



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut  
Mehhatroonikasüsteemide õppetool

MHE40LT

*Kaarel Koppel*

**3D PRINTIMISRAKENDUS TÖÖSTUSLIKULE  
KARTEESIANROBOTILE**  
BSc Lõputöö

Autor taotleb  
tehnikateaduse bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2016

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotlenud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Ahti Põlderi juhendamisel.

„.....“ ..... 2016 a.

Töö autor Kaarel Koppel

..... allkiri

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

„.....“ ..... 2016 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees.

„.....“ ..... 2016 a.

..... allkiri

## **BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE**

2016. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Kaarel Koppel, 121132

Õppekava: MAHB02/09

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: Nooremteadur, Ahti Põlder

Konsultandid: -

### **BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:**

3D printimiskrakendus tööstuslikule karteesianrobotile

3D printing application for an industrial Cartesian robot

**Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Olemasoleva süsteemiga tutvumine, täiendusvõimaluste uurimine.	21.03.16
2.	Hirata HAC-644 kontrolleri programmeerimine ja juhtprogrammi koostamine LabView keskkonnas	31.03.16
3.	Olemasoleva kaabelduse täiendamine, lihtne väline kasutajaliides, NI USB DAQ mooduli ja kalibratsioonanduri lisamine.	30.04.16
4.	Projekteerida universaalrakis roboti tööorganile ja testotstarbeline markerihoidja. Süsteemi testimine.	7.05.16
5.	Töö lõplik vormistamine, trükkimine ja köitmine.	15.05.16

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** LabView juhtarkvara ja G-koodi interpretaatori koostamine, liidestamine vabavaralise 3D printeri tarkvaraga, HAC-644 kontrolleri programmeerimine, digitaal, analoog, USB ja andurite sisendite/väljundite lisamine roboti suunistusmehhanismile, universaalrakise ja markerihoidja mehaanika projekteerimine.

**Täiendavad märkused ja nõuded:** -

**Töö keel:** eesti

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 16.05.2016

**Töö esitamise tähtaeg** 20.05.16

Üliõpilane Kaarel Koppel

/allkiri/ .....

kuupäev.....

Juhendaja Ahti Põlder

/allkiri/ .....

kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

EESSÕNA.....	6
<b>1. SISSEJUHATUS .....</b>	<b>7</b>
<b>2. ÜLEVAADE HARL-III PROGRAMMEERIMISKEELEST, HIRATA KONTROLLERIST JA MANIPULAATORIST .....</b>	<b>9</b>
2.1 HARL-III.....	9
2.2 Hirata manipulaator .....	9
2.3 Kontroller.....	11
2.3.1 Kontrolleri olemasolevad sisend ja väljund ahelad.....	12
2.3.2 Kaitsme purunemine ja vahetamine .....	14
2.3.3 Hädastopp.....	14
<b>3. LAHENDUSE ÜLEVAADE.....</b>	<b>15</b>
<b>4. SÜSTEEMI JUHTIV TARKVARA .....</b>	<b>17</b>
4.1 Süsteemi juhtiva tarkvara ülevaade .....	17
4.2 <i>Sliceri</i> valik.....	17
4.3 Andmeside .....	18
4.4 LabView programm ja selle alamstruktuurid .....	19
4.4.1 Olekumasin.....	19
4.4.2 Tootja-Tarbija mudel.....	20
4.4.3 <i>Serial Write</i> .....	21
4.4.4 <i>Serial Read</i> .....	22
4.4.5 <i>Connect to Hirata</i> .....	22
4.4.6 Graafiline käsupaneel .....	23
4.4.7 Tekstipõhised käsud .....	24
4.4.8 Roboti positsiooni küsimine ja kalibreerimine.....	25
4.5 Kontrolleri tarkvara .....	25
4.5.1 Tarkvara komponendid .....	25
4.5.2 Juhtimisalgoritm.....	27
4.5.3 Job “Jadaport” .....	28
4.5.4 Job “Protsessor” .....	28
4.5.5 Job “MP” .....	30
<b>5. ELEKTROONIKA.....</b>	<b>31</b>

5.1	Mehaaniline kasutajaliides .....	31
5.2	Roboti manipulaatori kaabelduse täiendus .....	33
<b>6.</b>	<b>MEHAANIKA .....</b>	<b>36</b>
6.1	Roboti tööriistarakise projekteerimine ja valmistamine .....	36
6.2	Markerihoidja .....	37
6.3	Kalibreerimismoodul .....	39
6.3.1	Teoreetiline mudel.....	39
6.3.2	Valmistatud kalibreerimismoodul .....	41
6.4	Mehaanikakomponentide valmistustehnoloogia .....	42
<b>7.</b>	<b>SÜSTEEMI OHUTUS .....</b>	<b>44</b>
<b>8.</b>	<b>SÜSTEEMI KATSETAMINE .....</b>	<b>45</b>
8.1	Ülevaade .....	45
8.2	LabView juhttarkvara, G-koodi interpretaator, liidestus vabavaralise 3D printeri tarkvaraga .....	45
8.3	Täiendatud kaabeldus, väline kasutajaliides, NI USB DAQ moodul .....	46
8.4	Kalibratsioonimoodul .....	47
8.4.1	Kalibreerimissondi täpsuse hindamine.....	47
8.4.2	Kalibreerimisalgoritmi katsetamine .....	47
	<b>KOKKUVÕTE .....</b>	<b>49</b>
	<b>SUMMARY.....</b>	<b>50</b>
	<b>KASUTATUD KIRJANDUS .....</b>	<b>51</b>
	<b>LISAD.....</b>	<b>53</b>
	LISA 1 Kasutajaliidese sisemise skeemi sele. ....	53
	LISA 2 Ühenduskaabli skeemi sele .....	54
	LISA 3 Mehaanilise kasutajaliidese sele.....	55
	LISA 4 Kalibreerimismooduli sele .....	56
	LISA 5 Tööriistarakise sele.....	57
	LISA 6 Markerpliitsi kinnituse sele .....	58
	LISA 7 Tööga kaasasoleval andmekandjal olevate failide tabel.....	59
	LISA 8 LabView kasutajaliidese esipaneel.....	60

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on välja pakutud Tallinna Tehnikaülikooli Mehhatroonikainstituudi poolt. Töö koostamisel olen silmas pidanud Mehhatroonikainstituudi poolseid nõudeid ja soovitusi seoses 3D printimisrakenduse teostusega.

Töö on kirjutatud Tallinna Tehnikaülikooli Mehhatroonikainstituudis Ahti Põlderit juhendamisel.

# 1. SISSEJUHATUS

Töö teema tekkis Mehhatroonikainstituudi soovist luua olemasoleva Hirata manipulaatori ja kontrolleri baasil universaalne süsteem, mida oleks võimalik kasutada täpset liikumist nõudvate rakenduste prototüüpimisel. Üheks peamiseks rakenduslikuks perspektiiviks on suuremõtmeline 3D printimine, millest tulenes ka töö teema: Hirata telgede liikumisulatus on võrreldes tüüpilise hobikasutajale mõeldud 3D printeriga (näiteks Makerbot Replicator [2] ja Prusa i3 [3]) palju suurem: 1500\*700\*200 mm ning omab täiendavat vabadusastet – tööriistakinnituse pööramine ümber Z telje kuni 540 kraadi (Tabel 2.1).

Lisaks väikesele liikumisulatusale on hobikasutuseks mõeldud lahenduste puuduseks võimekus printida vaid piiratud hulka materjale (tüüpiliselt termoplasti). Tööstuslikud ja suuremaid võimalusi pakkuvad süsteemid on aga liiga kallid ning keerukad, et olla peamiselt prototüüpimiseks ette nähtud süsteemi jaoks sobilikud. Sellest tulenebki töö majanduslik otstarbekus, mis on põhjendatud TTÜ Mehhatroonikainstituudis juba olemasoleva Hirata manipulaatori ja kontrolleri täiustamisega uue süsteemi ostmise asemel, luues universaalse lahenduse, mis lisaks 3D printimise rakendusele oleks kergelt ümber kohandatav ka teistele eesmärkidele nagu näiteks materjali markeerimine või objektide paigutamine ruumis. Töö vabavaral põhinev tarkvarakomponent pakub edasiseks arendustööks palju rohkem võimalusi kui kinnise lähtekoodiga süsteem.

Töö üheks praktiliseks rakenduseks on pakkuda Mehhatroonikainstituudis käesoleva töö kirjutamise ajal TTÜ Mehhatroonikainstituudis Martin Rannamäe poolt teostatavale MSc lõputööle „*Fiberglass pultrusion system for manufacturing spatial structures*” [28] baasplatvorm, millele liidestuks töö käigus loodav klaasfiibri ekstruuder.

Töö koosneb järgnevatest osadest:

- Olemasoleva kontrolleri ja manipulaatori võimaluste ja tööpõhimõttega tutvumine
- Elektroonika sealhulgas roboti sidestamist lihtsustava kasutajaliidese projekteerimine ja valmistamine
- Mehaanikakomponentide projekteerimine ja valmistamine
- Juhtimistarkvara koostamine
- Süsteemi lõplik testimine

Juhtimistarkvara on jaotatud kaheks osaks: arvutipoolne käske saatev kasutajaliides ja kontrolleripoolne käske täitev programm. Kasutajaliides põhineb LabView programmeerimiskeskkonnal ning kontrolleri tarkvara kontrolleri tootja Hirata enda loodud programmeerimiskeelel HARL-3 [4]. Kontrolleri tarkvara loomisel olid lähtepunktina kasutusel „Laisa mehe doomino” projekti [30] poolt koostatud materjalid.

Projekteerimisel on mehaanika osas kasutusel tarkvara SolidWorks [31], elektroonikaskeemid on visandatud TinyCad [29] abil. Süsteemi mehaanilised komponendid valmistati Tallinna Tehnikaülikooli Mehhatroonikainstituudi töökojas.



## **2. ÜLEVAADE HARL-III PROGRAMMEERIMISKEELEST, HIRATA KONTROLLERIST JA MANIPULAATORIST**

### **2.1 HARL-III**

HARL-III puhul on tegu Hirata omaloodud programmeerimiskeelega erinevate robotite ja tootmissüsteemide juhtimiseks. Tootjapoolses dokumentatsioonis on toodud välja järgnevad omadused: Põhineb keelel BASIC, mis on täiustatud sobimaks tööstusautomaatikasse. Saadaolevad võimalused: arvutused, aritmeetilised funktsioonid, mitmed andmetüübid ning tugi erinevate sideprotokollide jaoks. Võimalike veasituatsioonide jaoks on võimalik sisse seada neid käsitlev funktsioon. „\*Onerr”. Täpsem ülevaade HARL III keele võimalustest on saadaval tootjapoolses manuaalis [4].

HARL-III keskkonnas robotile koostatud programm põhineb “Job” struktuuril”. Sisuliselt tähendab see mitut paralleelselt töötavat protsessi. Ühes “Job” alamprogrammis on maksimaalselt 1000 rida koodi. Kõikide alamprogrammide peale kokku võib olla kuni 1500 “labelit”. Üks “Job” võib sisaldada kuni 200 kohalikku muutujat ja kuni 300 globaalset muutujat. Kokku võib olla defineeritud 32 “Job” programmi ning 5000 rida koodi.

HARL-III keele puuduseks või pidada parameetriliste sisenditega funktsioonide jm. objektorienteeritud programmeerimise funktsioonide realiseerimisvõimaluse. Sisuliselt tuleb kõik teostada GOTO-struktuuriga. See muudab koodi raskelt jälgitavaks.

Andmeside põhineb „File” struktuuril. Sisuliselt tähendab see, et „File” puhvrise kirjutatakse/loetakse ridu. Iga sidekanali jaoks on oma „fail” sealhulgas kontrolleri suhtluseks robotiga. „File” saab olla korraga avatud vaid ühe „Job” poolt.

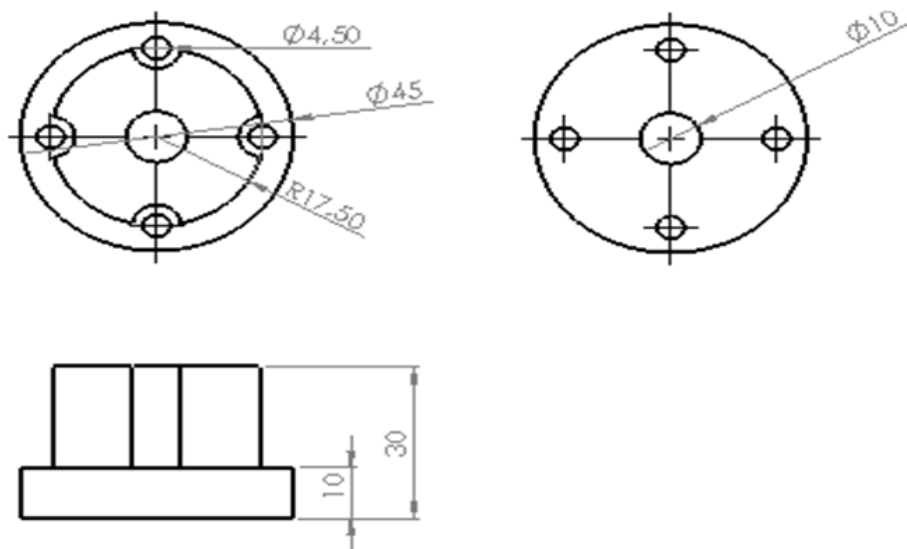
### **2.2 Hirata manipulaator**

Käesolevas töös on kasutusel Hirata CRWQ-H2010AP tüüpi karteesianatelgedel põhinev robotmanipulaator. Manipulaatori tehnilised andmed on ära toodud Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Manipulaatori tehnilised andmed [1]

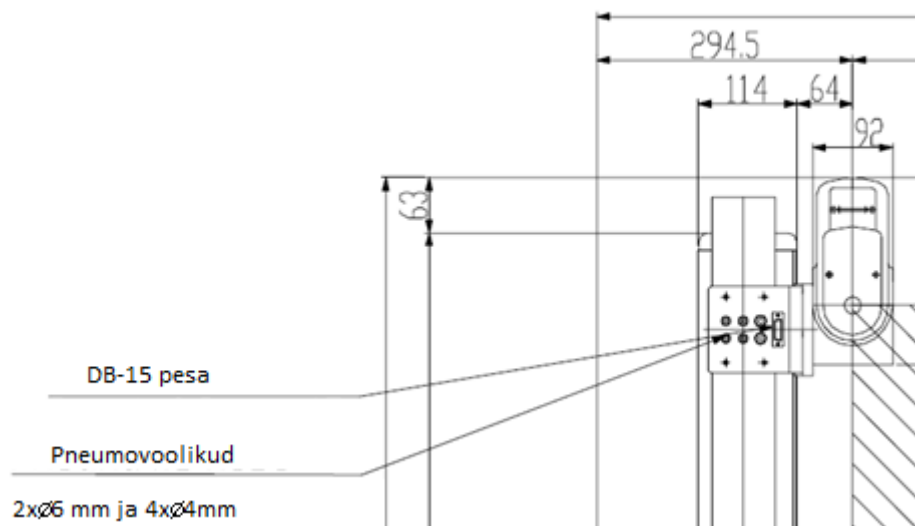
Hirata CRWQ-H2010AP neljateljelise manipulaatori andmed					
Telg	Maksimaalne kasulik kandevõime (kg)	Maksimaalne kiirus (/s)	Liikumisulatus	Liikumise korratavus	Telje tüüp
X	5	1200 mm	1500 mm	±0,02 mm	MB-H204AP
Y			700 mm		MB-102A
Z		1000 mm	200 mm	±0,01 mm	HMW-S270
W		1200°	540°	±0,03°	

Tööriistahoidja projekteerimisel tuleb lähtuda maksimaalsest lubatud kaalust (5 kg) ning W telje külge kinnitatud flantsi mõõtmetest (Sele 2.1).



Sele 2.1 Roboti flants [1]

Tootja poolt on roboti telgedele kinnitatud kaablikett, kus lisaks ajamite toite ja signaalkaablitele on 15 sooneline varjestamata DB-15 kaabel (Sele 2.2), mille väljundpesa asub roboti ZW telgede mooduli küljes.



Sele 2.2. Roboti tehasepoolne kaabeldus. Lisaks DB-15 pesale on joonisel näha ka 6 pneumovoolikut.

Kontrolleri ja manipulaatori standardfunktsioonide kokkuvõttena võib loetleda peamised puudujäägid:

- Analoog sisend- ja väljundsignaalide puudumine.
- Tööriistakinnituseni viiva elektritarvite jaoks toitevoolu edastamiseks sobiva kaabelduse puudumine.
- Puldiga robotile trajektoori õpetamine on kohmakas ja aeganõudev, kuna positsioonid tuleb sisestada käsitsi ja ükshaaval.
- Liikumispositsioonimälu on piiratud ~900 punktiga
- Kontrolleril ja õpetuspuldil puuduvad programmeeritavad väljundindikaatorid ja sisendid.

Eeltoodud puudusi on käesoleva töö raames püütud parandada.

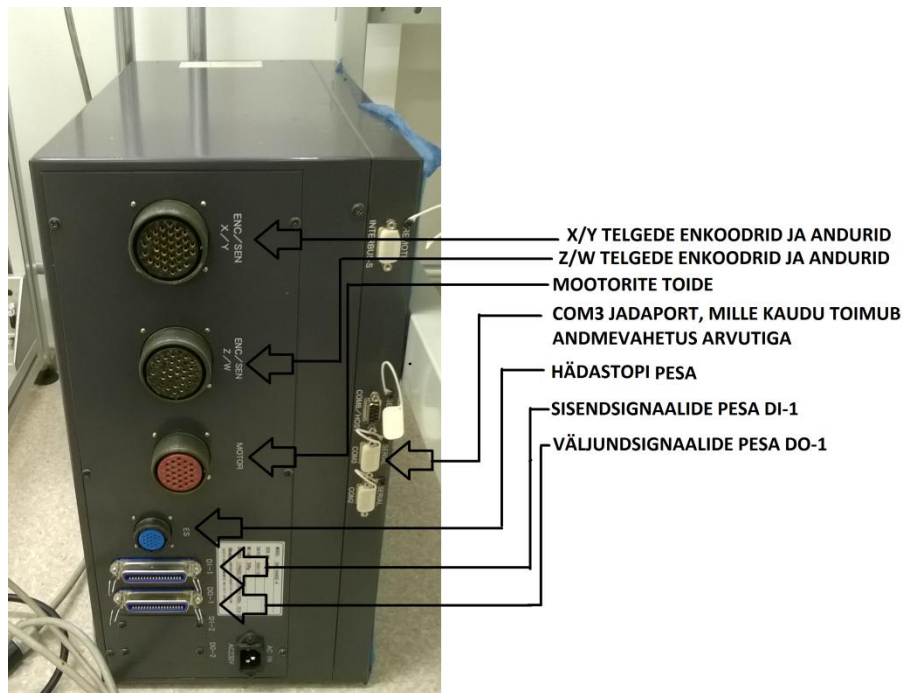
## 2.3 Kontroller

Kontrolleri tüübiks on HAC-644. Seda on võimalik programmeerida HARL-III programmeerimistarkvaraga üle RS-232 jadapordi (programmeerimisport on kontrolleri

esiküljel). Kontrolleriga on kaasas õpetamispult (*Teaching pendant*) ning seda asendav pistik kontrolleri ilma puldita töötamiseks. Lisaks kontrolleri seadistuse muutmisele on õpetamispuldiga võimalik salvestada roboti mällu positsioone ja robotit nende järgi liikuma programmeerida.

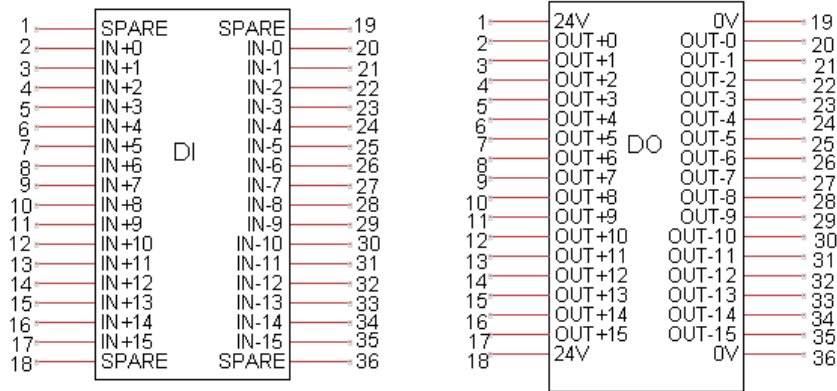
### 2.3.1 Kontrolleri olemasolevad sisend ja väljund ahelad

HAC-644 kontrolleril (Sele 2.3) on olemas sisend ja väljundsignaalide jaoks kaks 36 viigulist pesa (Sele 2.4), mis paiknevad kontrolleri tagaküljel. Nii sisend- kui väljundsignaalid on optopaaride abil kontrollerist lahti sidestatud. Signaalipinge on 24 V.



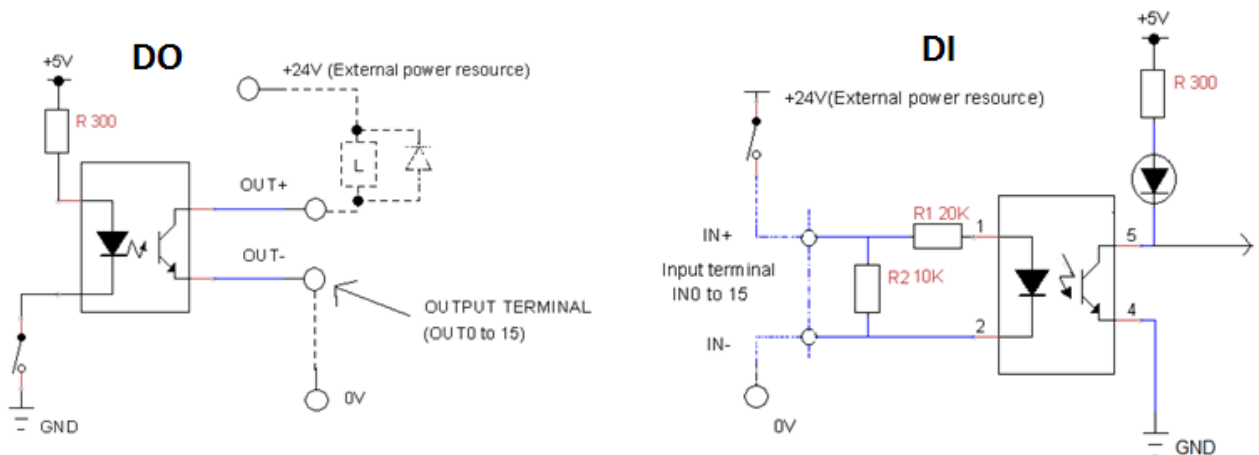
Sele 2.3. HAC-644 kontrolleri tagakülg ja kasutuses olevad väljundid

Lisaks on kontrolleri tagaküljel roboti telgede ajamite enkoodrite sisendid, ajamite toide, hädastopi pistikupesa ja kontrolleri toitepistik (220V AC).



Sele 2.4. DI ja DO pesade väljundviikude funktsioonid ja nummerdus [1]

Nii DI kui DO pesade terminalid on kontrollerrist optiliselt isoleeritud (Sele 2.5). Ühte DO terminali läbiva voolu maksimaalne lubatud suurus on 50mA. Seda suurust tuleb arvestada robotile väliseid rakendusi ühendades. Lisaks on DO pesast saada kontrolleri sisemine 24 V toiteahel, mis on ühendatud jadamis kiirsulava kaitsmega nimivooluga 2 A.



Sele 2.5. DO ja DI väljundviikude optilise lahtisidestatuse skeem ning rakendusega ühendamise näide [1]

Kuna käesolevas töös on plaanis kasutada kontrolleri sisemist 24 V ahelat, mis on ühine nii sisend kui väljundsignaalide jaoks, signaalide toiteks, siis on otstarbekas välja arvutada sisendsignaali maksimaalne voolutarve ahela toitepinge  $V=24\text{ V}$  ja Optroni diodi pingelang  $V_o = \sim 1.5\text{ V}$ .  $I_{üks\ sisend} = V/R_2 + (V - V_o)/R_1 = 24/10000 + (24 - 1,5)/20000 = \sim 3,5\text{ mA}$  ja sisendite koguarv  $n=15$ , seega  $I_{max} = n * I_{üks\ sisend} = 15 * 3,5 = \sim \mathbf{53\text{ mA}}$

Selgub, et isegi kui kõik sisendsignaalid on korraga aktiivsed, on nende poolt tarbitav koguvool tühine ning sellega edaspidi arvestama ei pea. Ühe väljundsignaali maksimaalne lubatav vool on 50 mA [1]

### **2.3.2 Kaitsme purunemine ja vahetamine**

24 V ahela lubatud voolutarbe ületamisel (põhjustatud nt. veast väljundite ühendamisel) sulab selle kaitse ning hädastopprežiim muutub pidevalt aktiivseks. Lisaks annab kontrolleri õpetamispult (Teaching Pendant) veateate "DRIVER ERROR". Kui selline olukord on tekkinud, tuleb purunenud kaitse välja vahetada. Kaitsmete peab läbi roboti esipaneelilt. Eelkirjeldatud probleemi põhjust otsides õnnestus töö käigus taastada ka teise Hirata kontrolleri töövõime, millel oli eelmisest projektist 24 V kaitse läbi põlenud.

### **2.3.3 Hädastopp**

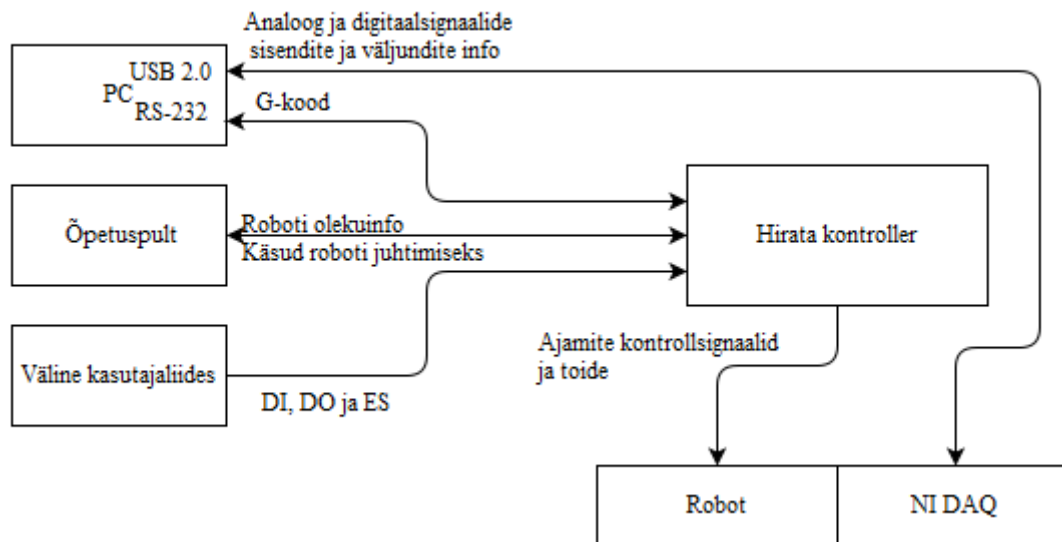
Hädastopi ahela deaktiveerimiseks ja roboti liikumise võimaldamiseks peavad hädastopipesas olema omavahel ühendatud viigud 1-2 ja 3-4. Seda võib teha välise hädastopplülitiga või otse pesas. Ühendatud olekus jookseb ahelas 40 mA vool. Selles töös on see vool kasutusel hädastopi LED indikaatori toitenähtena.

### 3. LAHENDUSE ÜLEVAADE

Töö eesmärgiks on luua seotud süsteem arvuti, kasutajaliidese, kontrolleri ja roboti vahel (Sele 3.1). Lihtsustamaks roboti sidestamist väliste seadmetega on töö raames kontrolleri loodud väline kasutajaliides, mis lihtsustab ligipääsu kontrolleri sisend-väljundsignaalidele ning lisab hädastoppnupu ja seda valikuliselt täiendatava ahela. Välist kasutajaliidest ühendab kontrolleri spetsiaalne kaabel. Manipulaatori funktsionaalsust on uuendatud seadmete kinnitamist lihtsustava tööriistakinnituse projekteerimisega, kaabelduse täiendamisega (lisatud on 2 paari toitekaableid, 2 paari USB kaableid) ning signaalitöötlusvõimekuse parandamisega (manipulaatori Z telje külge on lisatud National Instrumenti poolt valmistatud analoogsignaali lugemist võimaldav plokk).

Manipulaatorile on projekteeritud uus tööriistakinnitus, mis oma suuremate mõõtmete, parema ligipääsetavuse ja võimalusega kinnitada tööriistu ka vertikaaltasapinnas lihtsustab edaspidiste rakenduste projekteerimist. Roboti algoritmide demonstreerimiseks on töö käigus valmistatud tööriistakinnitusega ühilduv markerpliatsi hoidja.

Tarkvaraline pool põhineb prinditavast 3D mudelist “*slicer*” tarkvara abil loodud G-koodi teisendamisel kontrolleri arusaadavateks instruktsioonideks. G-koodi sisaldav fail tuleb avada selle töö raames LabView programmeerimiskeskonnas loodud kasutajaliideses, kus sellele teostatakse esialgne töötlus (kommentaaride, liigsete tühikute ja tühjade ridade eemaldamine). Töödeldud G-kood saadetakse üle jadapordi (RS-232) Hirata kontrolleri, kus G-kood muudetakse HARL-3 (Hirata programmeerimiskeskond) abil manipulaatorile sobivateks instruktsioonideks. Lisaks on LabView programmist robotile võimalik saata G-koodi käsk – nii nappudel põhinevast kasutajaliidestest kui ka kirjutatud G-koodi.



Sele 3.1. Süsteemi funktsioonidiagramm

Lihtsustamaks süsteemi ülesseadmist ja vältimaks vajadust roboti tööpinna täppispaigutuseks, on töö raames loodud meetod tööpinna kalibreerimiseks. Selles töös on kalibratsioon vaid lihtne tööpinna tasandi arvutus kolme punkti järgi. Kalibreerimiseks on kaks võimalust – roboti manuaalne liigutamine töötasandi puutepunktidesse ja seejärel hetkeasukoha salvestamine või automaatne Z-telje kompamine kalibreerimismooduliga (nõuab välise toiteploki olemasolu)

Loodud süsteemi edasiseks arengusuunaks võib pidada tööpinna kuju kaardistamist mitmete punktmõõtmiste teostamisega, et saada tööpinna täpne topograafia. Selline lahendus võimaldaks printimist ka kumerpindadele.



## 4. SÜSTEEMI JUHTIV TARKVARA

### 4.1 Süsteemi juhtiva tarkvara ülevaade

Süsteemi juhtiva tarkvara peamiseks ülesandeks on teisendada arvutis olev G-kood manipulaatorile arusaadavateks instruktsioonideks. Kasutajaliides, G-koodi esialgne töötlus, roboti liikumisrežiimi seadmine, andmete saatmine jt. vajalikud funktsioonid on teostatud tarkvaras LabView, kuna see sisaldab suurel hulgal sissehitatud rakendusi jadapordi ühenduse jm. funktsioonide jaoks. Roboti kontroller on programmeeritud Hirata tootjapoolse HARL-3 tarkvara abil. Süsteemi juhtiv tarkvara koosneb kahest osast: LabView kasutajaliidest ja kontrolleri programmist, mis omavahel üle jadapordi suhtlevad.

### 4.2 Sliceri valik

Et midagi printida, on vaja esmalt valida tarkvara, mis teisendab printitava objekti 3D mudeli masina poolt tõlgendatavaks G-koodiks ehk *slicerit*. Saadaval on mitmeid variante – nii vabavaralisi kui tasulisi (Tabel 4.1). Antud ülesande lahendamisel püstitati nõue, et kasutatav *slicer* peab olema vabaaraline ja avatud lähtekoodiga.

Tabel 4.1. *Slicer* tarkvarade võrdlus

Tarkvara	Tasuta	Avatud lähtekood	Toetatud 3D mudelifailide formaadid	Ühenduvus	Muud omadused
Cura [5]	jah	jah	.STL,.OBJ, .DAE,.AMF	Mälukaart	Saadaval on suur hulk tarkvara plugine
Repetier [6]	jah	ei	.STL, .OBJ, .3DS	USB, Serial, Internet, Mälukaart	Toetab otse G-koodi saatmist arvutist printerisse.
Slic3r [7]	jah	jah	.STL, .AMF, .OBJ	Mälukaart	-
Mattercontrol [8]	jah	jah	.STL,.AMF	USB, Serial, Mälukaart	Võimalus SMS/Email teavitusest printimise lõpetamisest

Selles töö teostamisel kasutati G-koodi genereerimiseks Cura tarkvara, peamiselt selle lihtsuse poolest: lahenduse kiireks prototüüpimiseks vajalikud seaded (kiirus, ekstruuderi läbimõõt) on hõlpsalt ligipääsetavad ning koodis ei sisaldu liialt üleliigseid spetsiifilistele printeritele omaseid funktsioone, mida käesoleva töö eesmärkideks vaja ei lähe.

### 4.3 Andmeside

Pärast *sliceriga* G-koodi genereerimist on see vaja edastada kontrolleriile. Andmeside kontrolleriiga toimub üle jadapordi, LabView kasutajaliideses valitud arvuti COM pordist kontrolleri COM3 porti, mille pesa asub kontrolleri tagaküljel. Andmeid edastatakse pakettidena (Sele 4.1), lähtudes ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) kommunikatsioonistandardi määratud sümbolitest [10], vastavalt tööstusliku andmeside “heale tavale” andmeside projekteerimisel järgida standardeid ning vältida probleeme (nt. XOFF sümboli sattumine andmetesse), mis võivad tekkida kui kasutada kontrollisümbolitena “suvalisi” sümboleid.



Sele 4.1 Andmepaketi skeem

Vookontroll põhineb XON-XOFF mudelil, kus kontroller peatab käsupuhvri täitumisel saabuva andmevoo saates XOFF sümboli (DC3, ASCII kood 19) ning puhvri tühjenemisel käivitab selle uuesti saates XON sümboli (DC1, ASCII kood 17). Tarkvaraline XON-XOFF mudel on kasutusel eeskätt selle kerge teostatavuse tõttu. Hirata kontrolleri ei toeta riistvaralisi vookontrolli signaale [1] ning ja keerukamate algoritmide realiseerimine ei oleks HARL-3 piiratud võimaluste piires otstarbekas.

Kontrollerile saadetakse andmeid G-koodi kujul. G-koodi süntaks on määratud ISO 6983 standardiga [11], aga paljud tootjad nagu Fanuc [12] ja Sinumerik [13] kasutavad jätkuvalt omaaretatud ja standardist erinevaid versioone. Käskude erinevust on arvestatud ka käesolevas töös: kontrolleri programm tõlgendab nii G0 ja G1 kui G00 ja G01 käske.

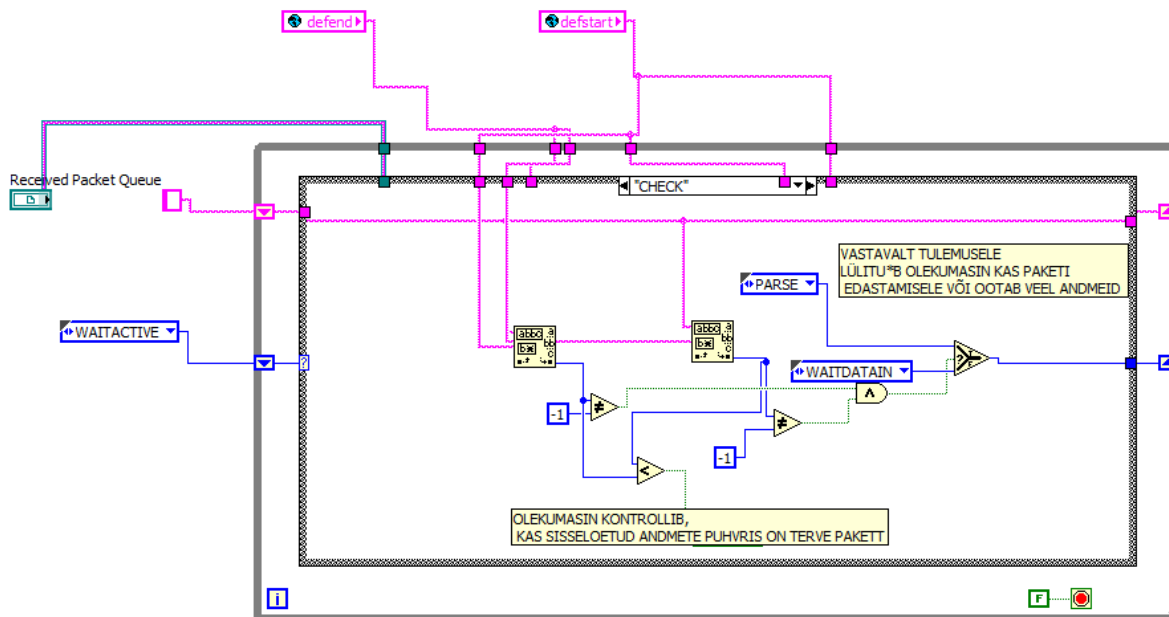
Kuna standardi dokument on tasuline, kasutan käesolevas töös G-koodide alusena vabavaraliste 3D printerite G-koodide loetelu Reprap Wiki veebilehelt [14].

## 4.4 LabView programm ja selle alamstruktuurid

Robotile arvutist käskude mugavamaks edastamiseks sai töö käigus LabView keskkonnas loodud kasutajaliides (Lisa 8), mis põhineb LabView standardsetel programmstruktuuridel – olekumasinad (*State Machine* [9]), mis on ühendatud omavahel lähtudes Tootja-Tarbija (*Consumer Producer* [9]) mudelist. Lisaks on kasutusel globaalsed muutujad, mis hoiavad endas programmis üldkasutatavaid andmeid nagu näiteks avatud pordi number ja andmete väljasaatmise Tarbijastruktuuri “*Queue*” nimi. Kuna LabView graafilist programmeerimiskeelt oleks väljaspool algset keskkonda piltide kujul raske lugeda, on selles töös ära toodud vaid koodi põhstruktuuride minimaalsed, põhimõtet selgitavad skeemid ning alamprogrammide (SubVI) funktsioonidiagrammid.

### 4.4.1 Olekumasin

LabView olekumasin on üldlevinud loogilise struktuuri [19] teostus LabView keskkonnas, mis põhineb “Case” struktuuri sisaldaval „While” tsüklil, millele on lisatud nihkeregister [9]. Nihkeregistrile sisestatakse algolek (nt. „Enum constant” andmetüüp) ning vastavalt sellele aktiveerub „while” tsükli käesolevas iteratsioonis vastav „Case” struktuuris defineeritud skeem (olek). Ühtlasi määratakse „Case” struktuuriga ära järgmise tsükli olek. Viimane olek ja töödeldavad andmed antakse järgmisele olekule edasi nihkeregistrite abil. Käesolevas töös on olekumasinatena teostatud nt. jadapordi andmevahetust käsitlevad funktsioonid (Sele 4.2).

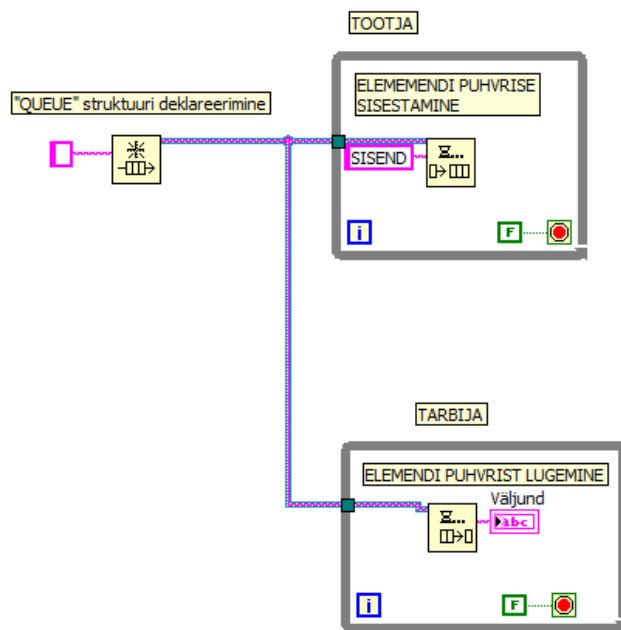


Sele 4.2 Näide töös arvuti jadaporti saabuvaid andmeid töötleva olekumasina ühest olekust.

Olekumasina eeliseks võiks lisaks koodi mahu vähendamisele pidada ka koodi loetavuse lihtsust. Olekud jaotavad koodi hõlpsalt loetavateks üksikosadeks, millest vea otsimine on lihtsam, kui ühte suurt struktuuri korraga uurides.

#### 4.4.2 Tootja-Tarbija mudel

Tootja-Tarbija (Sele 4.3) (ingl. k. “*Consumer-Producer*”) mudel põhineb kahel või enamal paralleelsel tsüklil, millest üks (tootja) saadab teisele andmeid „*Queue*” funktsiooni abil (sisuliselt puhvermälu), ning teine (tarbija) töötleb neid [9]. Sobib hästi olukordadesse, kus on vaja kiiret reaktsiooni andmete tekkimisele (nt. COM pordi puhvri lugemine) kuid andmetöötlus võib võtta aega (nt. saabunud kalibratsioonandmete töötlemine) või võib püsida ressursside säästmiseks ooterežiimis. Käesolevas töös erinevaid alamfunktsioone teostavad olekumasinad on ühendatud just tootja tarbija mudeli abil, kusjuures osad funktsioonid on nii tootja kui tarbija rollis (nt. G-koodi saatmisega tegelevad kasutajaliidese elemendid, mis “toodavad” andmeid “*Serial Write*” funktsiooni jaoks ning “tarbivad” mudeleid “*Serial Read*” funktsioonilt). Queue puhver töötab enamikul juhtudel “*FIFO*”(“*First In-First Out*”) põhimõttel, ehk esimesena Tootja poolt lisatud andmed loetakse Tarbija poolt esimesena välja, LabView-s on võimalik teostada ka teisi puhvrist lugemise viise nagu “*FILO*” ehk “*First In-Last Out*”, mis tähendab esimesena sisestatud elemendi viimasena välja lugemist.



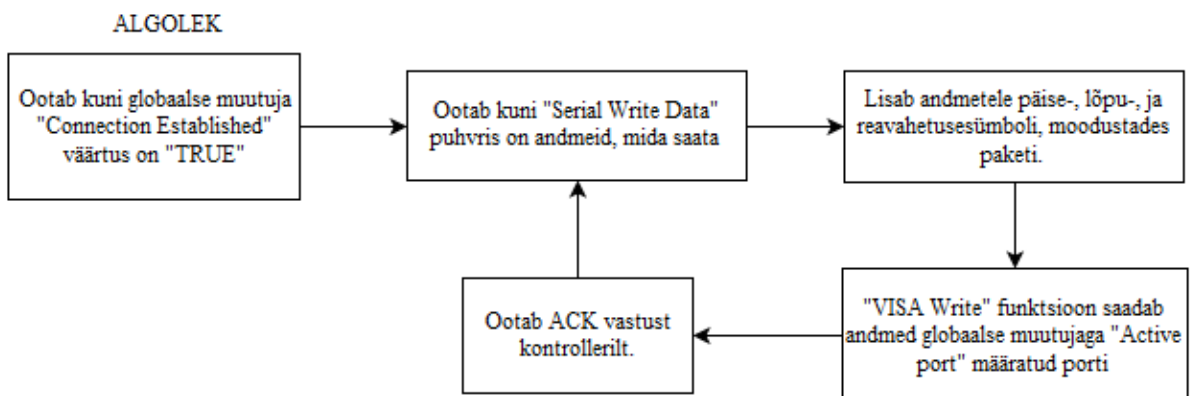
Sele 4.3 Lihtne Tootja-Tarbija mudeli skeem

Järgnevatel peatükkides on toodud töös koostatud LabView kasutajaliideses kasutusel olevate olekumasinate selgitavad diagrammid.

#### 4.4.3 Serial Write

“Serial Write” alamfunktsiooni ülesandeks on andmete edastamine kontrolleri üle jadapordi. (Sele 4.4)

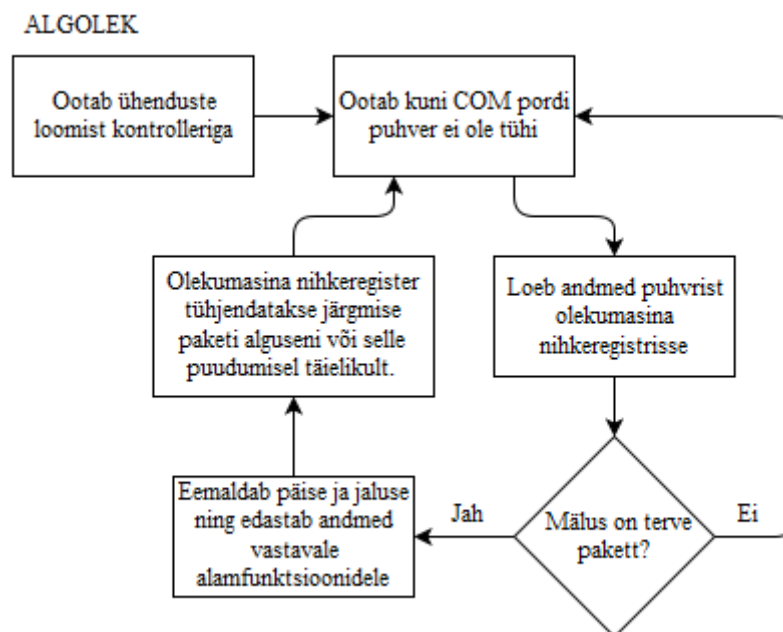
Saatmiseks kasutatakse LabView tarkvarapaketi VISA (*Virtual Instrument Software Architectur*e) funktsiooni “Write”.



Sele 4.4 Kontrolleri andmete saatmise funktsioonidiagramm

#### 4.4.4 Serial Read

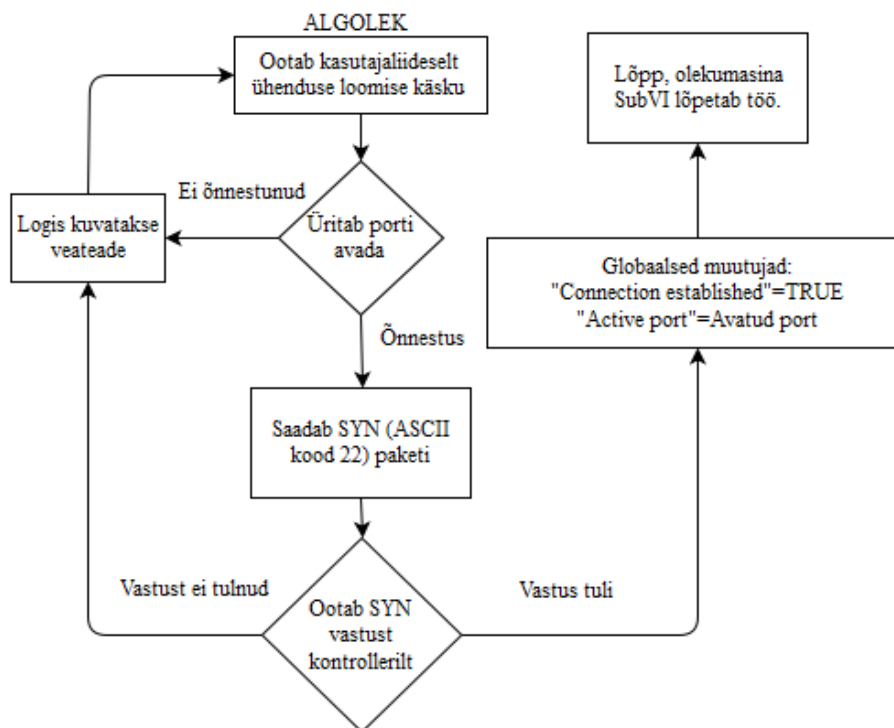
“Serial Read” alamfunktsiooni (Sele 4.5) ülesandeks on kontrolleriilt saabuvate andmete sisselugemine, tötlus (paketi päise jt. andmetega mitteseotud sümbolite eemaldamine) ning LabView programmi teistele funktsioonidele edasi andmine. Puhver, kuhu see SubVI andmeid kirjutab, on määratud globaalse muutujaga, mis on sealt puhvrist andmeid lugevate funktsioonide poolt kättesaadav.



Sele 4.5 "Serial Read" funktsioonidiagramm

#### 4.4.5 Connect to Hirata

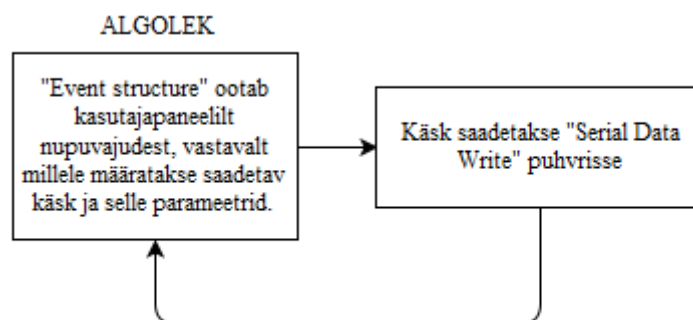
“Connect to Hirata” SubVI (Sele 4.6) ülesandeks on esialgne kontrolleriiga ühenduse loomine. Ühendumise loomisel on kaks astet: Esiteks üritab funktsioon avada valitud porti ning selle õnnestumisel saada vastust SYN paketile, mis kinnitab kontrolleriiga ühenduse funktsioneerimist. Ühenduse loomise õnnestumine tehakse teistele alamfunktsioonidele teatavaks globaalse muutuja väärtuse muutmisega.



Sele 4.6 "Connect to Hirata" funktsioonidiagramm

#### 4.4.6 Graafiline käsupaneel

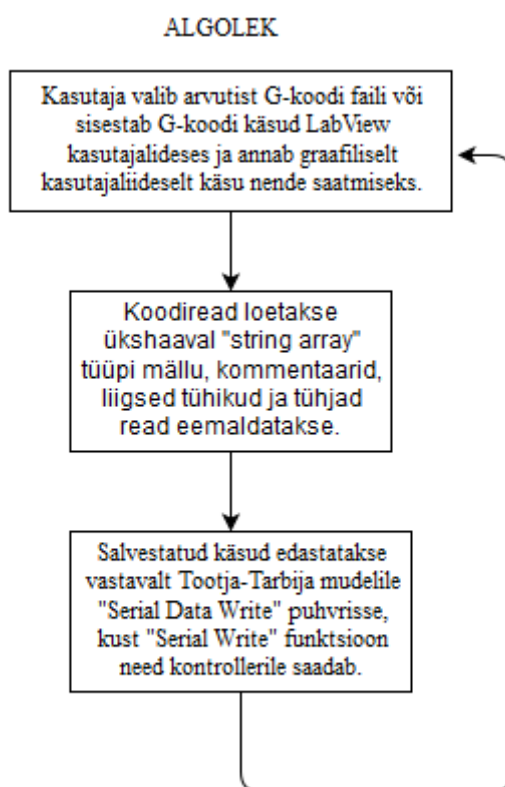
Ikoonidel põhinevat käsupaneeli haldava alamprogrammi (Sele 4.7) abil on võimalik saata kontrolleriile üksikuid käskude vajutades graafilisel kasutajapaneelil nuppe. Võimalik on robotit liigutada, küsida tema asukohta, seada teljestiku nullpunkte, saata kalibreerimiskonstante jm. Kasutaja operatsioonide tuvastamiseks kasutatakse *Event* struktuuri mille aktiveerimistingimuseks on operatsiooni *eventiga* seotud kasutajaliidesel paikneva nupu väärtuse muutus.



Sele 4.7 Graafilise kasutajaliidese funktsioonidiagramm

#### 4.4.7 Tekstipõhised käsud

Tekstipõhiste käskude funktsiooniga (Sele 4.8) on võimalik saata arvutis olevas G-koodi failis sisalduvaid käskude või LabView paneelilt sisestatud ridu. Käsud loetakse ridade kaupa "Array" tüüpi mälli, kus igalt elemendilt eemaldatakse kommentaarid ja liigsed tühikud (tühjad read kustutatakse). Seejärel saadetakse käsud ükshaaval "Serial Data Write" puhvrisesse kontrolleri edastamiseks.

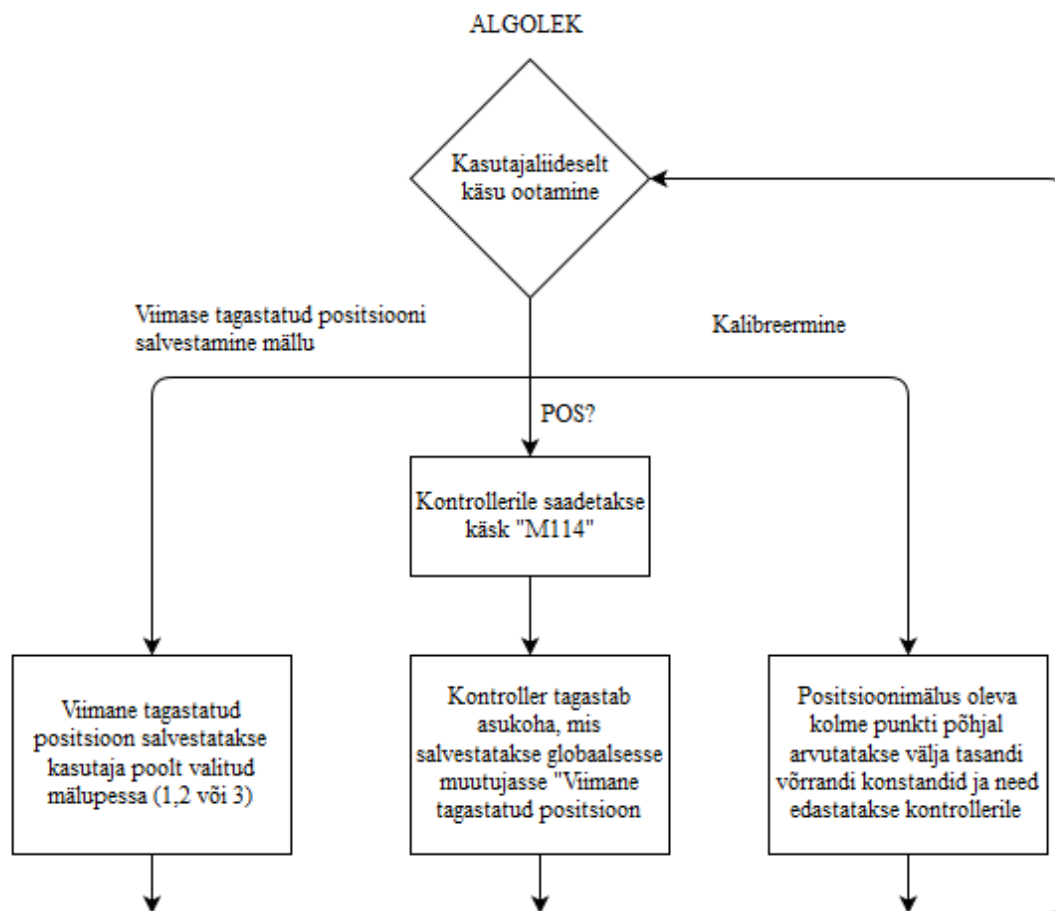


Sele 4.8 Tekstipõhiste käskude edastamine



#### 4.4.8 Roboti positsiooni küsimine ja kalibreerimine

Asukoha teavituse ja kalibreerimisfunktsioon (Sele 4.9) võimaldab teada saada roboti hetkeasukohta ning teostada algelist kalibreerimist tööpinna suhtes. Roboti asukoha teada saamiseks kasutatakse käsku "M114" Kalibreerimisfunktsioonist algoritmist on lähemalt kirjutatud töö kontrolleri programmi lähtekoodi kirjeldavas osas.



Sele 4.9 Roboti asukoha teavituse ja kalibreerimise funktsioon

#### 4.5 Kontrolleri tarkvara

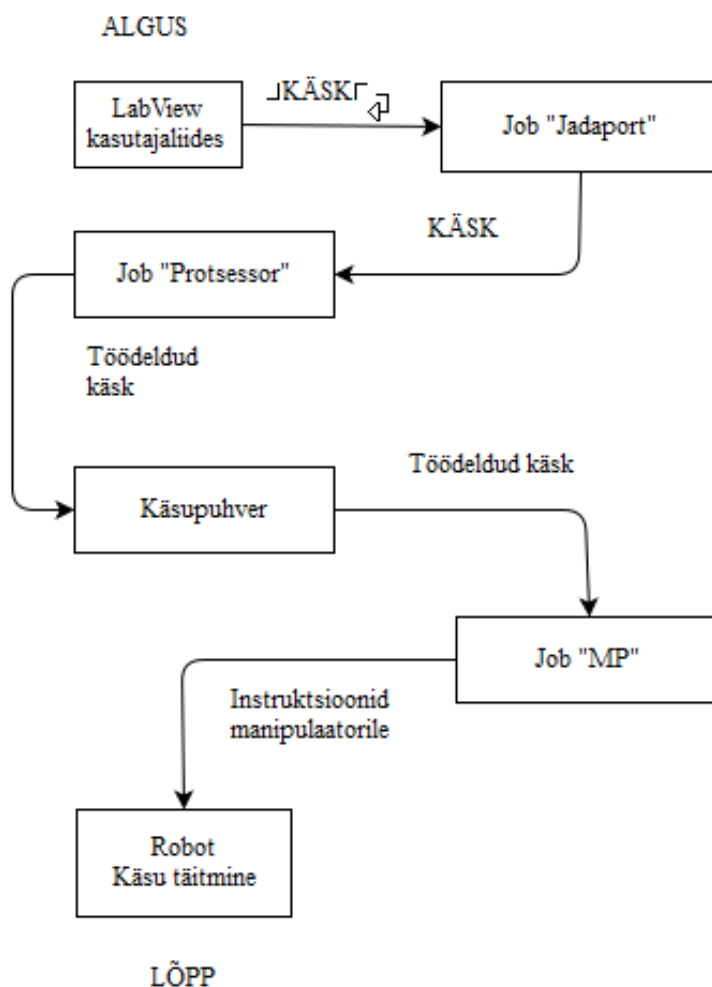
##### 4.5.1 Tarkvara komponendid

Kontrolleri tarkvara põhineb viiel „Job” alamprogrammil (Sele 4.10) Arvutilt saabunud käsu teekond arvutist käsu täitmiseni manipulaatori tasandil:

- „Jadaport”, mis võtab vastu COM3 jadaporti saabuvaid käske/andmeid ja saadab need „Protsessorile”
- „Protsessor”, mis töötleb käsud ning salvestab need „MP” käsupuhvrisse.
- „MP”, mis käsitleb manipulaatori liikumist G koodi instruksioonide järgi.

Lisaks kuulub tarkvara failide hulka “Defines.hed”, mis sisaldab eelnevalt defineeritud muutujaid. Täpsete kommentaaridega kontrolleri tarkvara failid on kaasas tööga ning nende nimekiri on toodud ära Lisas 7. Käesoleva aruande raames on seletatud vaid tarkvara üldine tööpõhimõte.

Arvutilt saabunud käsud salvestatakse käsupuhvrisse, kus need vastava alamprogrammi poolt täidetakse. Puhvri ületäituvuse ja andmete kaotamise vältimiseks on kasutusel andmevoo kontroll tarkvaralise XON-XOFF meetodi abil.



Sele 4.10 Arvutilt saabunud käsu teekond arvutist käsu täitmiseni manipulaatori tasandil

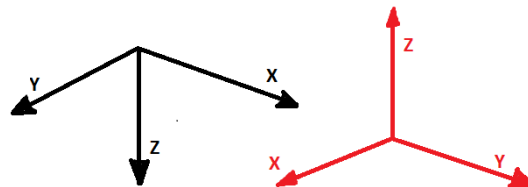
Job-id aktiveeruvad automaatselt kontrolleri sisse lülitamisel. “Jadaport”, “Protsessor” ootavad enne töösükli alustamist kuni “MP” on lõpetanud kalibreerimise.

## 4.5.2 Juhtimisalgoritm

Hirata kontrolleri andmeside robotiga põhineb “File” struktuuril [1], mis määrab, et robotiga võib korraga suhelda vaid üks “Job”. See tähendab, et kui robot liigub ei ole võimalik pääseda ligi tema sisemistele PM positsioonimäludele, mis teostavad sujuvat liikumist.

Seetõttu oli käesoleva töö käsutöötluse puhvi lahendamisel kaks valikut: Kas kasutada kontrolleri P mälusid, mis on alati ligipääsetavad ning leppida väikese pausiga iga roboti liigutuse järel ning võimaldavad vahepealseid käske nagu ootamine, positsiooni tagastus jm. või kasutada PM mälusid, mille järgi robot liigub küll sujuvalt kuid peab peale igat liikumistsüklit pikemalt peatuma, et tarkvara saaks PM mällu uued positsioonid kirjutada.

Otsustatud sai P mälu põhineva lahenduse kasuks, sest pidev ligipääsetavus on tarkvara kirjutamise seisukohast paindlikum (nt. saab kasutada P mälusid käsupuhvi pidevalt ümberkirjutatava osana).



Sele 4.11 Hirata reaalne teljestik (must) ja tarkvaraline teljestik (punane)

Teiseks probleemiks on Hirata telgede koordinaadistik, mis on “ümberrööratud”, Z telg suunatud alla (Sele 4.11). Kuna printimise rakendus vajab üles, tööpinnast eemale suunatud Z teljega koordinaadistikku, on viib kontrolleri programm läbi koordinaatide teisenduse saabuvast “üles suunatud” teljestikust Hirata reaalsesse teljestikku.

Roboti võib liikumisel lähtuda kolmest koordinaadistikust, kasutusel olevat koordinaadistikku saab valida käskudega G54, G55 ja G56. G54 valib koordinaadistiku, mis lähtub roboti telgede 0 punktist. G55 ja G56 koordinaadistikud lähtuvad käsuga G92 seatud 0 punktist. G55 koordinaadistik on paralleelne roboti teljestikuga. G56 koordinaadistikus liikudes lähtub robot

kalibratsioonist. Kalibratsiooni puhul on tegu tööpinna tasandi võrrandi arvutamisega kolme punkti järgi

Arvutuskäik on järgmine:

- 1) Olgu salvestatud kolm punkti:  $P1(x1, y1, z1); P2(x2, y2, z2); P3(x3, y3, z3)$
- 2) Leitakse vektorid  $\vec{V1} = P1 \rightarrow P2$  ja  $\vec{V2} = P1 \rightarrow P3$
- 3) Leitakse vektorkorrutis  $\vec{n}(a, b, c) = \vec{V1} \times \vec{V2}$ , mis on tasandi normaalsirge.
- 4) Lähtudes ühest salvestatud punktist arvutatakse välja tasandi võrrand kujul  $ax+by+cz+d=0$

Konstandid a,b,c ja d edastatakse kontrolleri, kus neid kasutatakse roboti liikumisel järgmise punkti kalibreeritud asukoha arvutamiseks.

#### 4.5.3 Job “Jadaport”

See Job loeb kontrolleri COM3 pordi puhvrist käsu. Kui puhver on tühi, ootab andmete saabumist (Parameeter „EOF”). Andmeid loetakse sisse ridade kaupa käsuga “LINE INPUT”, ridu eristab reavahetuse sümbol (ASCII sümbol 13). Sisseloetuna eemaldatakse andmepaketilt päis ja jalus (sümbolid STX ja ETX) ning kui tegu ei ole tühja paketiga, saadetakse see edasi käsuprotsessorile täitmiseks. Puhvri ületäitumist vältiv andmevookontroll on teostatud tarkvaralisel XON-XOFF meetodiga järgnevalt: Kui täitmata käskude hulk on suurem kui 10, saadab Serial arvutile käsu XOFF ning LabView programm jääb uute käskude saatmiseks XON käsu ootele. XON saadetakse kui puhver on tühjenenud 5 käsuni. Lisaks vastab “Jadaport” automaatselt “SYN” paketi saabumisele.

Tarkvaralise XON-XOFF meetodil on ka oht: XOFF olekus ei saa PC saata kontrolleri stop signaali. Probleemi lahendamiseks on kasutajaliideses jadapordi riistvaraliste kontrollisignaalidega lülitatav relee, mis katkestab kontrolleri hädastopp ahela. Täpsemalt on sellest lahendusest kirjas kasutajaliidest käsitlevas alapeatükis.

#### 4.5.4 Job “Protsessor”

Loeb string tüüpi muutujast Command\$ saabunud käsu andmed, mis on esitatud G-koodi vormis (välja arvatud kalibratsioonikonstantide saatmine)

Saabuva käsuks indeks on ININ ja Job „MP” poolt viimati täidetud indeks on EXIN. Nende kahe indeksi vahe väljendab puhvris olevate käskude mahtu. Puhver on teostatud ringloenduri põhimõttel töötava nihkeregistri baasil (Liikudest indeksist 1 → 100,100->1 ja siis uuesti 1->100).

G-koodi tõlgendamine on üles ehitatud “Case” struktuurile. “Select Case” käsuga valitakse vastavalt saabunud G-koodi instruksioonile (G01,M114 jne..) vastav alamprogramm mida käivitada ja mis töötleb instruksiooni päisele järgneda võivaid parameetreid..

“Protsessori” poolt tõlgendatavad käsud on toodud (Tabel 4.2).

Tabel 4.2 "Protsessor" poolt tõlgendatavad käsud

Käsk	Parameetrid	Tegevus
G0,G00	X,Y,Z,A(Roboti W) koordinaadid, kiirus F	Liikumine punktist punkti.
G1,G01	X,Y,Z,A koordinaadid, kiirus F	Liikumine punktist punkti rangelt sirgjoonelist trajektoori mööda.
G4	oodatav aeg sekundites	Paus n sekundit
G28	XYZW koordinaadid,	Liigub valitud telgedel 0 punkti
G54	-	Valib koordinaadistikuks baaskoordinaadistiku
G55	-	Seab koordinaadistiku lähtuma G92 käsuga määratud punktist.
G56	-	Valib koordinaadistikuks käsuga G92 määratu ning arvestab liikumisel kalibratsiooni
G90	-	Absoluutne positsioneerimine
G91	-	Suhteline positsioneerimine
G92	-	Määrab G55 koordinaadistiku nullpunkti
G30	-	Kalibratsioonianduriga tööpinna kompamine
M114	-	Tagastab LabView kasutajaliidesele roboti asukoha
M355	Väljund S(0-15), Biti väärtus 1/0	Lülitab sisse väljundsignaali

#### 4.5.5 Job “MP”

Job „MP” peamiseks ülesanneteks on roboti liigutamine ja liikumispunkti asukoha kalibratsioon. Job „MP” käivitub esimesena, ning teostab kalibratsiooni, pärast mida annab see Job globaalse muutuja abil teistele töö algust lubava signaali. „MP” käsku täitev tsükkel aktiveerub kui viimasena täidetud käsu (muutuja EXIN) ning viimati lisatud käsu (ININ) väärtused erinevad, mille puhul loeb „MP” globaalsest käsupuhvrast (nimetatud *ComBuf\$*) uue käsu aadressilt EXIN+1.

- M” käsu korral liigub loetud indeksiga programmälv P määratud positsioonile, lähtudes hetkel aktiivsest teljestikust.
- “W” käsu korral ootab sekundites määratud aja.
- “P” käsu korral valib käsu parameetrite poolt määratud koordinaadistik.
- “S” käsu korral seab hetkeasukoha 0 punktiks, millest lähtuvad G55 ja G56 koordinaadistikud.
- “Z” käsu korral kompab robot kalibreerimissondiga tööpinda.

Pärast käsu täitmist suureneb EXIN väärtus ühe võrra ning käsu täitmise tsükkel kordub.

## 5. ELEKTROONIKA

### 5.1 Mehaaniline kasutajaliides

Käesoleva töö üheks eesmärgiks oli roboti ja kontrolleri olemasoleva kaabelduse täiendamine, et toetada mitmesuguste andurite ja seadmete ühendamist süsteemi. Selle eesmärgi täitmiseks sai projekteeritud ja valmistatud välise mehaanilise kasutajaliidese (Sele 5.1) paneel. Paneelil on järgmised funktsioonid:

- Hädastopp nupp
- Pausinupp
- Indikatsiooni LEDid
- Roboti DI sisendviikudega ühendatud suru ja *tumbler* lülitid
- Kruviterminalid väliste seadmete ühendamiseks
- 37 viiguline D-sub pesa, mis ühendab kasutajaliidese kontrolleri sisend- (DI) ja väljundpesi (DO).
- 15 viiguline D-sub pesa, mis ühendab kasutajaliidese tööriistakinnituseni viiva signaalkaabli.
- Välise seadmete poolt juhitud hädastopi aktiveerimisrelee.

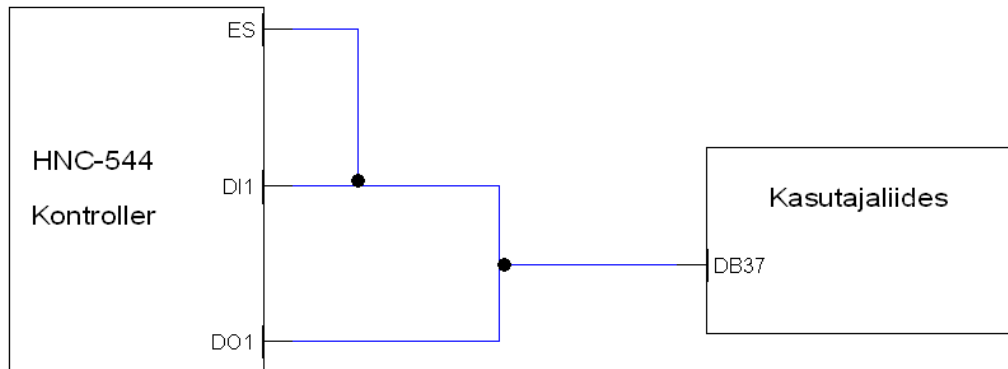


Sele 5.1 Kasutajaliides

Nuppude nimetused ja funktsioonid on näidatud Lisas 3.

Nagu selle töö osas 3.3.1 näha, on DI ning DO pesade + ja - viigud sisuliselt teineteise funktsiooni duubeldavad, kui kasutada kontrolleri sisemist 24 V toidet. Seetõttu ei ole mõtet mõlemat (nt. IN0+ ja IN0-) väljundit viia kasutajaliideseeni, piisab vaid IN+ või OUT+

viikudest, 24 V toiteahela ühendamiseks ning IN- ja OUT- viikude ühendamiseks 0 V viiguga kontrolleri juures. Ühendamaks kasutajaliidest kontrolleri disaini ühenduskaabel (Lisa 2), mille kontrolleri poolsetes pistikutes on IN- ja OUT- klemmid ühendatud otse 0 V terminali.



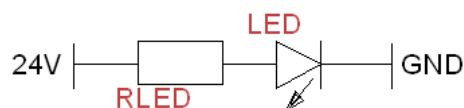
Sele 5.2 Kasutajaliidese ja roboti ühendus

Kaabel koosneb E-Stop ning DI1+ ja DO1+ kanalitest, mis ühenduvad kokku üheks 37 kanaliseks kaabliks (Sele 5.2), mis kinnitub kasutajaliidese külge DB-37 pistikuga (Joonis 2) Lisaks on kasutajaliidese küljes olemas DB-15 pistik, mis ühendub roboti telgedel juba olemasoleva 15 kanalise kaabli pesaga.

Sobitamaks indikatsiooni LEDe kontrolleri väljundsignaaliga, tuli sobiva takisti  $R_{LED}$  (Sele 5.3) valimiseks teostada arvutus:

Teadu on LEDi nimivool  $I_{LED}=20$  mA ja kontrolleri väljundsignaali pinge  $U_{KONT}=24$  V. LEDide pingelang varieerub sõltuvalt kiiratava valguse tüübist. Kuna töös on kasutusel eri värvi indikaatorid, kasutan arvutusel ligikaudset väärtust  $U_{LED}=3$ V

Vastavalt Oomi seadusele saan:  $R_{LED}=(U_{KONT}-U_{LED})/I_{LED}=(24-3)/20 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{\sim 1000 \Omega}}$

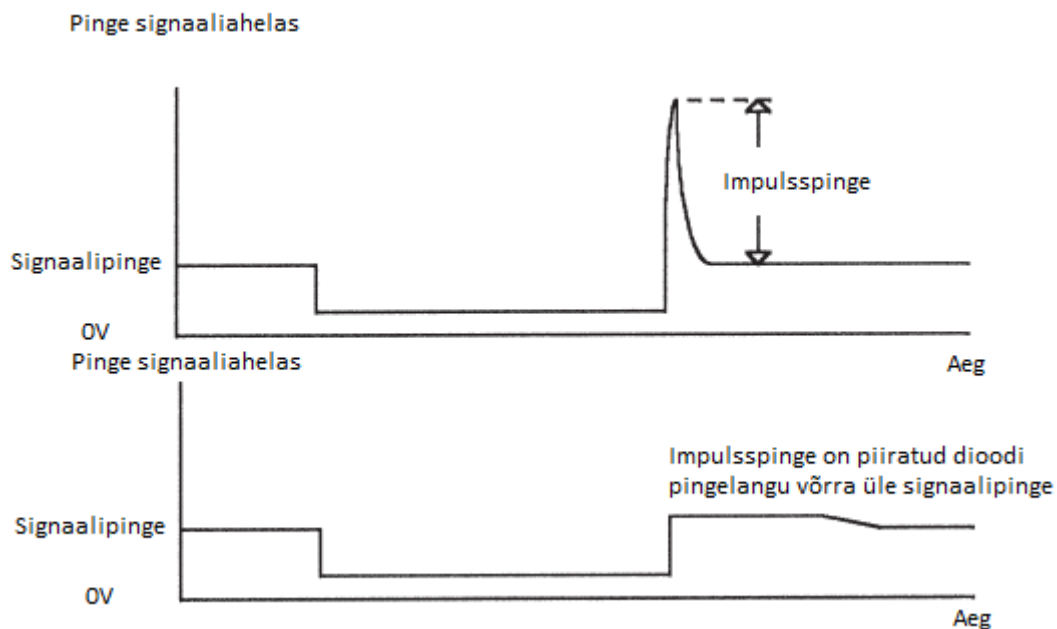


Sele 5.3 Indikaatori ühenduse tüüpskeem



Kasutajaliidesega on võimalik ühendada lisaks olemasolevale hädastoppnupule ka väline ahel, mille aktiivseks muutmine (hädastopp nupuga jadamisi lülitamine) toimub hädastopp nupu kõrval paiknevast tumblerlülitist. Lisaks on hädastoppi võimalik aktiveerida ühendades kruviterminali (Lisas 1 on ära toodud kasutajaliidese sisemine skeem) 12V juhtsignaali, mis avab hädastopiga jadamisi oleva rele.

Tegu on RS-12 [20] tüüpi 12V lülituspinge ja 12.5mA voolutarbega releega, mille mähise kontaktidele on ühendatud rööbiti mähise ümberlülitamisel tekkivat impulsspinget (Sele 5.4) summutav diod. Seetõttu võib seda releed näiteks lülitada jadapordi riistvaraliste kontrollsignaalide abil ilma jadapordi riistvara kahjustamist kartmata.



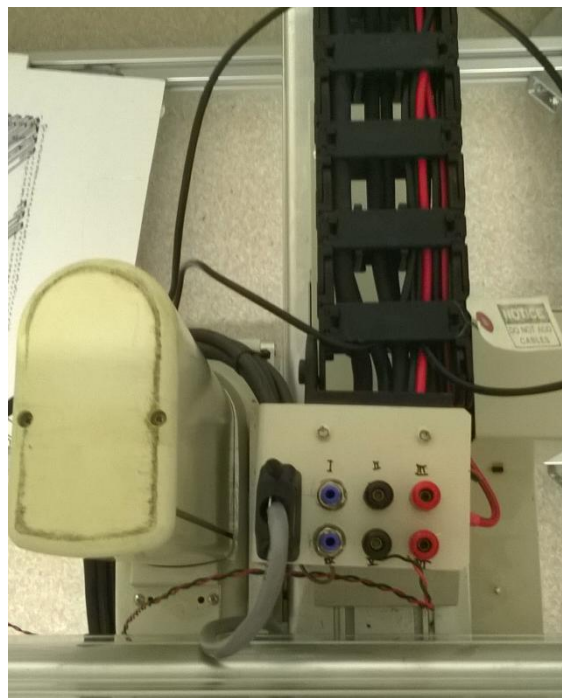
Sele 5.4 Relee mähise ümberlülitusel tekkiva impulsspinge graafikud summutava diodiga (alumine) ja ilma (ülemine) [23]

Pausinupp kasutab ära roboti riistvaralist pausifunktsiooni, mis käivitub DI pesa 6. sisendsignaali (IN5+,IN5-) aktiveerumisel. Hädastoppnupp on kaabli kaudu ühendatud kontrolleri pesa “ES” viikudega 3 ja 4, ning selle lülitumisel rakendub roboti sisemine hädastoppahel [1].

## 5.2 Roboti manipulaatori kaabelduse täiendus

Roboti kaabelduse üheks puuduseks on tööriistakinnituseni viivate toitekaablite puudumine. Uutele juhtmetele kaabliketis ruumi vabastamiseks eemaldati kaks 6mm läbimõõduga ja kaks

4mm läbimõõduga pneumovoolikut. Roboti tootja poolt paigaldatud suruõhuvoolikud pakkusid võimalust kasutada pneumoajameid, mis on elektriajamitest odavamad ja parema võimsuse ning kaalu erisuhtega. Elektriajamite eeliseks pneumoajamite ees on aga täpsus [22]. Lisaks on elektriga võimalik kasutada suurt hulka teist tüüpi rakendusi nagu kontrollid ja kuumutid. Seetõttu lisati roboti telgede kaks paari toitekaablit. Toitekaabli ühenduspesad on paigaldatud paneelis eemaldatud pneumoajamite pesade asemele (Sele 5.5).



Sele 5.5 Täiendatud kaabeldus ja lisatud ühenduspesad.

Toitekaabli ühenduspesad on valmistatud firma Hirschmann poolt [24], nende maksimumtööpinge on 60V ja maksimumvool 16A.

Lisaks olemasolevale 15 soonelisele DB-15 kaablile lisati töö raames roboti kaabeldusse 2 paari toitekaablit, ning kaks USB kaablit, mis, arvestades kaablite lähedust roboti servoajamite signaal- ja toitekaablitele ning sellest tekkida võivate müraprobleemide ennetamiseks, on foolium ja sukkvarjestusega. Lisaks on valmistatud 1m pikkune DB-15 ühenduskaabel, millega saab tööriistamoodulile kinnitatud aparadi ühendada roboti väljunditega.

Hirata kontrolleri puuduseks on analoogsignaali töötlemise võimekuse puudumine ning digitaalsisendite ja -väljundite väike arv. Selle probleemi lahendamiseks kinnitati töö käigus manipulaatori Z/W telgede mooduli külge firma National Instruments poolt toodetud digitaal

ja analoogsignaali sisend/väljund plokk NI-USB 6009 [15]. Ühendades selle kaabliketti paigaldatud USB kaabli kaudu arvutiga on ploki signaale võimalik hallata LabView keskkonnas tootja poolt saada oleva tarkvara abil. NI-USB 6009-ga saab ühendada kuni 8 analoogsisendit, 2 analoogväljundit ning 12 digitaalsisendit ja väljundit.



Sele 5.6 NI-DAQ moodul roboti ZW mooduli külge ühendatuna

Moodul kinnitub roboti külge 10mm paksusest ABS lehest freesitud paneeliga (Sele 5.6). Paneel on kinnitatud roboti Z/W telgede ajami korpuse küljest eemaldatud dekoratiivpaneeli asemele.

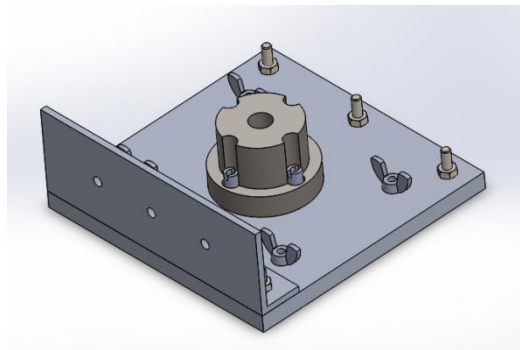
## 6. MEHAANIKA

### 6.1 Roboti tööriistarakise projekteerimine ja valmistamine

Roboti tööriistarakise projekteerimisel on lähtunud järgnevatest nõuetest:

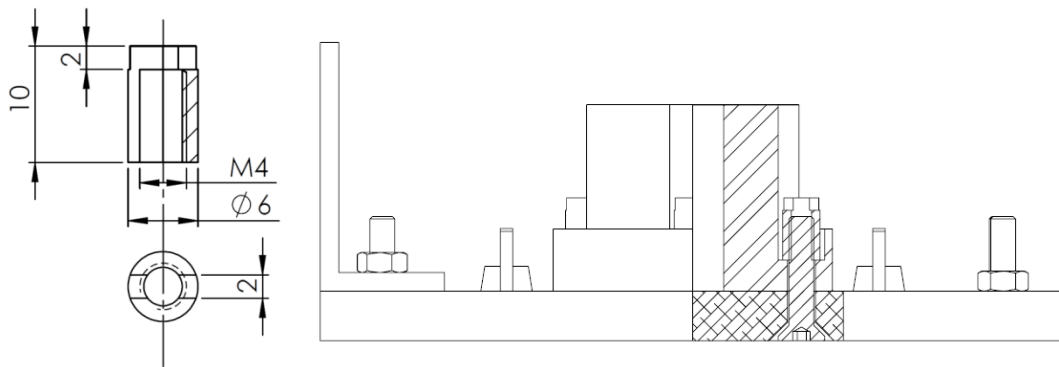
- Võimalus kinnitada objekte nii horisontaal kui vertikaaltasapinda
- Lihtne, võimalikult väheseid tööriistu vajav kinnitus/lahtiühendusprotsess
- Väike mass
- Lihtne valmistada

Roboti olemasoleva tööriistaflantsi puuduseks võib pidada selle rasket ligipääsetavust ning väikesi mõõte, mis teevad tööriistade kinnitamise raskeks. Uue rakise (Sele 6.1) projekteerimisel valiti kinnitusavade asukohad selliselt, et neid läbivaid polte oleks võimalik fikseerida liblikmutritega. Seetõttu ei vaja rakisele objektide kinnitamine ühendamine teisi tööriistu.



Sele 6.1 Tööriistakinnitus koos roboti flantsiga

Kuna projekteerimisel oli üheks eesmärgiks tööriistarakise sile kinnituspind, valiti selle kinnitamiseks roboti tööriistaflantsi külge peitpeaga poldid (Lisa 5). Selgus, et flantsi kuju ei lase kasutada standardseid saadaolevaid mutreid poltide fikseerimiseks. Seetõttu tuli valmistada terasest erikujuga mutrid (Sele 6.2), mis võimaldaksid tööriistarakist kinnitada

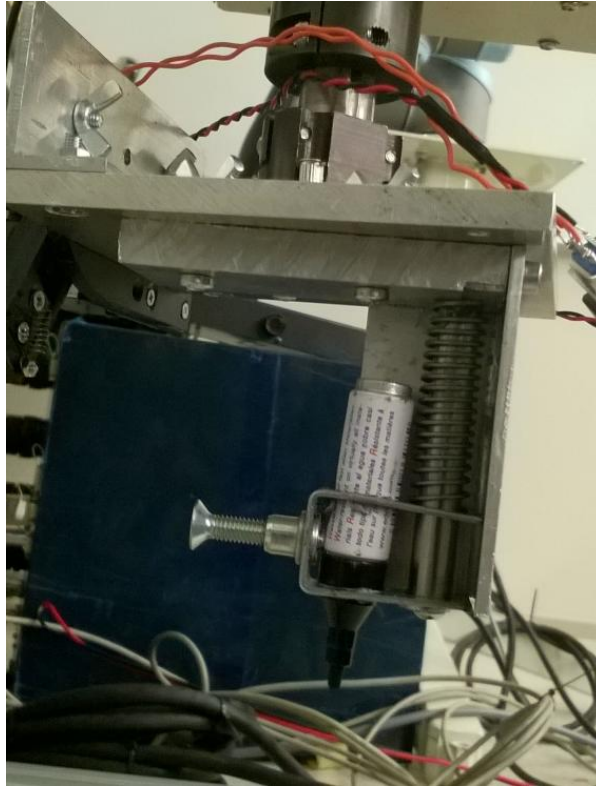


Sele 6.2 Töö käigus valmistatud erikujuline kinnitusmutter ja läbilõige roboti flantsi ning tööriistarakise kinnitusest

Tarkvara SolidWorks abil uue roboti tööriistakinnituse ja flantsi koostu massi arvutamiseks saadi tulemuseks 600 grammi, millega tuleb arvestada robotile rakendusi projekteerides, et mitte maksimaalset kandevõimet 5kg ületada (Tabel 2.1)

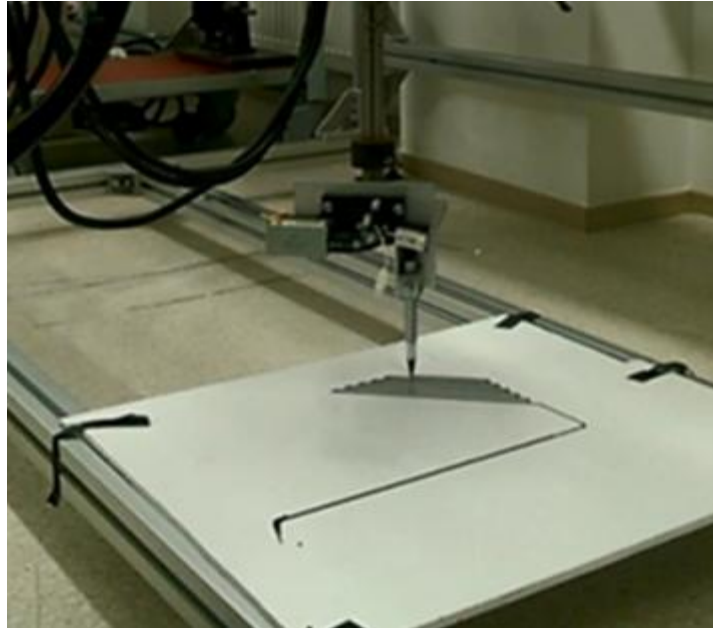
## 6.2 Markerihoidja

Tõestamaks süsteemi võimet liikuda etteantud trajektoori mööda (Sele 6.4), tuli selle töö raames luua kinnitus markerpliiatsile, mis jäädvustaks roboti liikumistrajektoori alusele. Selle peamiseks eesmärgiks oli luua vahend roboti funktsioonide demonstreerimiseks (Sele 6.3), kuid võimalus on seda kasutada ka edaspidisteks rakendusteks nagu suure pindalaga materjali täppismarkeerimine. Markerikinnituse disaini tingimuseks oli selle võime kompenseerida aluspinda ebäühtlust. Lähtudes olemasolevates vahenditest sai projekteeritud markerihoidja, mis eeltoodud tingimusi rahuldaks.



Sele 6.3 Markerihoidja markerpliatsiga

Lahendus on lihtne: markerpliatsit kinnitav klamber liigub mööda lineaarvõlli, mida ümbritsev vedru surub klambrit alla vastu tööpinda. Klambri pöörlemist takistab alumiiniumvinklist juhik. Klambrisse saab kinnitada markerpliatsi läbimõõduga kuni 13mm. Pliatsit fikseerib asendisse M5 polt. Markerihoidja ehitus on täpsemalt näitatud selle töö Lisas 6.



Sele 6.4 Robot markerpliatsiga valgele pinnale printimistekonda jäädvustamas.

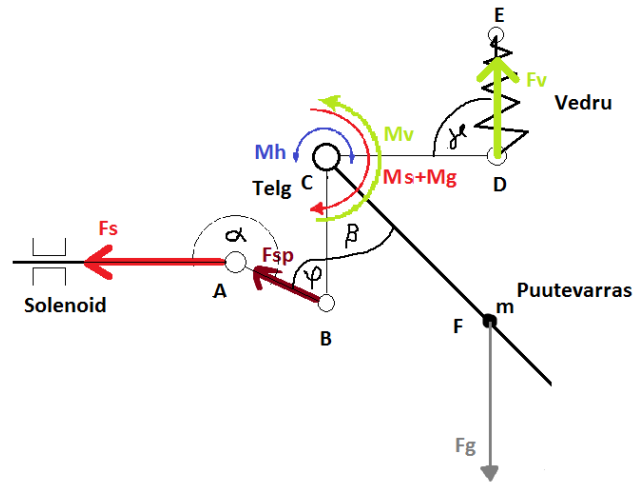
### 6.3 Kalibreerimismoodul

Teostamaks tööpinna kalibratsiooni kolme punkti järgi tuli töö raames valmistada tööriistarakisele kinnituv kalibreerimismoodul. Kalibreerimismoodulile esitatud nõuded olid järgmised: kerge kaal, ühilduvus tööriistakinnitusega ja võimalus sondi asendit muuta (sond peab ulatuma kaugemale kinnitatud tööriistast ning fikseeritud kujul takistaks see printimist).

Sondi liigutamiseks töö- ja ooteasendisse liigutamiseks kaaluti lahendusena kas servoajamit või solenoidi ja vedru kombinatsioon. Solenoidil põhinev lahendus valiti selle lihtsuse poolest – vaja on vaid ühte digitaalsignaali solenoidi kontrolliva rele lülitamiseks.

#### 6.3.1 Teoreetiline mudel

Sisse lülitatud solenoid tõmbab sondi puutevarda tööasendisse ning väljalülitamisel teostab vedru vastupidise liigutuse. Kuna erineva pikkustega puutevardad omavad erinevaid raskuskeskmeid, mis mõjutab vedru ja solenoid tasakaalu on vaja võimalust vedru pingestatust muuta.



Sele 6.5 Kalibreerimissondi kinemaatika skeem

Sele 6.3 on toodud ära puutevarda liikumist mõjutavad jõud ja momendid, mis on tähistatud ning avalduvad järgnevalt:

Tõmbevedru poolt avaldatav jõud  $F_v$

Jõu  $F_v$  poolt punktis C (puutevarda pöörlemisteljel) avalduv moment  $M_v = F_v \cdot |CD| \cdot \cos \gamma$

Raskusjõud  $F_g$  ja selle poolt punktis C avalduv moment  $M_g = F_g \cdot |FC| \cdot \sin \beta$

Hõõrdemoment  $M_h$ .

Solenoidi poolt avaldatav jõud.

Solenoidi liigendi poolt avaldatav jõud  $F_{sp} = F_s \cdot \cos \alpha$  ja  $M_s = F_{sp} \cdot \sin \varphi \cdot |BC|$

Jõulävi, mida solenoid peab töörežiimis ületama:

$$F_s = ((M_h + M_v - M_g) \cdot |BC|) / (\sin \varphi) \cdot \cos \alpha$$

Kuna komponentide valik toimus eelarvelistel põhjustel Mehhatroonikainstituudis kohapeal olemasolevatest komponentidest, mille omadused on tundmatud, ei ole võimalik lõplikku arvutuskäiku võimalik välja tuua ja solenoidi ning vedru sobivuse määramine toimub katseliselt. Küll aga annab teoreetiline mudel aimu kalibreerimismehhanismis mõjuvate jõudude omaahelist suhtes ning võib järeldada, et optimaalsel komponentide paigutusel on solenoidi liigendvarras rakendatud võimalikult lähedale varda pöörlemisteljele, kus läbitavad vahemaad on väikesed. Solenoidi poolt aretatav jõud kahaneb liikumiskauguse kasvuga eksponentsiaalselt [17], aga moment (ja seeläbi vajaminev jõud) kasvab pöörlemisteljele lähenedes lineaarselt. Rakendades solenoidi rakenduspunkti pöörlemistsentri võimalikult lähedale asub solenoidi töövahemik suurima väljundvõimsusega alas, mis tähendab, et solenoid on võimeline kompenseerima ka tugevama vedru vastumõju.

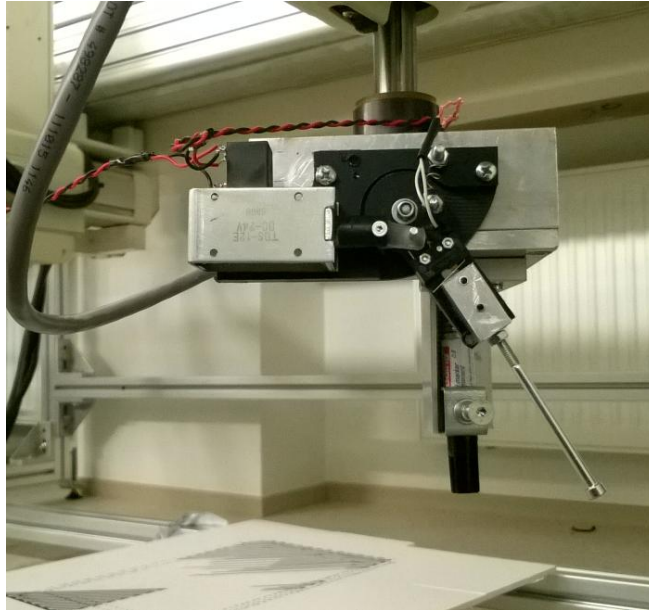


### 6.3.2 Valmistatud kalibreerimismoodul

Kalibreerimismoodul (Sele 6.6) valmistati lähtudes alapeatükis 8.4.1 kirjeldatud mõttekäigust. Detailid on välja freesitud 10mm paksust ABSi lehest, mis valiti plastiku hea töödeldavuse tõttu. Konstruksioonis (Lisa 4) on üritatud sondi vardale mõju survejõu mõjusirget hoida võimalikult pöörlemistelje lähedal, et vähendada võimalikke paindemomente. Vardaks on M4 keermelatt (antud juhul polt), mida on võimalik reguleerida sobivale pikkusele. Varrast fikseerib mutter. Roboti liikumisel alla puutub varras alusplaadi pinda ning selle kinnitus liigub mööda siini üles kuni aktiveerub mikrolüliti, mille oleku muut peatab liikumise. Seejärel saadab kontrolleri üle jadapordi arvutile oma asukoha koordinaadid.

Mikrolüliti on ühendatud läbi "NC" (*Normally closed*) ehk tavaliselt suletud ahela, mis parandab süsteemi ohutust, kuna on võimalik kontrollida lüliti ühenduse toimimist teda läbiva sisendsignaali aktiivse oleku järgi. Vastupidise "NO" (*Normally open*) ühendamise korral oleks sondi vaba olek ja lüliti puudumine või lahtiühendus eristamatud, ning kalibreerimiskäsu korral eksisteeriks oht roboti vigastamiseks vastu tööpinda liikumisel, sest liikumist peatav signaal ei aktiveeruks. Ühendusel läbi „NC“ ahela peatub robot puuduva või ühendamata lüliti korral koheselt.

Sondi asendit muutev solenoid saab oma toite selle töö käigus roboti kaabeldusse lisatud toitekaablite kaudu. Solenoidi lülitab aktiivsesse olekusse relee, mida saab ühendada kontrolleri DO väljunditega vastavalt Sele 2.5 näidatud skeemile (implusspinget summutav diod on juba relee juurde lisatud).



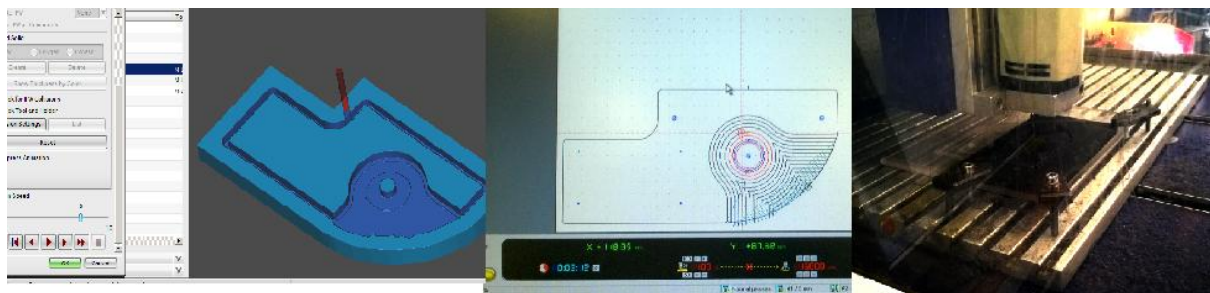
Sele 6.6 Kalibreerimismoodul roboti külge kinnitatuna

Vedru pinge muutmine on teostatav vedru aasa kinnitaval poldil mutrite asukoha muutmiseega. Kasutatud lahenduse ühe puudusena võiks välja tuua ohu, et pika aktiivse oleku jooksul võib solenoid üle kuumeneda.

#### **6.4 Mehaanikakomponentide valmistustehnoloogia**

Mehaanikakomponendid valmisid Mehhatroonikainstituudi töökojas seal saadaolevatest materjalidest. Üks põhilistest töövahenditest oli CNC freespink, mille sai lehtmaterjalist vajalike detaile välja lõigata. Lisaks kontuuride väljalõikamisele oli vaja ka freesida detailidesse ruumilisi süvendeid. Varasemaid kogemusi uurides selgus, et CNC juhtimiseks kasutatav tarkvara Galaad 3 ei ole tasku freesimisel kuigi hea – automaatselt genereeritud lõiketrajektor on ebaefektiivne ja terad kipuvad selle järgi lõikamisel purunema.

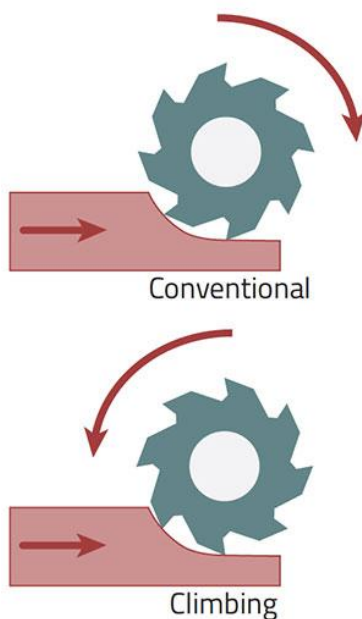
Probleem sai lahendatud teostades lõiketrajektori genereerimise programmis NX [21] (saadaval TTÜ 5. korpuse arvutiklassis), mille algoritmid on Galaadi omast palju arenenumad. NX-is loodud trajektor teisendati “3 axis mill” postprotsessori abil G-koodi, mida Galaad on võimeline lugema.



Sele 6.7 Detaili valmistamise 3 astet:

NX freesimise simulatsioon, genereeritud lõiketrajektor programm Galaad ja freesimine

Kasutatud meetodi (Sele 6.7) tulemuseks on parem lõiketulemus, eeskätt tänu “*Climb cut*” (Sele 6.8) lõikestrateegia kasutamisele, mille tõttu on lõigatud pind parema kvaliteediga. Lisaks säästis NX-i kasutamine aega, mis oleks kulunud Galaad keskkonnas lõiketrajektoride käsitsi joonestamisele.



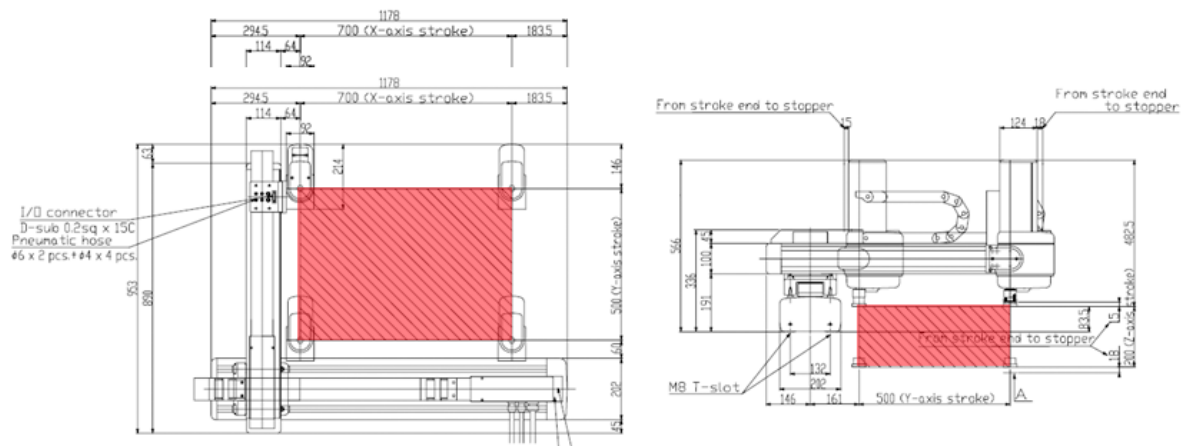
Sele 6.8 *Climb* ja *Conventional* lõikestrateegiad [16]

Kalibreerimissondi valmistamisel on kasutatud plastikut selle kerge töödeldavuse tõttu.

Tööriistakinnitus valmis käsifrees- ja puurpingil, kuna koosnes lihtsatest ja väheseid töölusoperatsioone nõudvatest komponentidest.

## 7. SÜSTEEMI OHUTUS

Turvalisus süsteemi töö ajal on oluline faktor, mida tuleb arvesse võtta süsteemi projekteerimisel ja sellega töötamisel. Käesolevas töös koostatud süsteemiga töötamisel ohutuse tagamiseks tuleb esiteks järgida manipulaatori ja kontrolleri tootjapoolseid ohutusnõudeid (näiteks roboti töötamise ajal selle (Sele 7.1 Roboti liikumisala) näha olevas liikumisalas mitte viibimine) [1]. Lisaks on töö käigus lisatud mehaanilise kasutajaliidesele hädastoppnupp, mille vajutamine peatab masina töö. Läbi mehaanilise kasutajaliidese on hädastoppnupule võimalik kiirelt jadamisi ühendada ka teisi ohutusahelaid.



Sele 7.1 Roboti liikumisala (tähistatud punaselt)

Üheks võimalikuks süsteemi ohutuse täiendamiseks oleks lisada selle ümber valguskardin, mis katkestamisel aktiveeriks kontrolleri hädastoppahela. Sobiv ühenduspunkt valguskardina keelavale signaalile oleks selles töös valmistatud mehaanilise kasutajaliidese kruviterminalid 1 ja 2, mis on hädastoppiga jadamisi oleva rele mähise viigud.

## 8. SÜSTEEMI KATSETAMINE

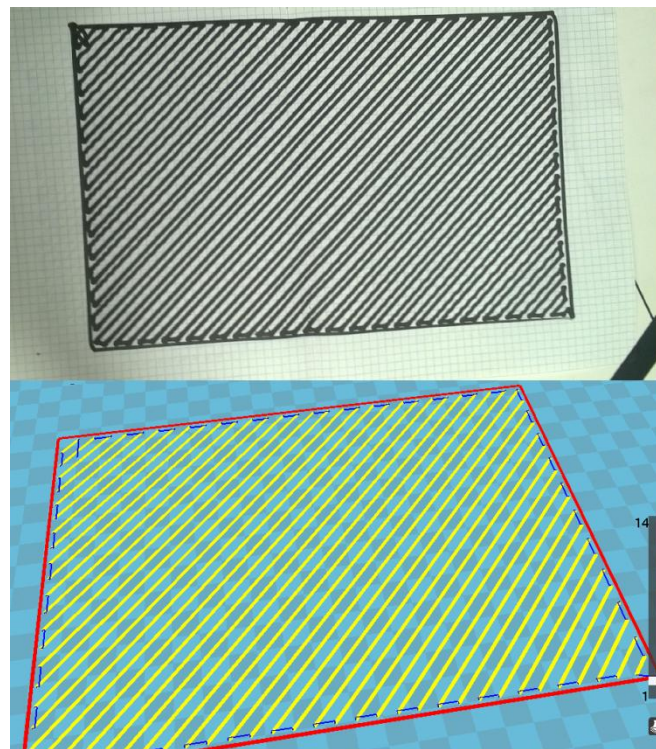
### 8.1 Ülevaade

Veendumaks tark- ja riistvara toimivuses tuli selle töö käigus loodud süsteemi katsetada.

Katsetused lähtusid ülesandelehel püstitatud eesmärkidest – katsetava süsteemi osaga prooviti teostada talle ette nähtud ülesanne ning eduka täitmise korral loeti see töö osa õnnestunuks.

### 8.2 LabView juhttarkvara, G-koodi interpretaator, liidestus vabavaralise 3D printeri tarkvaraga

Tarkvaralise komponendi katsetuseks koostati programmis Solidworks lihtsa objekti (tellis) mudel, mis salvestati .STL formaati ning avati Cura keskkonnas. Curaga genereeriti objektist 3D printeri kasutatav G-kood ning avati LabView kasutajaliideses. Pärast roboti markerihoidja algpositsiooni seadistamist paberiga kaetud tööpinna suhtes (käsud G92 ja G55), käivitati LabView kasutajaliidesest G-koodi kontrolleri edastamine. Pärast esimese materjalikihi trajektoori läbimist printimine katkestati. Seejärel võrreldi roboti poolt jäädvustatud kujutist ning programmis Cura genereeritud rada esimese materjalikihi jaoks (Sele 8.1).

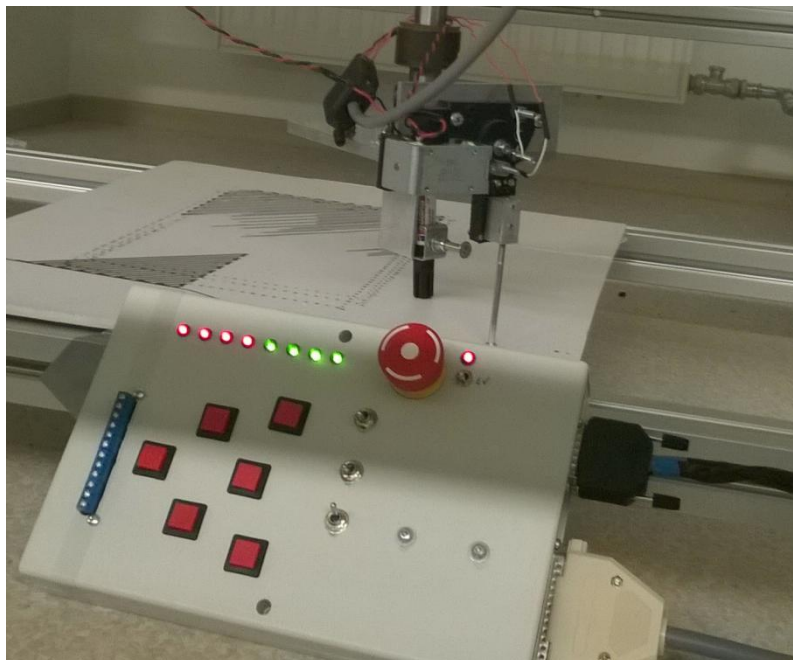


Sele 8.1 Roboti poolt jäädvustatud trajektoor võrrelduna Cura poolt koostatuga

Katsetuse võis lugeda edukaks. Roboti poolt läbitud trajektoor ühtis Cura genereerituga nii kujult kui mõõtmetelt. Püstitatud eesmärk luua LabView juhttarkvara, G-koodi interpretaator ja liidestus vabavaralise 3D printeri tarkvaraga on saavutatud.

### **8.3 Täiendatud kaabeldus, väline kasutajaliides, NI USB DAQ moodul**

Katsetamise käigus kontrolliti üle paigaldatud kaabelduse ühendused ning veenduti nende toimivuses. Välise kasutajaliidese tarbeks kirjutati roboti testprogramm, mille abil indikaatorite ja nuppude funktsioone kontrollida. Sisuliselt seisnes see LED indikaatorite süütamises vastavalt nupuvajutusele (Sele 8.2).



Sele 8.2 Indikaatorite ja kalibratsioonianduri solenoidi lülituse test

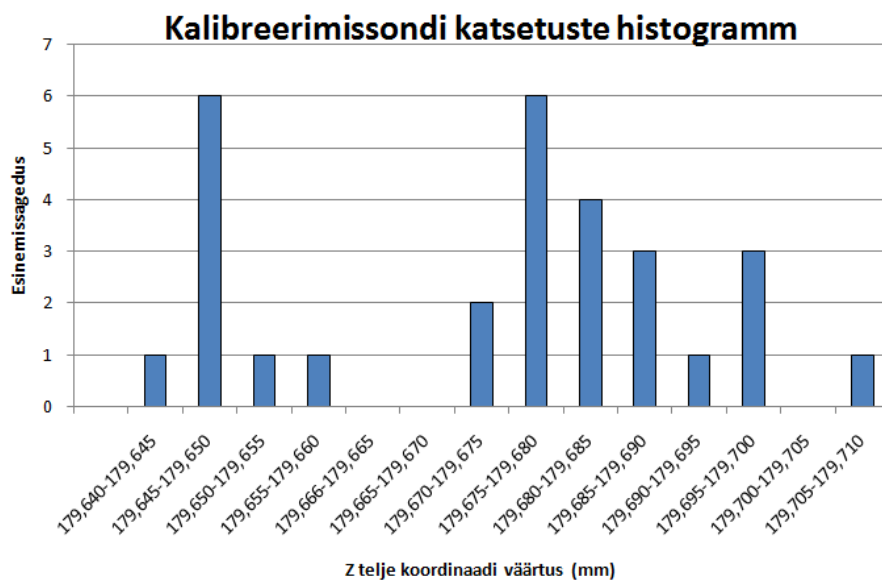
NI DAQ mooduli test seisnes selle arvutiga ühendamises ning andmeside toimimise katsetamises (LabView abil) roboti telgede liigutamise ajal, kontrollimaks võimalikke mürast tingitud häirete olemasolu, mis võivad olla põhjustatud USB kaablite lähedal paiknevatest roboti teljestiku ajamite toite ja signaalkaablitest.

## 8.4 Kalibratsioonimoodul

### 8.4.1 Kalibreerimissondi täpsuse hindamine

Katsetamaks kalibreerimisanduri omadusi viidi läbi kaks katset. Esimene neist oli 30 mõõtmise sooritamine ühes ja samas punktis (roboti alla paigutatud kõva metallpind)

Tulemused kanti histogrammi (Sele 8.3) ning seejärel analüüsiti mõõtemääramatust kordvuse kriteeriumist, mis samadel tingimustel läbi viidud katse puhul võib esitada kordusmõõtmiste standardhälvena [25].

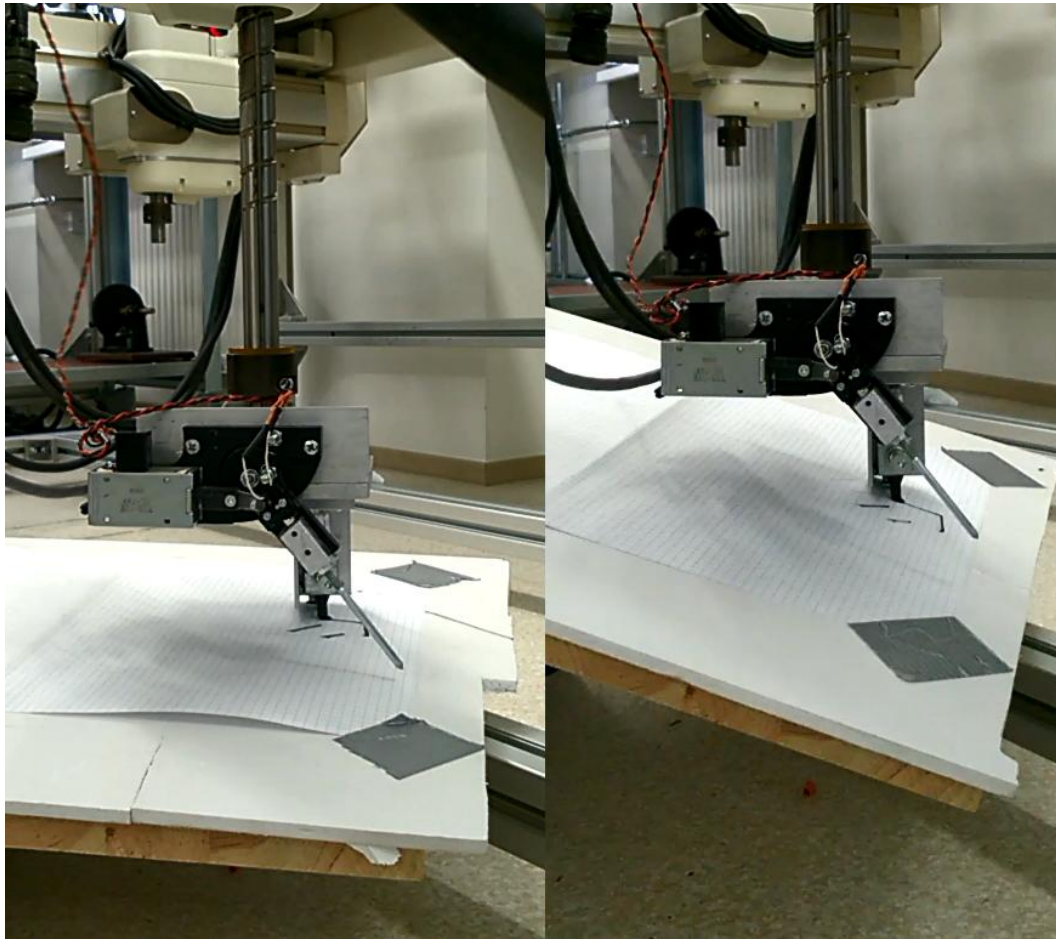


Sele 8.3 Katsetulemuste histogramm

Suurim mõõdetud Z väärtus oli 179,708mm ja väikseim 179,643mm. Mõõtetulemuste keskvärtus oli 179,674mm ning standardhälve 0,019mm. Võrreldes tööstusliku anduriga [27] on tegu halva tulemusega, aga 3D printimise või markeerimise tarbeks, kus tüüpilise materjali voolavus või markerkinnituse paindlikus on võimelised mõõteviga kompenseerima võib koostatud andurit pidada ülesande tingimusi rahuldavaks ning katset edukaks.

### 8.4.2 Kalibreerimisalgoritmi katsetamine

Katsetus seisnes kalibreerimisalgoritmi rakendamises lihtsa kujundi joonistamises kaldpinnale ja selle kordamises pärast pinna nurga muutumist. Katsetuse võib lugeda edukaks – robot suutis joonistada kahele erineva kaldenurgaga tasapinnale ühesugused kujundid (Sele 8.4)



Sele 8.4 Kalibreerimisalgoritmi katsetus. Vasakul horisontaalpind, paremal kaldpind.

Kokkuvõtvalt võib kogu süsteemi testimise lugeda edukaks. Töö käigus koostatud lahendused toimisid ootuspäraselt ja suutsid täita neile seatud eesmäärke hea kvaliteediga.



## KOKKUVÕTE

Selle bakalaureusetöö teema oli pakutud Tallinna Tehnikaülikooli Mehhatroonikainstituudi mehhatroonikasüsteemide õppetooli poolt ja oli tehtud Ahti Põlderit juhendamisel. Töö põhimõtte seisnes olemasoleva roboti funktsioonide täiendamises ning sellele universaalse, 3D printimise rakendusteks sobiliku juhtimistarkvara loomises.

Tarkvara kirjutamise etapil lahendati probleeme, mis tekivad suure koguse käskude saatmisel (andmevookontroll) ning robot tehti juhitavaks kaasaegse tarkvara (LabView) poolt. Loodi robotit juhtiv kontrolleri tarkvara ning sellele käske saatev kasutajliides LabView-s. Elektroonika osas täiendati roboti funktsionaalsust ning parandati ka ohutust paindliku ja kergelt laiendatava hädastopi ahela lisamise näol. Mehaanika osas muudeti robotitele erinevate moodulite kinnitamine lihtsamaks tänu uuele ja laiemale tööriistakinnitusele, mis võimaldab objekte kinnitada ka vertikaalasendis. Lõputöö õigustab end ka majanduslikust küljest, sest sellise universaalse süsteemi loomine vähendab vajadust uute rakenduse loomisel kulutada ressursi spetsiaalse roboti jaoks.

Kokkuvõtteks, käesoleva töö kirjutamise tulemusena võib öelda, et tehtud töö on teeninud oma eesmärgi ning antud projekti võib kasutada nii 3D printimise rakendusena kui ka luua edasisi Hirata roboti rakendusi. Lisatud funktsioonid tagavad suure paindlikkuse tulevaste rakenduste poolt nõutava riistvara (andurid, kontrollid, ajamid, indikaatorid) ühendamiseks.

## SUMMARY

The topic of this BSc thesis was offered by the Mechatronic Systems Chair of the Mechatronics Institute of the Tallinn University of Technology and was conducted under the supervision of Ahti Põlder. The goal of the work was to improve the functionality of an existing robot and creating for it a multipurpose guidance software suited for 3D printing.

In the software writing part, problems involving data flow control were solved and the robot was interfaced with the LabView graphical user interface produced in this thesis.

In the part of the work involving electronics, the existing functionality of the robot was augmented by the addition of a mechanical user panel with a flexible and easily extendable emergency stop circuit. During the work, problems with the second Hirata controller were also solved by replacing a fuse. In the mechanical component of the thesis, attaching various tool to the robot axes was simplified by a designing new and more spacious tool mount, which as a new feature allows objects to be mounted in the vertical plane.

The thesis work is justified from the economic viewpoint, as creating a universal system reduces the need to purchase a purpose built machine when developing new applications.

In conclusion, the results of this work have served a beneficial purpose and this project can be used in developing further applications with the Hirata robot. The installed functions offer a large spectrum of flexibility that can meet the demands of future hardware applications (such as sensors, controllers, drives and indicators).

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Hirata Corporation, MB-202A 100A Series user's guide (HD-3832E-3), 1998
- [2] MakerBot Replicator [WWW] <http://store.makerbot.com/replicator> (25.03.2016)
- [3] Prusa i3 [WWW] <http://reprap.org/wiki/Prusa> (4.04.2016)
- [4] Harl-III reference manual [PDF] <http://www.hirata.de/downloads/manuals/IM-0041-6.pdf>
- [5] Cura [WWW] <https://ultimaker.com/en/products/cura-software> (10.05.2016)
- [6] Repetier [WWW] <https://www.repetier.com/> (10.05.2016)
- [7] Slic3r [WWW] <http://slic3r.org/> (10.05.2016)
- [8] Mattercontrol [WWW] <http://www.mattercontrol.com/> (10.05.2016)
- [9] LabView programmi struktuurid [PDF] [http://www.physics.utah.edu/~bergman/3620-6620/supp/LV\\_Adv\\_Prog/2049ch03.pdf](http://www.physics.utah.edu/~bergman/3620-6620/supp/LV_Adv_Prog/2049ch03.pdf) (29.03.2016)
- [10]. ASCII sümbolite tabel [WWW]  
[http://academic.evergreen.edu/projects/biophysics/technotes/program/ascii\\_std.htm](http://academic.evergreen.edu/projects/biophysics/technotes/program/ascii_std.htm)  
(11.05.2016)
- [11] G-koodi standard [WWW] <https://www.evs.ee/tooted/iso-6983-1-2009> (10.05.2016)
- [12] Fanuc G-kood [WWW] <http://www.helmancnc.com/fanuc-g-codes-list/> (11.05.2016)
- [13] Sinumerik G-kood [PDF]  
[https://cache.industry.siemens.com/dl/files/403/28755403/att\\_79171/v1/PGT\\_0407\\_en.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/403/28755403/att_79171/v1/PGT_0407_en.pdf)  
(11.05.2016)
- [14] RepRap Wiki G-kood [WWW] <http://reprap.org/wiki/G-code> (11.05.2016)
- [15] NI-USB moodul [WWW] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/201987>  
(11.05.2016)
- [16] Climb vs. Conventional cut [WWW]  
<http://www.leevalley.com/us/shopping/TechInfo.aspx?p=56809> (11.05.2016)
- [17] Solenoidi valimine [WWW]  
<http://www.solenoidcity.com/solenoid/manual/selection/selectionfactors.htm> (11.05.2016)
- [18] XON-XOFF [PDF]  
[http://www.moxa.com/resource\\_file/509820091121333.pdf](http://www.moxa.com/resource_file/509820091121333.pdf) (14.05.2016)
- [19] State machine [PDF]  
<http://www.cse.chalmers.se/~coquand/AUTOMATA/book.pdf> (15.05.2016)

[20] RS-12 relee [PDF]

<http://www.tme.eu/gb/Document/c23d5af46047cd50f4ab84101c968917/rs.pdf> (15.05.2016)

[21] NX [WWW]

[https://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/nx/](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/) (19.05.2016)

[22] Elektri ja pneumoajamid. [WWW]

<http://www.designworldonline.com/pneumatics-vs-electrics-a-niche-for-each/>

[23] Stuart Ball, (2001) Analog Interfacing to Embedded Microprocessors, lk 138

[24] Hirschmann 4mm pistik [PDF] <http://www.farnell.com/datasheets/23251.pdf>  
(15.05.2016)

[25] Veearvutus [PDF] [http://tera.chem.ut.ee/~ivo/metro/u\\_2.pdf](http://tera.chem.ut.ee/~ivo/metro/u_2.pdf), lk 3 (16.05.2016)

[26] LED indikaator <https://www.elfadistrelec.ee/et/led-indicator-roheline-vdc-marl-352-512-04/p/30028550?q=led+indicator&sort=Price:asc&page=3&origPos=472&origPageSize=10&simi=97.77> (18.05.2016)

[27] Puuteandur [http://www.centroidcnc.com/downloads/dp4\\_probe\\_manual.pdf](http://www.centroidcnc.com/downloads/dp4_probe_manual.pdf) (19.05.2016)

[28] Rannamäe, M.(2016) *Fiberglass pultrusion system for manufacturing spatial structures*: magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn

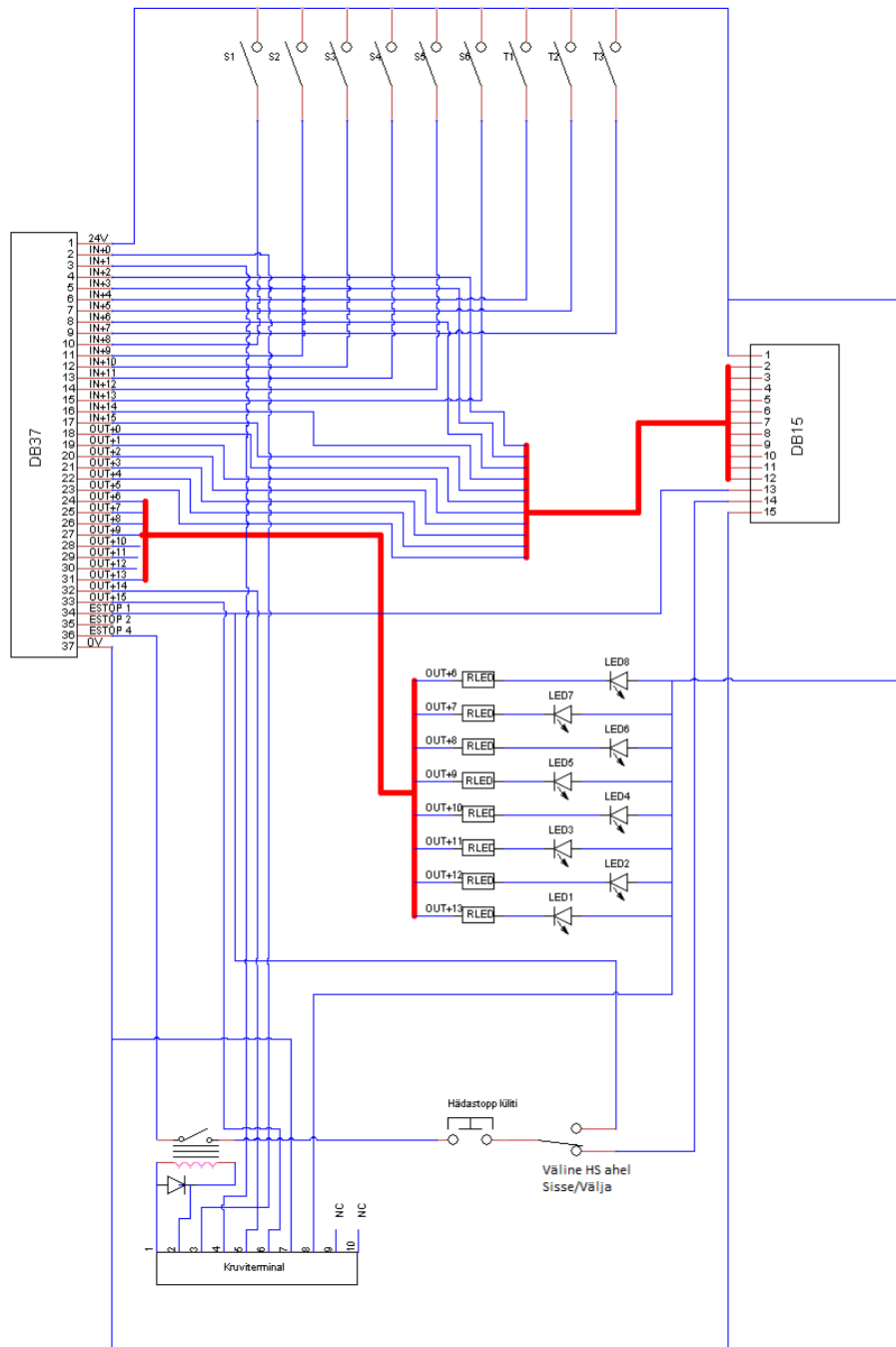
[29] TinyCad <https://sourceforge.net/projects/tinycad/> (19.05.2016)

[30] Grupp 3, (2008) Laisa mehe doomino: Üliõpilasprojekt. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn

[31] SolidWorks <http://www.solidworks.com/> (19.05.2016)

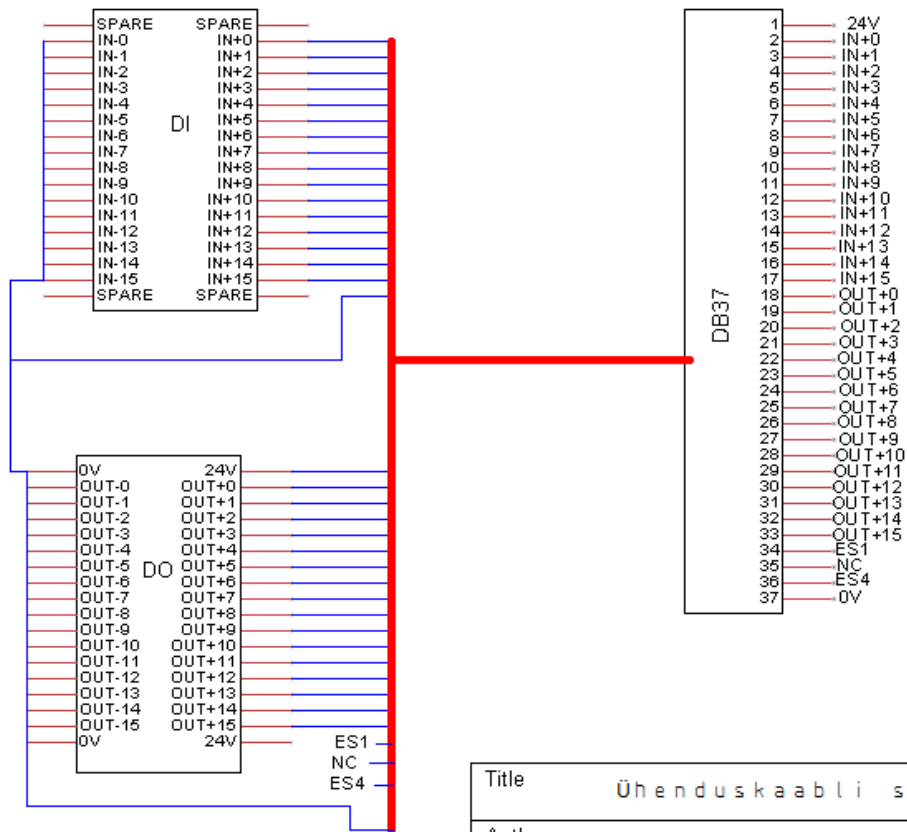
# LISAD

## LISA 1 Kasutajaliidese sisemise skeemi sele.



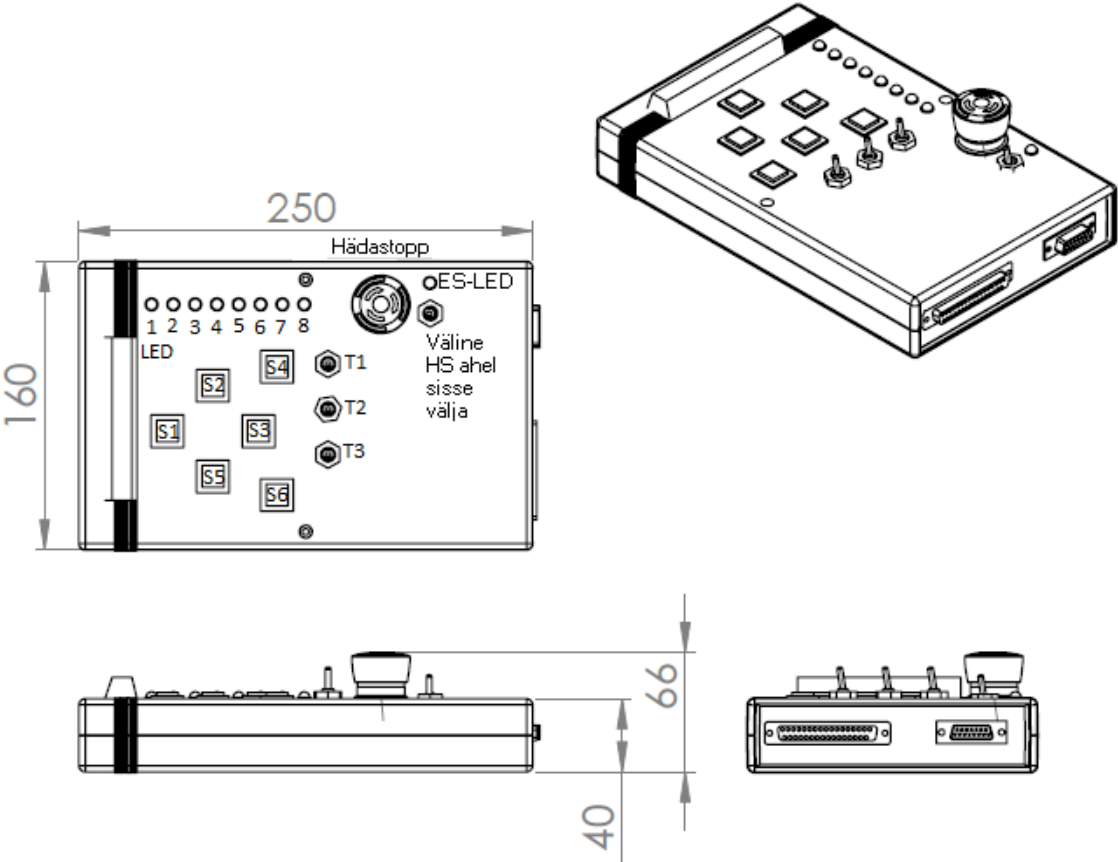
Title Kasutajaliidese elektriskeem		
Author 121132MAHB		
File	Document	
õputöö\Joonised jm\kasutajaliidese elektriskeem		
Revision 1.0	Date	Sheets 1 of 1

# LISA 2 Ühenduskaabli skeemi sele

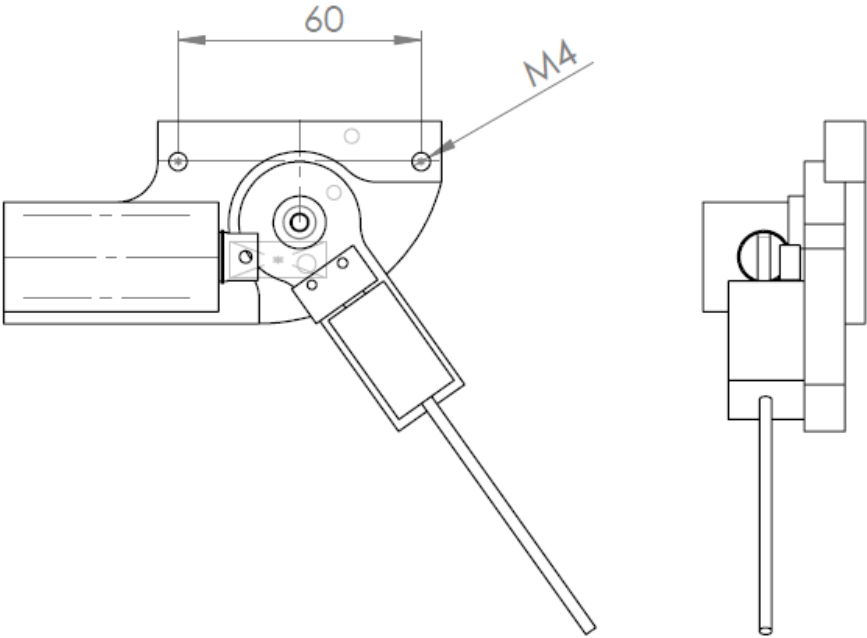


Title		Ühenduskaabli skeem	
Author		121132MAHB	
File	:\Users\k5520\Desktop\Lõputöö\Joonised jm\kiire		Document
Revision	Date	Sheets	
1.0		1 of 1	

# LISA 3 Mehaanilise kasutajalidese sele

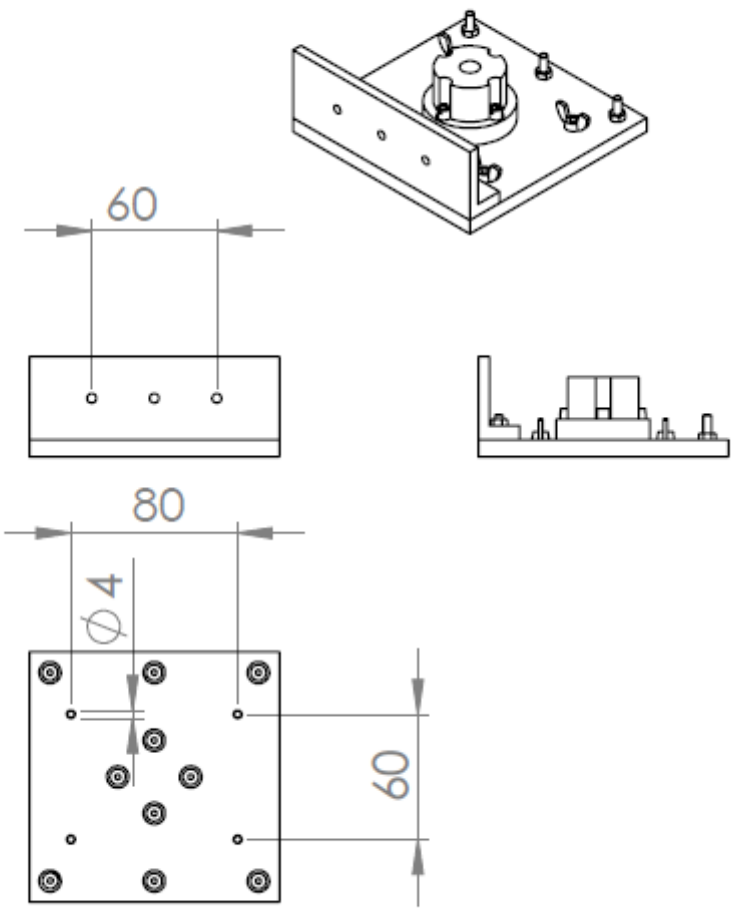


**LISA 4 Kalibreerimismooduli sele**

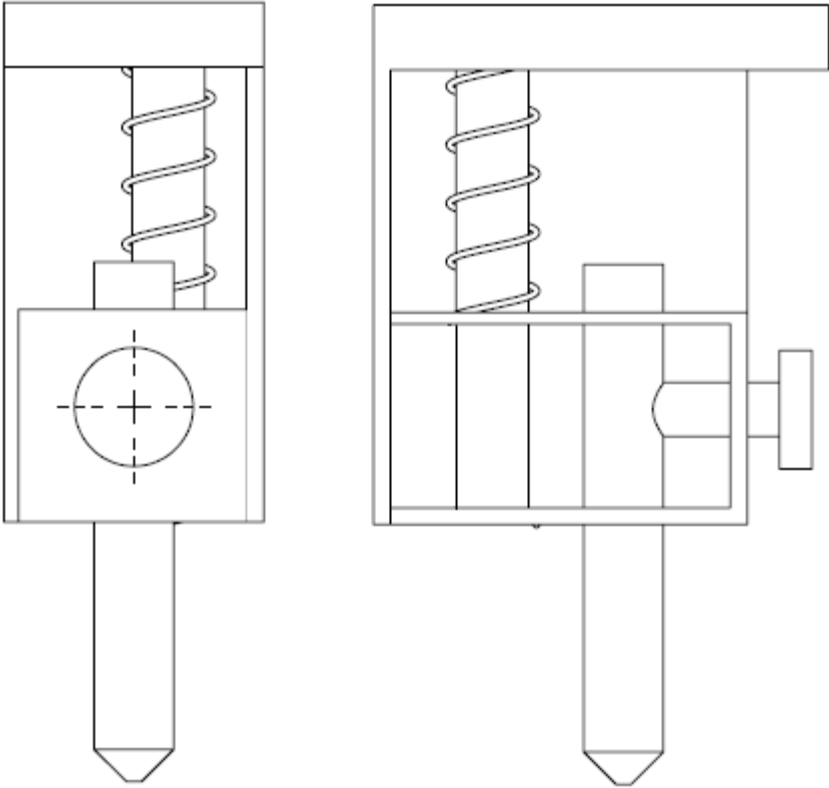




LISA 5 Tööriistarakise sele



**LISA 6 Markerpliatsi kinnituse sele**



## LISA 7 Tööga kaasasoleval andmekandjal olevate failide tabel

Faili nimi	Kirjeldus
Hirata.zip	Kontrolleri tarkvara. Failid ComProc.bas, LinkProc.bas, MProces.bas ja Defines.hed, mille sisuks on vastavalt Job “Protsessor”, Job “Jadaport”, Job “MP” ning muutujate definitsioonid. .bas failid avanevad HARL III Editor abil ning on kommenteeritud.
LabView_UI.zip	LabView kasutajaliidese faile sisaldav arhiiv. HIRATA_LabView_UI.vi on kasutajaliidese peamine VI, mis tuleb käivitada, et kasutajaliidest kasutada.
CADCAM.zip	Skeeme, 3D mudeleid, lõiketrajektoore jt. mehaanilise projekteerimisel koostatud materjale sisaldav arhiiv
Video_Foto.zip	Süsteemi tööd demonstreerivaid videosid ja fotosid sisaldav arhiiv.

# LISA 8 LabView kasutajaliidese esipaneel

