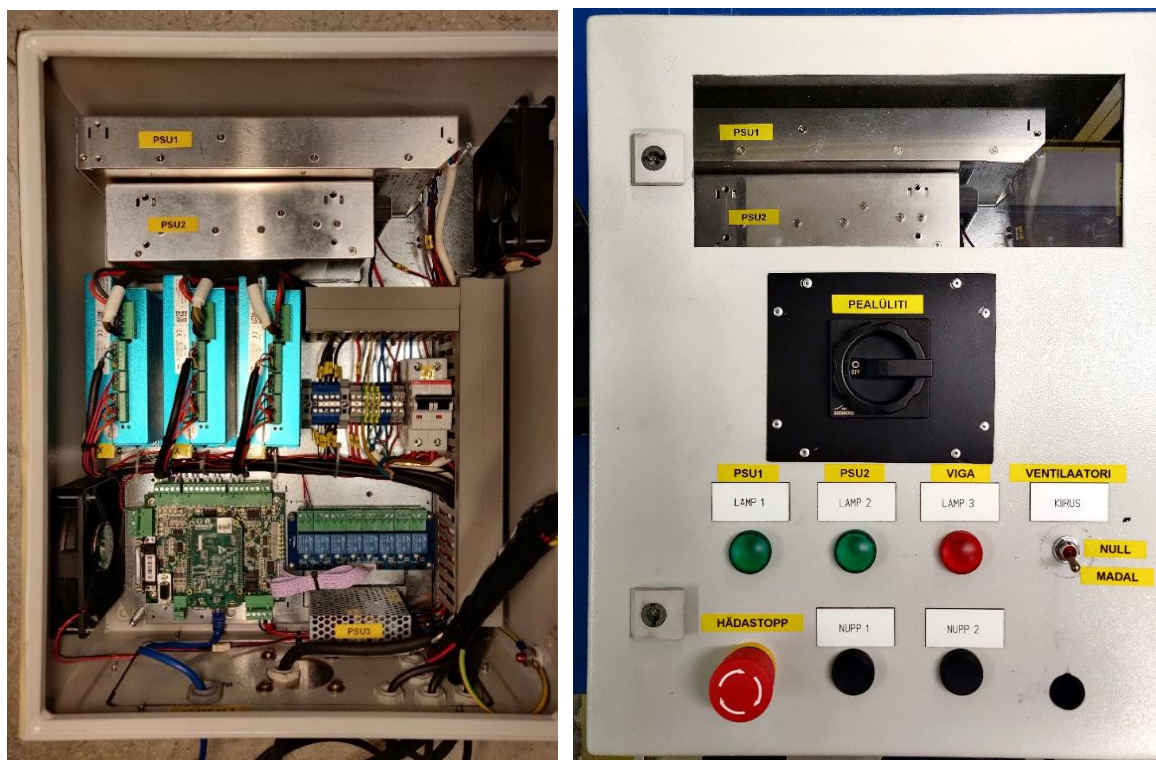
4.1 Elektroonikakilbi montaaž

Kasutusele võeti eelnevalt kasutatud elektrikilp sisemõõtmetega 350 x 450 x 150 mm. Kilbi sisse mahutati kolm erinevat toiteplokki, kolm mootori draiverit, arvjuhtimis kontrolleri ja releelaat, kahepooluseline liigvoolukaitse, kaks ventilaatorit ja klemmliist ühenduste tegemiseks. Kilbi uksele monteeriti kaks rohelist ja üks punane indikaatorlamp, hädastopp lüliti, kilbi pealüliti ja kolmepositsiooniline lüliti ventilaatorite juhtimiseks. Kõik nimetatud detailid kinnitati elektrikilpi ja markeeriti loetavalt.

Kõige enam sooja tootvad komponendid, toiteallikad ja mootori draiverid, paigutati kilbis ülespoole, eesmärgiga teisi komponente kuumenemisest säästa. Külma õhku kilpi sisse imev ventilaator paigaldati kilbi külje alumisse ossa. Ventilaator varustati võre ja tolmufiltriga. Kuuma õhku väljutav ventilaator paigutati kilbi teise külje ülaossa, toitallikate lähedusse. Ventilaator varustati võrega.

Juhtmestuse korrastamiseks rakendati kaablirenne ja -mähiseid, kus võimalik. Kiudjuhtide otsad kaeti hülssidega. Kõik klemmliistuga ühendatud toitejuhid markeeriti loetavalt. Kilbist väljuvad juhid viidi läbi kilbi põhjas asuvate läbiviikude, mis markeeriti kilbi välisküljel. Monteerimisel sooviti vältida mitme juhi ühendamist samasse kruviühendusse. Kahjuks polnud see võimalik tänu kilbi suurusele, mille tulemusena 24 V ja 5 V toiteahelad ei ole ühendatud kesksesse toidet jagavasse klemmliistu, vaid on ühendatud primitiivsemalt.

Koostatud elektrikilpi illustreerib joonis 4.1 ja kilbisisesese elektroonika montaažiskeem on toodud lisas 2.



Joonis 4.1 Koostatud elektrikilbi sisu ja elektrikilbi uks

4.2 Freespingi montaaž

Freespingi koostamine toimus ilma suuremate tõrgeteta. Siiski ilmnesid mõned disainipuudused. Nimelt ei pööratud disaini käigus piisavat tähelepanu kuulkruvide määrimisele. Täielikult koostatud pingil puudub praktiliselt igasugune juurdepääs kuulmutrite määrdenipliteni ja määrimiseks on vajalik pingi osaline laialilammutus. Optimaalne lahendus võimaldaks kriitiliste detailide määrimist kas juurdepääsuavade või listaud määrdetorustiku (Joonis 4.2) abil.



Joonis 4.2 Määrdetorustik [39]

Samuti ei olnud disaini käigus pööratud piisavat tähelepanu pingi detailide monteerimisjärjekorrale, mille optimeerimisel oleks masina koostamiseks kulutatud aeg olnud tunduvalt lühem.

4.3 Freesi häälestamine ja kasutus

Kuna kuulkruide keermesamm pole alati täielikult täpne ja nominaalväärtusega võrdne, on vajalik selle kontrollimine kogu mutri liikumisulatuses. Vajadusel on võimalik määrata kruvi keermesammule parandustegur, millega masina kontroller töö jooksul arvestab. Samuti ei pruugi kruvi keermesamm kogu tööulatuses püsida samana. Selle hälbe korrigeerimiseks on võimalik „kaardistada“ hälbed kruvi eri punktides ja seeläbi saavutada suurema positsioneerimistäpsus.

Kruvisammu hälbe mõõtmiseks asetati digitaalne indikaator mõõtma testitava telje reaalsel liikumist (Joonis 4.3). Seejärel sisestati juhtarvutist mõõdetavale teljele indikaatori positiivses suunas 10 mm pikkune liikumiskäsk. Kui indikaatori mõõdetud väärtus erines sisestatud liikumiskäsu omast muudeti kruvi sammu parandustegurit valemi 4.1 [40] järgi,

$$k_{uus} = \frac{l_{mõõdetud}}{l_{käsk}} \cdot k_{kehtiv} \quad (4.1)$$

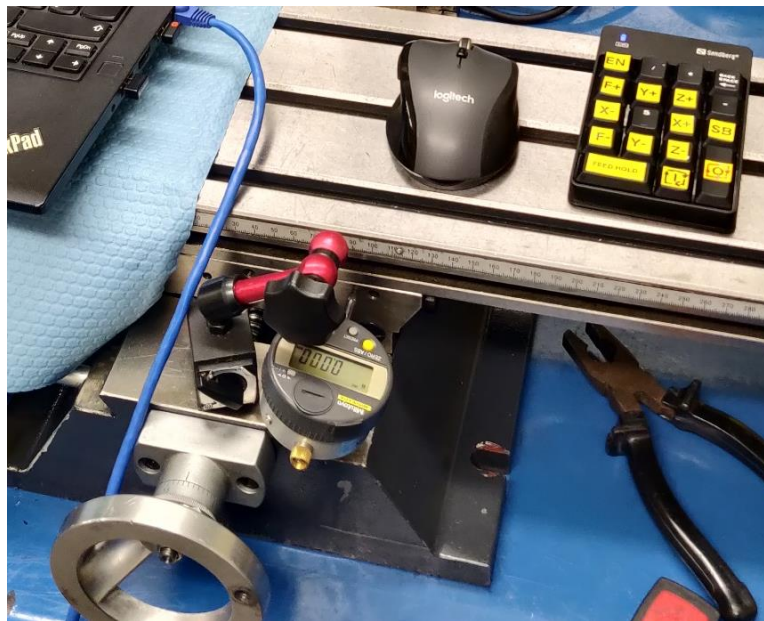
- kus k_{kehtiv} – telje liigutuse hetkel kehtinud parandustegur,
 k_{uus} – uus parandustegur,
 $l_{käsk}$ – liikumiskäsuga sisestatud liikumispikkus, mm,
 $l_{mõõdetud}$ – mõõdetud liikumine, mm.

Tele liigutamist ja parandusteguri muutmist korrati kuni uus parandustegur ei erinenud enam kehtivast. Parandusteguri määramist muutis keerukamaks kuulkruide ja mutrite vaheline lõtk. Lõtku vältimiseks mõõteandmetes läheneti enne mõõtmist indikaatori nullpunktile selle negatiivsest suunast ja masina telgede liigutamisel kasutati aegalaseid (200 kuni 300 mm·min⁻¹) ettenihkeid. Määratud lõplikud parandustegurid on toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Määratud parandustegurid

Telg	X	Y	Z
Parandustegur	5	4,995	5

Keermesammu pikkuse konstantsust kontrolliti teostades eelnevalt kirjeldatud mõõtmisi telgede eri asendites. X-telje puhul viies, Y- ja Z-telje puhul kolmes asendis. Käesoleva mõõtetehnikaga freesi kasutamist häirivat hälvet ei leitud ning telgede kruvide kaardistamist vajalikuks ei peetud.



Joonis 4.3 Kruvisammu hälbe mõõtmine ja improviseeritud juhtpult

Järgnevalt mõõdeti liikuvate teljeosade ja kuulkrudevahelise lõtku. Selleks paigaldati digitaalne indikaator mõõtma telje liikumist sarnaselt eelmisele katsele. Mõõtmise eel läheneti indikaatori nullpunktile negatiivsest suunast. Seejärel sisestati juhtarvutist 10 mm liikumiskäsk indikaatori positiivses suunas ja 10 mm liikumiskäsk indikaatori negatiivses suunas. Tegevuse tagajärjel sai indikaatorilt lugeda mõõdetava telje lõtku (Tabel 4.2). Mõõtmisi teostati X- ja Y-telgedel, lõtku mõõtmine Z-teljes pole rakendatav, sest spindli koost toetub oma massiga kuulkruvile alati ühest suunast, olenemata liikumissuunast. Lõtku väärtus sisestati juhtprogrammi selle kompenseerimise eesmärgil. Tähelepanuväärne on asjaolu, et X- ja Y-telg omavad väga erinevaid lõtke, kuigi telgede kuulkravid pärinevad samast keermelatist ja mutrid on identsed.

Tabel 4.2 Mõõdetud lõtkud

Telg	X	Y
Lõtk (mm)	0,015	0,067

Vastvalminud freesi katsetamiseks otsustati valmistada testkeha (Joonis 4.4). Testkeha abil pidi olema võimalik hinnata freesi iga telje täpsust ja freesi kasutajakogemust. Testkeha koosnes ühest välisdiameetrist, pinda süvistatud avast ja kumerpinnast. Keha valmistati alumiiniumist. Raalvalmistamiseks kasutati tarkvarapaketti Siemens NX *Manufacturing*. Freesimisel kasutati spindli maksimumkiirust ning erinevaid ettenihkekiirusi vahemikus 200 kuni 900 mm·min⁻¹. Kasutati kõvasulamist 10 mm diameetriga ots- ja ümarfreesi. Diameetrit ja kõrgusi mõõdeti välis- ja sügavuskruvikuga, ava mõõdeti analoog nihikuga ning tulemused on toodud tabelis 4.3.

Tabel 4.3 Testkeha mõõtetulemused

	Laius (X-telje suunaline, mm)		Pikkus (Y-telje suunaline, mm)		Kõrgus (Z-telje suunaline, mm)	
	Mudel	Möödis	Mudel	Möödis	Mudel	Möödis
Välisdiameeter	20,0	20,09	20,0	20,005	10,0	9,98
Süvistatud ava	20,0	19,9	15,0	15,0	5,0	4,99

Mõõtetulemuste alusel võib järeldada, et X-teljele määratud parandustegur ei ole piisavalt täpne ning edasine häälestamine on vajalik. Y- ja Z-telgede suunalised mõõdud on aktsepteeritavad. Kumerpinna pinnaviimistlust vaadeldes on näha heledaid laike. Laigud on suure tõenäosusega tekkinud laastude topeltlõikamisel, mis tõestab laastueemaldus ja jahutus süsteemi vajalikkust. Detaili üldist olemust hinnatakse heaks ja valminud freespingi ümberehitusprojekti võib lugeda õnnestunuks.



Joonis 4.4 Testkeha välisdiameetri, süvistatud ava ja kumerpinnaga

Peale pingi viimast häälestamist viidi läbi ka positsioneerimistäpsuse hindamine. Selleks valiti hinnatava telje tööulatuses suvaline punkt, mis määrati freespingile paigutatud digitaalse koordinaadikuvari (DRO) nullpunktiks. Seejärel anti juhtarvuti vahendusel hinnatavale teljele liikumiskäsud suvalisse telje punkti ning tagasi nullpunkti. Seejärel oli võimalik DRO-lt lugeda kõrvalekalle määratud nullpunktist. Katset korrati igal teljel kümme korda. Tabelis 4.4 on toodud tuvastatud suurimad kõrvalekalded, mida võib lugeda valminud arvjuhitava freespingi positsioneerimistäpsuseks.

Tabel 4.4 Tööpingi positsioneerimistäpsus sihtpunktist kõrvalekalle näol

	Kõrvalekalle	
	Negatiivses suunas (mm)	Positiivses suunas (mm)
X-telg	-0,01	+0,015
Y-telg	-0,01	+0,02
Z-telg	-0,045	+0,015

Kuigi CNC12-e kasutajaliides on puhtalt arvutihiire vahendusel kasutatav ei ole selline kasutusviis kuigi mugav. Kasutajasõbralikkuse suurendamiseks võeti kasutusele juhtmevaba numbriklaviatuur, mille klahvidele määrati *AutoHotkey* [41] programmi kasutades erinevad CNC12-s freespingi manipuleerimiseks kasutatavad käsud. Loodud juhtpult on nähtaval joonise 4.3 nurgas.

Tööpingi juhtimiseks vajaliku G-koodi genereerimiseks on mitmeid võimalusi. Kõige praktilisemaks nende seas on raalvalmistustarkvara, nagu Siemens NX, MasterCAM [42], Fusion 360 [43], Solidworks CAM [44], BobCAD [45], GibbsCAM [46] või paljude teiste, kasutamine. Teoorias on enamus raalvalmistus programme universaalsed ja kasutatavad erinevate arvjuhtimiskontrolleritega varustatud süsteemidel. Praktikas on sujuva ja veavaba töö saavutamiseks vajalik raalvalmistustarkvara varustamine masinaspetsiifilise G-koodi postprotsessoriga, mis tõlgib tarkvara väljutatava G-koodi masinale arusaadavasse dialekti. Käesolevas töös postprotsessori loomist ei käsitleta, kuna siiani ei ole kasutatava raalvalmistustarkvara ja arvjuhtimissüsteemi vahel esinenud tähelepanuväärseid möödarääkimisi.

4.4 Võimalikud edasiarendused

Kuna klassikaliselt kasutatakse metalli töötlemiskeskustes suure vooluhulgaga õli emulsioonil põhinevaid laastueemaldus meetodeid, mis käesoleva väikesemõõdulise freesiga kokku ei sobi, peab tulevikus sobivat lahendust otsides pöörduma emulsiooni suruõhu jõul piserdavate lahenduste poole. Lahendused, nagu *Fogbuster* [47] ja Noga *Minicool* [48] või nende sarnased isevalmistatud lahendused, pakuksid suruõhu näol efektiivse laastueemalduse ja võimaldaksid kasutada ainult minimaalsel hulgal jahutusvedelikku. Eelistama peaks siiski lahendusi, mis ei tekita piserdades peent udu vaid peeneid piisku, vältimaks tööruumide täitumist tervist kahjustavate aurudega.

Töö kiirendamiseks oleks kasu tihti kasutatavate tööriistade eelseadistamisest juhtarvuti tööriistamällu. Iga tööriist kinnitatakse eraldi tööriistahoidjasse, tööriistade pikkused mõõdetaks ja saadud mõõdud kantaks juhtarvutisse. Kirjeldatud teguviis võimaldaks kiireid tööriistavahetusi ilma iga uue tööriista Z kõrgust mõõtmata. Tööriistanimekirja loomine on ka eelduseks automaatse tööriistavaheti loomisele.

Kuna käesolev arvjuhtimis kontroller omab neljanda telje juhtimise võimekust, oleks võimalik luua freespingile lisaks pöördtelg. Pöördtelg lubaks veelgi keerukamate detailide freesimist ja annaks võimaluse rakendada kontrolleri täit potentsiaali.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös vaadeldi ja võrreldi erinevaid arvjuhtimiskontrollereid eesmärgiga üks neist käesoleva freespingi ümberehituseks välja valida. Vaadeldi nelja levinud kontrolleri. Kuna juhtimiskontrollerid erinesid teineteisest suuresti vaid tehniliste lahenduste, mitte oma pakutavate omaduste poolest, põhines lõplik valik suuresti autori subjektiivsel hinnangul. Sellegi poolest rääkisid valitud kontrolleri *Centroid Acorn* poolt asjaolud, et controller on kasutatav iga modernse arvutiga, ei vaja pikaldast seadistusprotsessi ning kontrolleri tootja on pikalt tegelenud tööstuslike arvjuhtimispinkide juhtsüsteemide tootmisega.

Tööpingi telgede liigutamiseks vajalike ajamite leidmiseks kehtestati valmiva tööpingi omadusi kirjeldavad nõuded. Nõuetele vastava suutlikkuse tagamiseks viidi läbi arvutus eesmärgiga leida vajalik mootorite poolt arendatav moment. Seejärel valiti kasutatavateks ajamiteks firma Leadshine Easy Servo enkoodritega varustatud sammootorid ja vastavad draiverid. Põhilisteks valikukriteeriumiteks osutusid ajamite hind ja nende läbi saavutatav positsioneerimistäpsus.

Töö käigus projekteeriti ja valmistati ümberehituseks vajalikud detailid, nagu mootorite ja kuulkrvivimutrite kinnitused, ning modifitseeriti tööpingi detaile. Samuti vahetati tööpingi originaalsed trapetskeermega käigukruvid kuulkrvude vastu, eesmärgiga vähendada telgede suunalist lõtku ja parandada positsioneerimistäpsust.

Freespingi juhtsüsteemi ja muu elektroonika kohta koostati montaažiskeemid ning kogu elektroonika mahutati ühte elektrikilpi.

Töö lõpuks valmis funktsionaalne arvjuhtimisega freespink. Freespink häälestati ja lõtkud mõõdeti. Valminud pingi võimete hindamiseks valmistati testdetail. Detaili mõõdeti ja võrreldi raalprojekteeritud mudeliga. Tööpingi eeldatavat positsioneerimistäpsust hinnati telgede haaval (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Tööpingi positsioneerimistäpsus

	Positsioneerimistäpsus (mm)
X-telg	+0,015 -0,01
Y-telg	+0,02 -0,01
Z-telg	+0,015 -0,045

Üleüldiselt hinnati valminud detail aktsepteeritavaks ja freespingi ümberehitus edukaks.

Töö jooksul ilmnenud ja tulevikus lähemat uurimist nõudvate problemaatiliste kohtadena võib välja tuua freesi spindli ette- ja taha-suunalise kalde, mida ei ole võimalik reguleerida. Kalle tuleneb Z-telje keha kinnitusest ülejäänud masina külge, kus kaks tasafreesitud pinda ei ole teoreetilise Z-teljega paralleelsed. Kalle põhjustab freesitavate detailide pindades ebatasasust ja kõrvalekaldeid täisnurksusest.

Teiseks problemaatiliseks osaks on Z-telje liugpindade ebatasasus ja nende vahelise pingutuskiilu pinna olematu tasasus. Tänu pindade halvale kvaliteedile ei ole võimalik Z-telje pingutuskiilu kogu telje liikumisulatuses adekvaatselt pingutada, mistõttu halveneb ka töödeldavate detailide kvaliteet.

Kolmanda probleemina ilmnes kasutatava CAM tarkvara ja tööpingi juhtsüsteemi ühilduvus. Ilma konkreetsele tööpingile kirjutatud G-koodi postprotsessorita võib pingi töös esineda ootamatuid tõrkeid. Seega on tulevikus oluline uurida postprotsessorite kirjutamise võimalikkust või kasutada alternatiivseid CAM programme.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

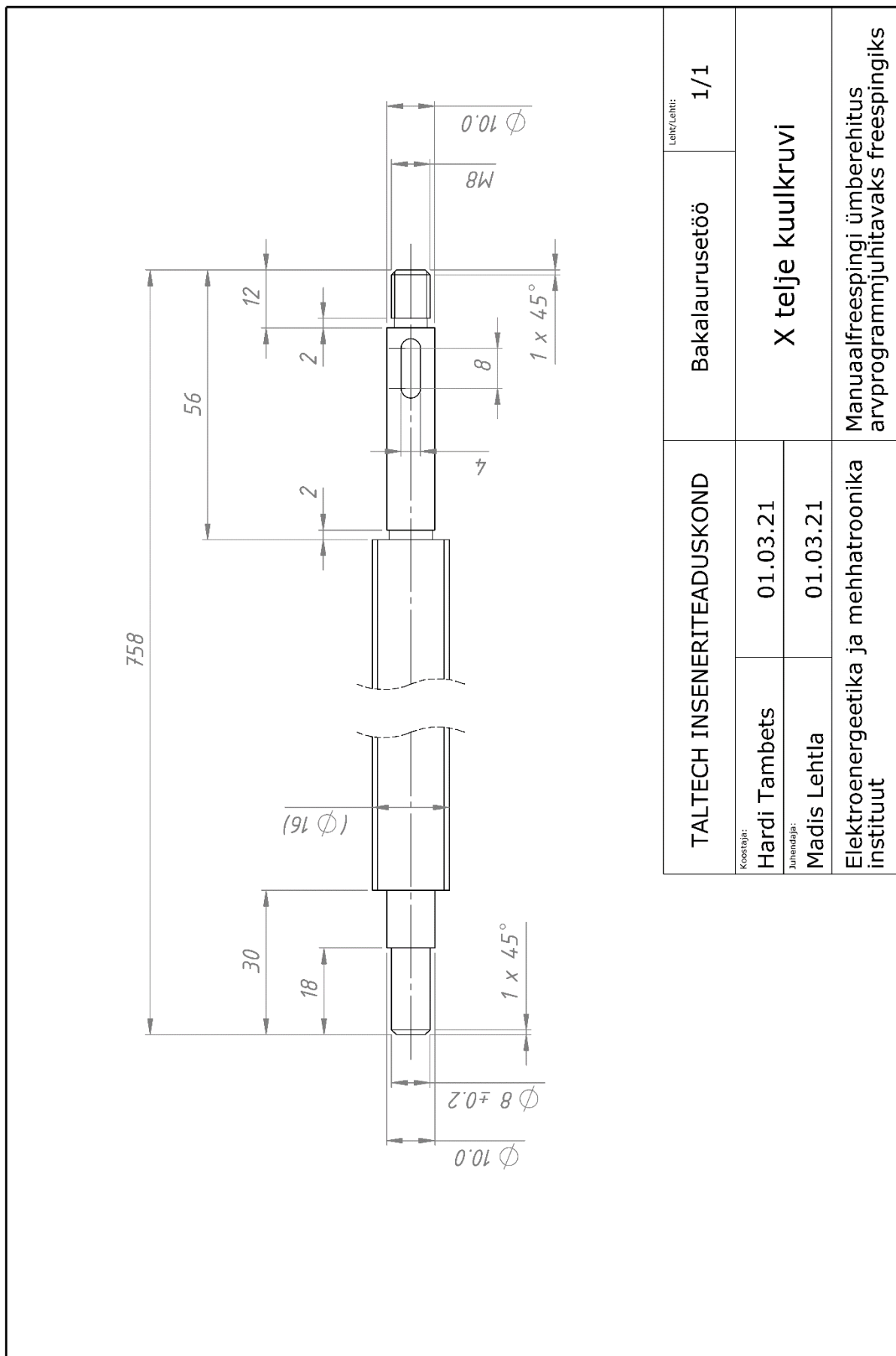
- [1] Dassault Systems, „Solidworks,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.solidworks.com/>. [Kasutatud 22. 04. 2021].
- [2] Siemens, „NX CAM software,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/cam-software.html>. [Kasutatud 22. 04. 2021].
- [3] CNC Cookbook, „CNC controller: software, drivers, & boards,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.cnccookbook.com/cnc-controller-software-drivers-boards/>. [Kasutatud 21. 04. 2021].
- [4] Industry Arena, „CNC zone,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.cnczone.com/forums/>. [Kasutatud 23. 04. 2021].
- [5] Practical Machinist, „Practical Machinist,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.practicalmachinist.com/vb/cnc-machining/>. [Kasutatud 23. 04. 2021].
- [6] Siemens, „CNC-Systems,“ Siemens, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/cnc-sinumerik/automation-systems.html>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [7] Mitsubishi electric, „CNC,“ Mitsubishi, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/cnt/cnc/items/cnc/index.html>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [8] S. K. Jeon, „grbl,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://github.com/grbl/grbl>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [9] Falshcut CNC, „Falshcut CNC,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.flashcutcnc.com/>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [10] Tormach Inc., „Pathpilot CNC controller,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://tormach.com/pathpilot-cnc-controller>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [11] Wincnc, „WinCNC,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.wincnc.net/>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [12] Centroid, „Acorn cnc controller,“ Centroid, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.centroidcnc.com/centroid_diy/acorn_cnc_controller.html. [Kasutatud 29. 02. 2021].
- [13] Centroid, „CNC12,“ Centroid, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.centroidcnc.com/centroid_diy/centroid_cnc_software_downloads.html. [Kasutatud 12. 04. 2021].
- [14] Newfangled Solutions, „Machsupport,“ Newfangled Solutions, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.machsupport.com/>. [Kasutatud 29. 03. 2021].
- [15] Build Your CNC, „Mach3 USB interface board,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.buildyourcnc.com/item/electronicsAndMotors-electronic-component-breakout-Mach3-USB-Board>. [Kasutatud 05. 04. 2021].
- [16] Warp9 Tech Design, „SmoothStepper Product Details Page,“ Warp9 Tech Design, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://warp9td.com/index.php/products>. [Kasutatud 05. 04. 2021].
- [17] Newfangled Solutions, „Mach3,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2018/11/mach3-hobby-engineering-software-cnc-cad-cam-design-newfangled.jpg>. [Kasutatud 12. 04. 2021].
- [18] Hind Technology Australia PTY LTD, „Masso,“ Hind Technology Australia PTY LTD, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.massoc.com.au/>. [Kasutatud 05. 04. 2021].

- [19] Masso CNC, „CNC lathe controller (Masso G3),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.massocnc.com.au/product/cnc-lathe-controller-masso-g3/>. [Kasutatud 12. 04. 2021].
- [20] Linux CNC, „Linux CNC,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://linuxcnc.org/>. [Kasutatud 05. 04. 2021].
- [21] Mesa Electronics, „Mesa anything I/O FPGA cards,“ Mesa Electronics, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.mesanet.com/fpgacardinfo.html>. [Kasutatud 05. 04. 2021].
- [22] Linux CNC, „GMOCCAPY,“ 11. 05. 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://linuxcnc.org/docs/ja/html/gui/gmoccapy.html>. [Kasutatud 27. 04. 2021].
- [23] LLC Mesa Electronics, „Anything I/O FPGA cards,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://store.mesanet.com/index.php?route=product/category&path=83_85. [Kasutatud 22. 04. 2021].
- [24] Optimum Maschinen Germany GmbH, Operating manual - GB Drilling-milling machine OPTImill BF20L, 2015.
- [25] Rob, „Optimum bf20,“ GrabCAD, 16. 08. 2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://grabcad.com/library/optimum-bf20-1>. [Kasutatud 08. 04. 2021].
- [26] D. Collins, „How to calculate motor drive torque for ball screws,“ Linear Motion Tips, 18. 05. 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.linearmotiontips.com/calculate-motor-drive-torque-ball-screws/>. [Kasutatud 22. 03. 2021].
- [27] THK, „tech.thk.com,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://tech.thk.com/en/products/pdf/en_b15_006.pdf. [Kasutatud 21. 03. 2021].
- [28] X. Y. M. L. G. G. Baohai Wu, „Cutting force prediction for circular end milling process,“ *Chinese Journal of Aeronautics*, kd. 26, nr 4, 2013.
- [29] The Engineering ToolBox, „Friction and Friction Coefficients,“ 2004. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html. [Kasutatud 21. 03. 2021].
- [30] Leadshine Motion Technology, „Leadshine,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.leadshine.com/UploadFile/Down/ES-Md_V1.4.pdf. [Kasutatud 21. 03. 2021].
- [31] SBC Linear Co., Ltd, „SDK,“ SBC Linear, [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.sbclinear.co.kr/en/products/sdk_en/. [Kasutatud 08. 04. 2021].
- [32] Leadshine Technology Co., Ltd, „Closed Loop Stepper Products,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.leadshine.com/category.aspx?type=products&category=closed-loop-steppers>. [Kasutatud 12. 04. 2021].
- [33] Leadshine Technologies Co., Ltd, „Software Manual of the Easy Servo Drives,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.leadshine.com/UploadFile/Down/ES-Dsm_V1.0.pdf. [Kasutatud 12. 04. 2021].
- [34] Zaber Technologies, „Microstepping tutorial,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.zaber.com/w/Microstepping_Tutorial. [Kasutatud 23. 04. 2021].
- [35] Graetech, „Electrical cabinet design,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.graetech.com/index_files/Page473.htm. [Kasutatud 20. 04. 2021].
- [36] Practical Renaissance, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://practicalrenaissance.com/2017/07/25/cnc-g0704-milling-machine-the-video/>. [Kasutatud 20. 04. 2021].
- [37] Geckodrive, Inc, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.geckodrive.com/support/step-motor-basics/power-supply-basics.html>. [Kasutatud 20. 04. 2021].
- [38] Meanwell, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.meanwell.com/>. [Kasutatud 20. 04. 2021].

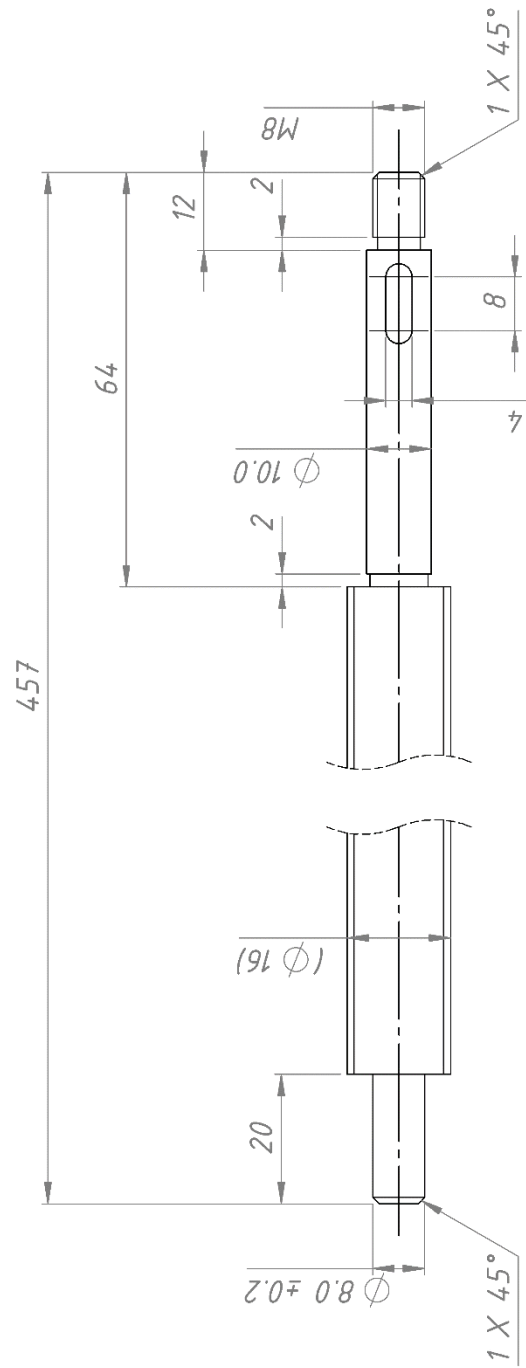
- [39] N. Miller, „Grease setup,” 2016.
- [40] Centroid, „Centroid cnc tech bulletin,” 22. 01. 2002. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.centroidcnc.com/dealersupport/tech_bulletins/uploads/48.pdf. [Kasutatud 21. 04. 2021].
- [41] AutoHotkey Foundation LLC, „AutoHotkey,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autohotkey.com/>. [Kasutatud 22. 04. 2021].
- [42] CNC Software, Inc., „MasterCAM,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mastercam.com/>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [43] Autodesk Inc, „Fusion 360,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [44] Dassault Systems, „Solidworks CAM,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-cam>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [45] BobCAD-CAM, Inc., „BobCAD-CAM,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://bobcad.com/>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [46] Cambrino, „GibbsCAM,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.gibbscam.com/>. [Kasutatud 11. 05. 2021].
- [47] Performance Production Services, „Fogbuster,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://fogbuster.com/>. [Kasutatud 23. 04. 2021].
- [48] Noga Engineering & Technology LTD, „Noga minicool,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.noga.com/Products/moco/Minicool>. [Kasutatud 23. 04. 2021].

LISAD

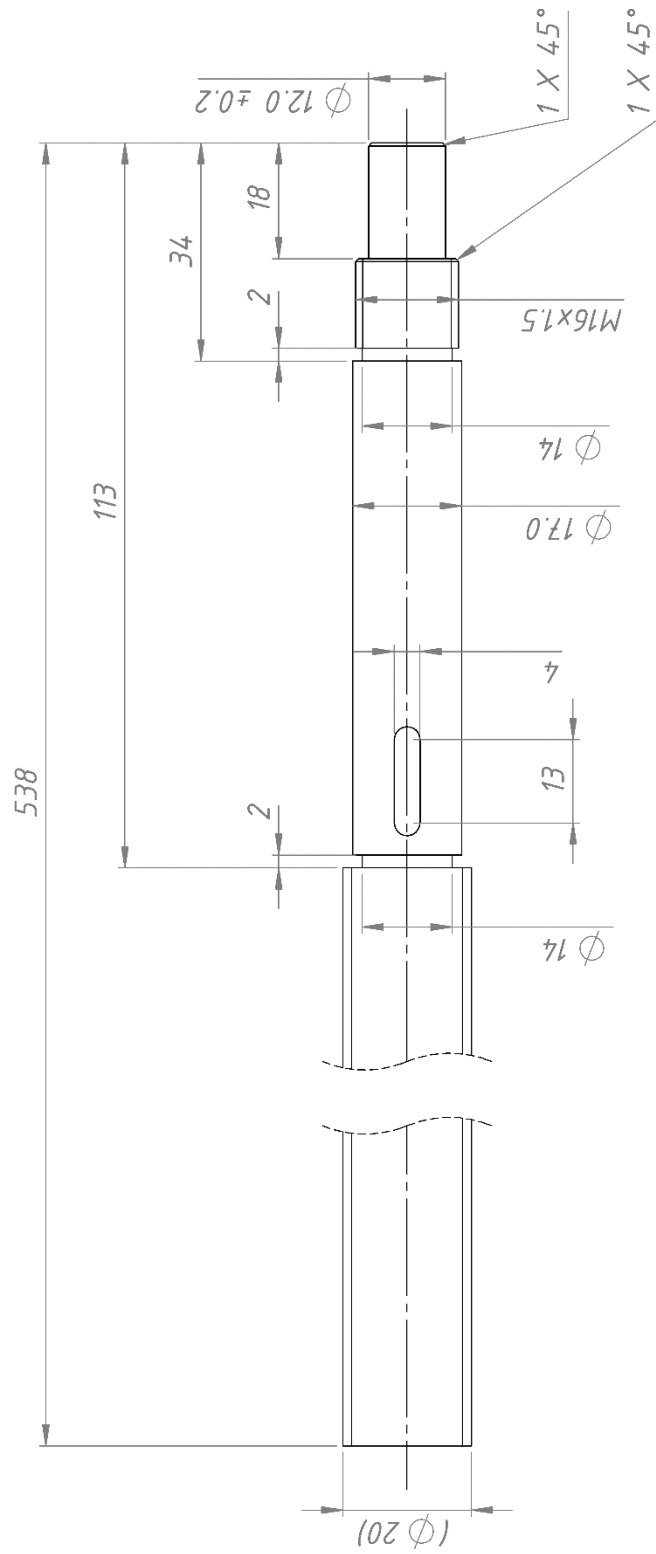
Lisa 1. Käigukruvide tööjoonised



TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaurusetöö	Leht/lehti: 1/1
Koostaja: Hardi Tambets	01.03.21	X telje kuulkruvi	
Juhendaja: Madis Lehtla	01.03.21		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Manuaalfreesingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freesingiks	



TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaurusetöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Hardi Tambets	01.03.21	Y telje kuulkruvi	
Juhendaja: Madis Lehtla	01.03.21		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Manuaalfreesingij ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freesingiks	



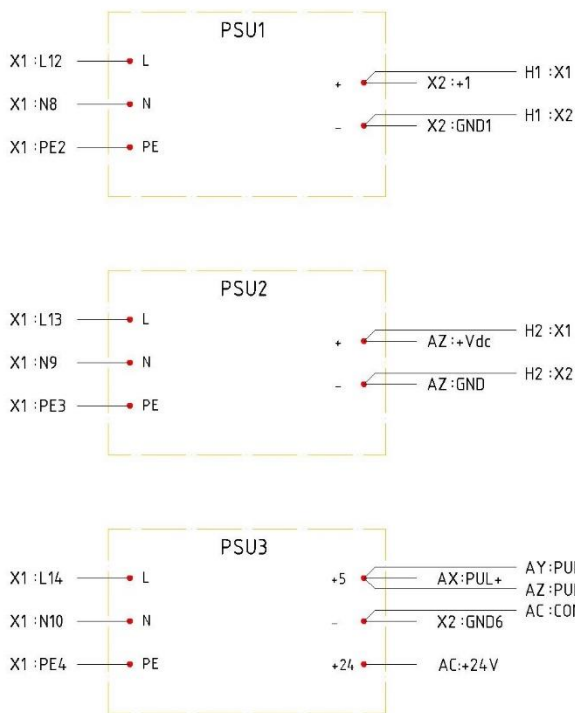
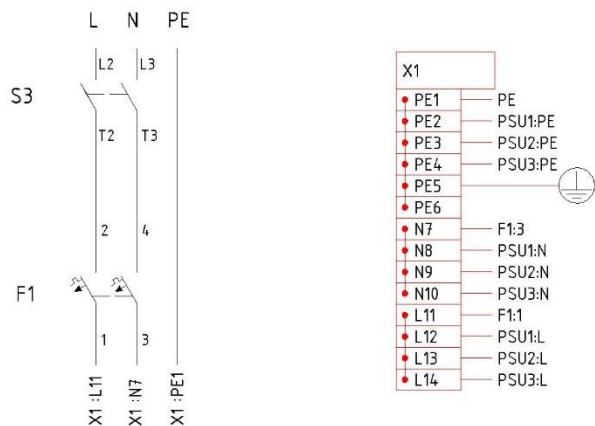
TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaurusetöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja: Hardi Tambets	01.03.21	Z telje kuulkruvi	
Juhendaja: Madis Lehtla	01.03.21		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Manuaalfreesingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freesingsiks	

Lisa 2. Elektrikilbi montaažiskeemid

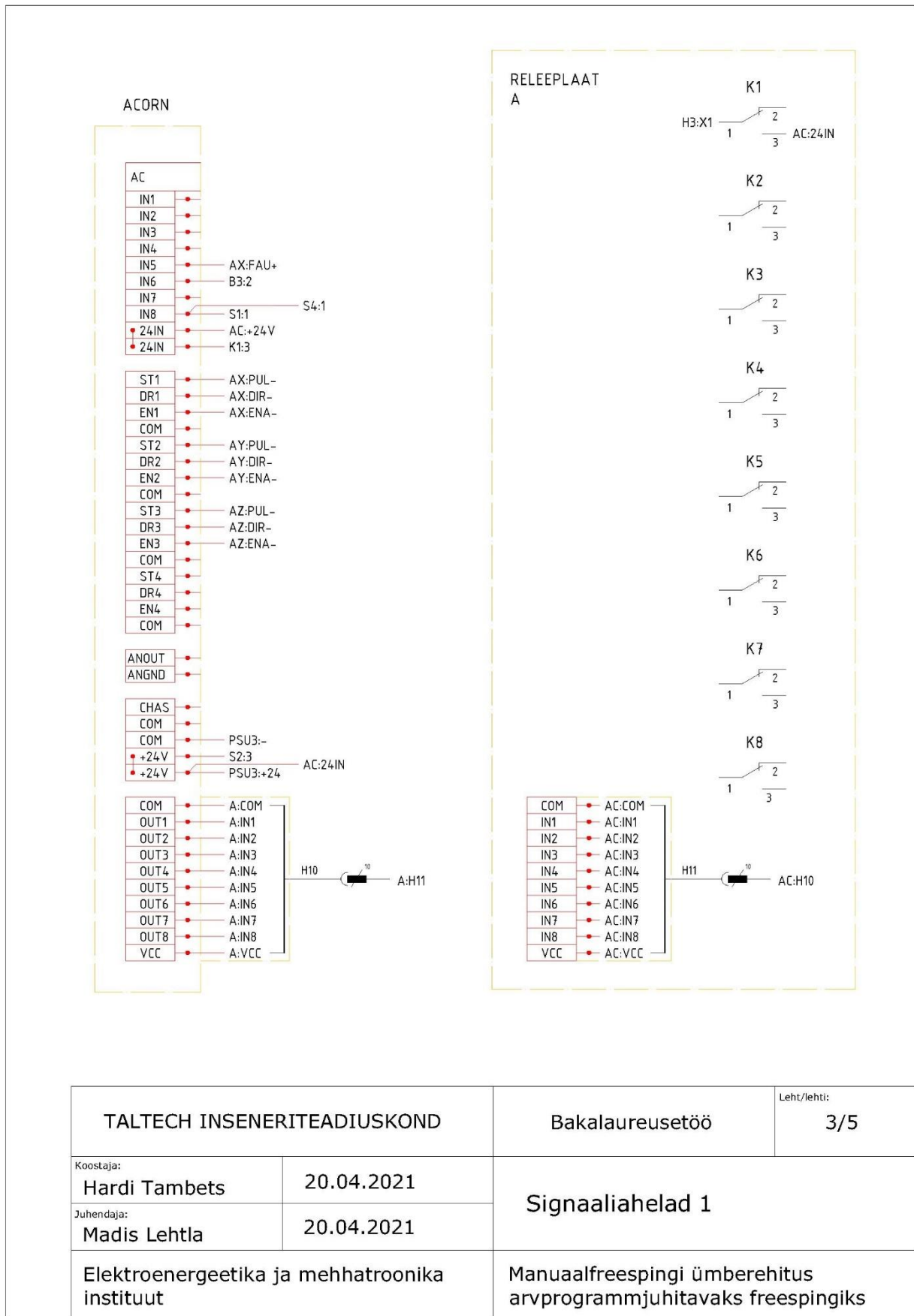
SKEEMIDEL KASUTATUD TÄHISED			
1	DETAIL	KIRJELDUS	LEHT
2	A	Releelaat 8 releega	3
3	AC	Centroid Acorn CNC juhtplaat	3
4	AS	Originaalne freesi spindli elektroonika	5
5	AX	X telje draiver	4
6	AY	Y telje draiver	4
7	AZ	Z telje draiver	4
8	B1	X telje lõpulüliti	5
9	B2	Y telje lõpulüliti	5
10	B3	Z telje lõpulüliti	5
11	FAN1	Siseneva õhu ventilaator	5
12	FAN2	Väljuva õhu ventilaator	5
13	H1	PSU1 indikaatorlamp, roheline	5
14	H2	PSU2 indikaatorlamp, roheline	5
15	H3	Vea indikaatorlamp, punane	5
16	MX	X telje mootor	5
17	MY	Y telje mootor	5
18	MZ	Z telje mootor	5
19	PSU1	X ja Y telje 48V toiteplokk	2
20	PSU2	Z telje 48V toiteplokk	2
21	PSU3	24V ja 5V toiteplokk	2
22	S1	Hädastopp	5
23	S2	Ventilaatorite lüliti	5
24	S3	Pealüliti	2
25	S4	Hädastopp	5
26	X1	Vahelduvvoolu klemmiist	2
27	X2	Alalisvoolu klemmiist	4

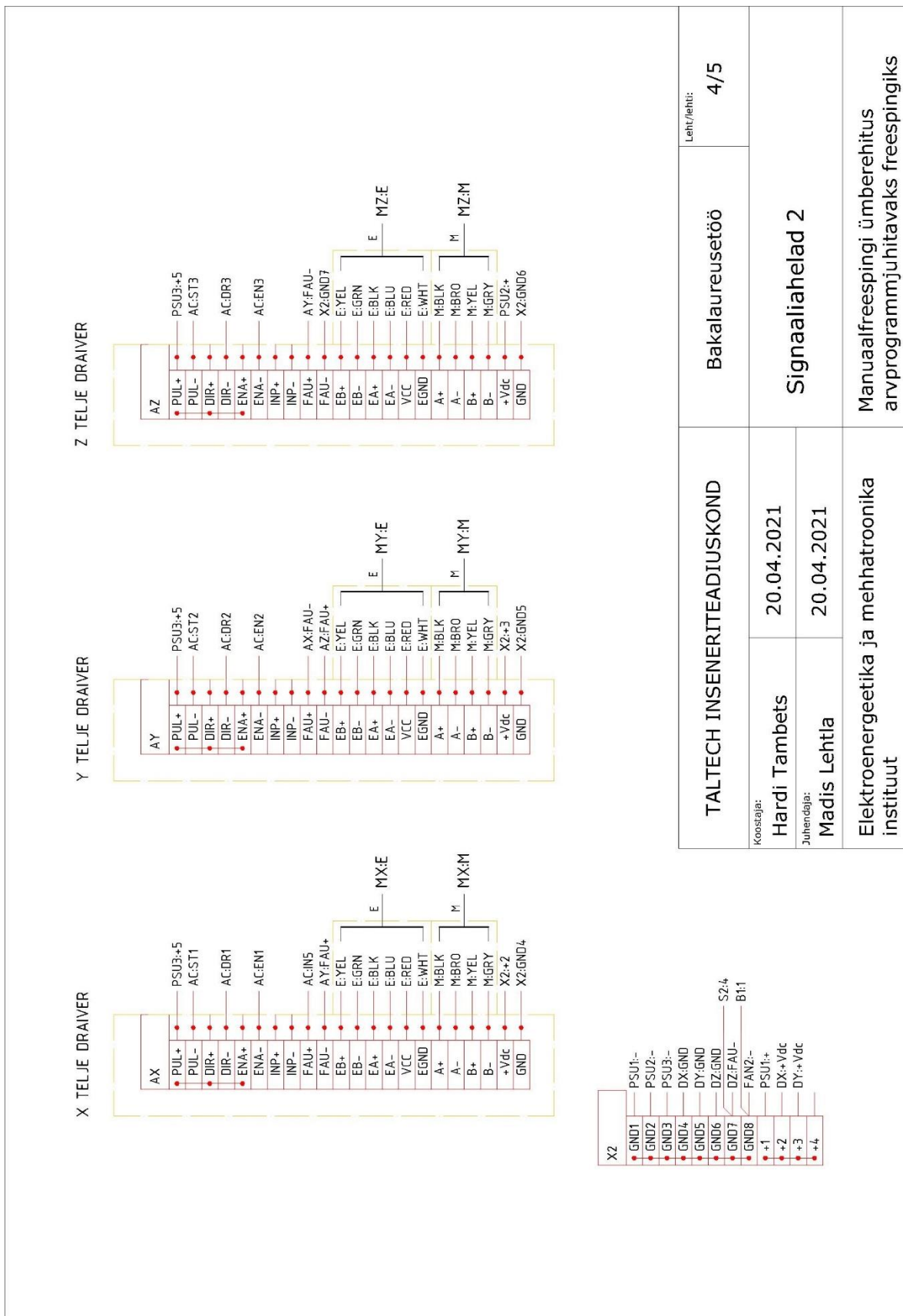
TALTECH INSENERITEADIUSKOND Koostaja: Hardi Tambets 20.04.2021 Juhendaja: Madis Lehtla 20.04.2021 Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	Bakalaureusetöö Sisukord Manuaalfreespingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freespingiks	Leht/lehti: 1/5
--	--	---------------------------

230 V 50 Hz, pistik

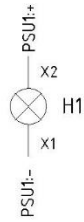


TALTECH INSENERITEADIUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/lehti: 2/5
Koostaja: Hardi Tambets	20.04.2021	Toiteahelad	
Juhendaja: Madis Lehtla	20.04.2021		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Manuaalfreespingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freespingiks	

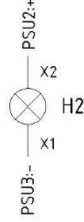




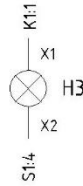
PSU1 TULI



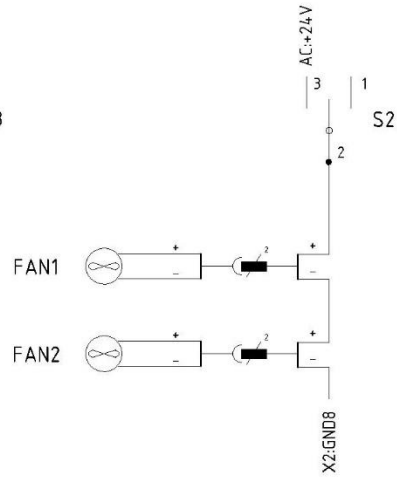
PSU2 TULI



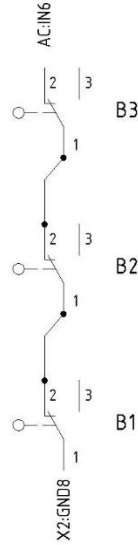
VIGA



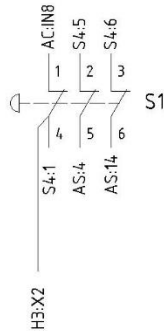
VENTILAATORI LÜLITI



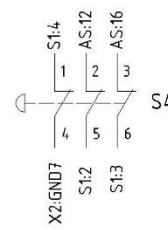
KODUPOSITSIOONI
LÕPULÜLITID



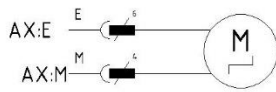
HÄDASTOPP 1



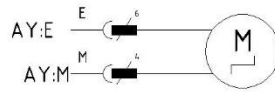
HÄDASTOPP 2



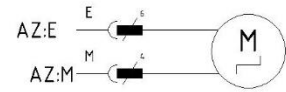
X telje mootor
MX



Y telje mootor
MY



Z telje mootor
MZ



TALTECH INSENERITEADIUSKOND		Bakalaureusetöö	Leht/lehti: 5/5
Koostaja: Hardi Tambets	20.04.2021	Signaaliahelad 3	
Juhendaja: Madis Lehtla	20.04.2021		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Manuaalfreespingi ümberehitus arvprogrammjuhitavaks freespingiks	