



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

VANEMA PÕLVKONNA TÖÖSTUSROBOTITE
ANDMESIDEVÕIMALUSTE ARENDAMINE JA
HAARATSI DISAINIMINE

BAKALAUREUSETÖÖ

MEHHATROONIKA ÕPPEKAVA

Üliõpilane: René Pihlak

Üliõpilaskood: 134382MAHB

Juhendaja: Margus Müür

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Lõputöös kasutatud kõik teiste autorite tööd ja seisukohad ning materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis Margus Müüri juhendamisel

“.....” 2017. a.

Töö autor:

/allkiri/

Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele

“.....” 2017. a.

Juhendaja:

/allkiri/

Lubatud kaitsmisele

“.....” 2017. a.

..... õppekava lõputööde kaitsmiskomisjoni esimees:

/allkiri/

TTÜ Inseneriteaduskond

BSc LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

2017 aasta kevadsemester

Üliõpilane: René Pihlak, 134382MAHB (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: mehhatroonika
Juhendaja: insener, Margus Müür (amet, nimi)

LÕPUTÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Vanema põlvkonna tööstusrobotite andmesidevõimaluste arendamine ja haaratsi disainimine
(inglise keeles) Development of Communication Options and Design of Gripper for Industrial Robots of Older Generation

Lõputöö põhieesmärgid ja lahendatavad ülesanded ning töö koostamise kava:

Nr	Tegevus	Tähtaeg
1	ABB tööstusrobotite andmeside võimaluste ülevaade	märtsi keskel
2	Riistvaralised ühendused robotite vahel (lisa riistvara vajadus)	märtsi lõpp
3	Andmeside protokoll koos näidislahendusega	märtsi lõpp
4	Tööriista disain	aprilli esimene nädal
5	Näidislahenduse täiendamine	aprilli viimane nädal
6	Esialgse lõputöö mustandi esitamine juhendajale	mai esimene nädal

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Oskustöölise leidmine on raske. Seega robotite kaasamisel tootmisse on võimalik lahendada tööjõu puuduse probleemi. Roboti kasutamiseks on vaja disainide tööriist, mis sobib mööblitootmisse. Kuid robotite maksumus on suur. Vanema põlvkonna (kasutatud) tööstusrobotite kaasamine modernsesse tootmisse võimaldaks ettevõttel oluliselt kulusid kokkuhoida. Kuid vanematel robotitel (ja kontrolleritel) ei ole näiteks interneti teel juhtimise võimalust. Seega töö üheks eesmärgiks on analüüsida robotile lisafunktsioonide lisamise võimalust.

Täiendav info ja nõuded:

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt Töö esitamise tähtaeg

Üliõpilane: René Pihlak /allkiri/ “.....” 2017. a.

Juhendaja: Margus Müür /allkiri/ “.....” 2017. a.

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

Sisukord

Eessõna	4
1 Sissejuhatus	8
2 Probleemi püstitus ja ülevaade kirjandusest	10
2.1 Ettevõtte kirjeldus	10
2.2 Tööstusrobotid ja kontrollid	11
2.2.1 ABB tööstusrobot IRB 6600-175/2.8	11
2.2.2 ABB tööstusrobot IRB 1400	14
2.2.3 Kontrollid S4C ja S4CPlus	15
2.2.4 Olemas olev tarkvara	17
2.3 Töö eesmärk	17
2.4 Ülevaade kirjandusest	18
3 Andmevahetus roboti ja väliskeskkonna vahel	19
3.1 Kontrollerite S4CPlus ja S4C andmeside käsustik	19
3.1.1 Järjestikpordiga seotud RAPID käskude võrdlus	20
3.1.2 ABB protokollide pöördprojekteerimine	22
3.2 Andmevahetus serverarvuti ja roboti/kontrolleri vahel	26
4 Haarats	28
4.1 Haaratsi eesmärk ning alternatiivid	28
4.2 Pneumohaaratsi tugevusarvutuste programm	30
5 Süsteemi komponentide valik ja skemaatika	34
5.1 Roboti ja kontrolleri valik	34
5.2 Pneumohaaratsi komponentide valik	36
5.3 Skemaatika	42
6 Kokkuvõte	43
7 Summary	45
Kasutatud kirjandus	50
Lisa 1 – Pneumaatika komponentide hinnapakumine	51
Lisa 2 – Pneumaatikaskeem	53
Lisa 3 – Ühendusskeem	54

Eessõna

Lõputöö teema anti välja ettevõtte Holzmaier OÜ poolt, kus toimus tööga seotud praktiliste ülesannete analüüs ja lahendamine.

Autor soovib tänada järgmisi inimesi: Margus Müür (TTÜ poolne juhendaja), Kaspar Tees (ettevõtte Holzmaier OÜ juhatuse liige), Ellen Parik ja Indro Dsilna (SMC Pneumatics Estonia OÜ) ning Ergo Raid (ABB AS).

Lühendite ja mõistete sõnastik

ABB	<i>ASEA Brown Boveri</i> , Rootsi-Šveitsi rahvusvaheline korporatsioon
CAN	<i>Controller Area Network</i> , kontrollervõrk
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> , arvjuhtimine
COM-port	<i>communication port</i> , järjestikport
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , tsükkelkoodkontroll
FDD	<i>Floppy Disk Drive</i> , flopiajam, disketiajam
FTP	<i>File Transfer Protocol</i> , failiedastusprotokoll
IO	<i>Input-Output</i> , sisend-väljund
KUKA	<i>Keller und Knappich Augsburg</i> , Saksa robotite tootmisettevõte
QMT	<i>Quick Mount Tool</i> , kiirkinnitus
RAPID	programmeerimiskeel ABB robotitele
ROS	<i>Robot Operating System</i> , roboti operatsioonisüsteem, programmide kogumik robotitega suhtlemiseks ning nende programmeerimiseks
RPC	<i>Remote Procedure Call</i> , kaugprotseduurikutse
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , universaal-jadasiin

Jooniste loetelu

1	<i>ABB industriaalrobotid IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400</i>	11
2	<i>ABB roboti IRB 6600-175/2.8 tööruum</i>	12
3	<i>IRB 6600-175/2.8 lubatud teisaldatav mass</i>	13
4	<i>IRB 6600-175/2.8 lubatud teisaldatav mass vertikaalse käelabaga ($\pm 10^\circ$)</i>	13
5	<i>ABB roboti IRB 1400 tööruum</i>	14
6	<i>ABB roboti IRB 1400 teisaldatav mass</i>	14
7	<i>ABB kontrollid S4C ja S4CPlus</i>	15
8	<i>ABB kontrollite S4CPlus ja S4C juhtpult</i>	16
9	<i>Kontrolleri järjestikpordi kaudu andmete saatmine</i>	22
10	<i>Arvuti järjestikpordi kaudu andmete salvestamine</i>	23
11	<i>Bless hex-koodi redaktor</i>	23
12	<i>Andmete näide: pos</i>	24
13	<i>Andmete näide: robtarget</i>	24
14	<i>Andmete näide: ebastandardsed paketi paised</i>	25
15	<i>Lihtne iminappade tugevusarvutus</i>	31
16	<i>Jõumomendi mõju iminapale</i>	33
17	<i>Kiirpaigaldustööriist</i>	35
18	<i>Iminappade tugevusarvutus plaadile 700 × 560 mm</i>	38
19	<i>Iminappade tugevusarvutus plaadile 700 × 320 mm</i>	39
20	<i>Iminappadele mõjuvad jõud vertikaalse 700 × 320 mm plaadi tõstmisel</i>	40
21	<i>Iminappadele mõjuvad jõud horisontaalse 700 × 320 mm plaadi tõstmisel</i>	40
22	<i>Iminappadele mõjuvad jõud vertikaalse 700 × 560 mm plaadi tõstmisel</i>	41
23	<i>Iminappadele mõjuvad jõud horisontaalse 700 × 560 mm plaadi tõstmisel</i>	41

Tabelite loetelu

1	<i>Osanikud ja juhatas</i>	10
2	<i>Töötajad</i>	10
3	<i>ABB kontrollid S4C ja S4CPlus</i>	15
4	<i>Andmevahetuse võimalused ABB kontrollitel S4C ja S4CPlus</i>	16
5	<i>ABB kontrollite S4C/S4CPlus RAPID käsud järjestikpordi jaoks</i>	19
6	<i>Pöördprojekteeritava andmepaketi struktuur</i>	24
7	<i>Serveri ja kliendi vahelise andmeside protokoli näide</i>	27
8	<i>Tõstetavate detailide andmed</i>	29
9	<i>Tõstmise otsustusmaatriks</i>	30
10	<i>Roboti lõpliku valiku otsustusmaatriks</i>	34
11	<i>Kontrolleri lõpliku valiku otsustusmaatriks</i>	35
12	<i>Kiirpaigaldustöörista osade hinnad</i>	35
13	<i>Iminapale rakenduvate jõudude piirmäärad alarõhul 60000 Pa</i>	36
14	<i>Iminappade suuruse ja paigutuse otsustusmaatriks</i>	37

1 Sissejuhatus

Ettevõtte Holzmaier OÜ (edaspidi *Holzmaier*) tegevusest lähtuvalt kerkis vajadus analüüsida tootmisprotsesi automatiseerimise võimalust. Kuivõrd oskustöölisi on raske leida, siis ettevõtte otsivad alternatiivseid lahendusi. Sealjuures automatiseerimise eesmärk ei ole inimeste asendamine seadmetega, vaid tõsta olemasolevate töötajate tööviljakust.

Köögimööbli tootmisel kasutatakse toormaterjalina peamiselt puitlaastplaate. Kohapeal lõigatakse suurtest puitlaastplaatidest välja detailid, mida seejärel tuleb töödelda erinevate seadmetega. Vajaliku tööriistaga varustatud tööstusrobotiga saaks neid plaate tõsta ettenähtud seadmetele. Muuhulgas vähendaks see töötajate füüsilist koormust.

Kuid tööstusrobotid on hinna poolest kallid. Uus tööstusrobot maksab ligi kümme korda rohkem kui kasutatud robot. See tähendab, et uue roboti tasuvusaeg on kümme korda pikem kui kasutatud robotil. Sellest tulenevalt on kasutatud tööstusrobotite kasutamine alternatiiv, mida ei tohiks ilma analüüsimata välja jätta. Tööstusrobotite järelturul on levinud selle sajandi alguses toodetud robotid. Paljud nendest on piisavalt heas korras, et mööblitootmises kasutada.

Käesolevas töös analüüsitakse ABB (*ASEA Brown Boveri*, Rootsi-Šveitsi rahvusvaheline korporatsioon) tööstusroboteid IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400. Need robotid asuvad ettevõtte Holzmaier tootmisruumides, kuid ei osale veel tootmises. Kuivõrd robotid on juba soetatud, siis alternatiivkulu on null. Robot või robotid tuleb rakendada. Seega ettevõtte Holzmaier situatsioon erineb keskmisest ettevõttest, kuid tehtav analüüs sobib ka ettevõttele, mis ei ole roboteid veel soetanud.

Peamine puudus vanemate tööstusrobotite puhul on see, et nende kontrollid ei ole nii võimekad kui kaasaegsed kontrollid. Seega paljud tänapäeval iseenesest mõistetavad võimalused puuduvad. Näiteks originaalversioonis ABB kontrollid S4C ja S4CPlus ei oma USB-liidest (*Universal Serial Bus*, universaal-jadasiin). Programmide laadimiseks on vaja kasutada FDD (*Floppy Disk Drive*, flopijalam, disketiajam). Sageli puudub ka internetiliidestus.

Sellest tulenevalt on käesoleva uurimistöö eesmärkideks: väljatöötada protokoll roboti/kontrolleri ja serverarvuti vahelise andmeside jaoks ning disainida tööriist puitlaastplaat detailide tõstmiseks.

ABB tööstusroboti IRB 1400 kasutamise kohta on tehtud mõned uurimistööd, kuid IRB 6600-175/2.8 kohta on raskem leida tehtud töid. Näiteks on uuritud IRB 1400 juhtimist

kasutades veebikaamerat ja masinnägemist [25] ning võimalust luua lisa võimalusi andmeside jaoks [29].

Teema on aktuaalne, sest oskustöölise osakaal Eestis väheneb. Samuti on aktiveerunud tööstusrobotite järelturg. Lisaks sellele on konkreetselt ettevõttes Holzmaier praktiline vajadus saavutada käesolevas töös püstitatud eesmärgid, sest robotid on soetatud, kuid hetkel võtavad vaid ruumi ja ei osale tootmises.

Töö eesmärgi saab jagada järgnevateks ülesanneteks: probleemi püstitus, robotite ja kontrollerite analüüs, andmeside analüüs, haaratsiga seotud analüüs ning alternatiivide hulgast sobivama lahenduse valimine. Esmalt tutvutakse ettevõtte tegevusega, sest ettevõtte spetsiifikast lähtuvalt tuleb leida lahendus. Seejärel analüüsitakse olemas olevate robotite (IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400) ja kontrollerite (S4CPlus ja S4C) omadusi. Järgnevas analüüsitakse kuidas veakindlalt andmeid vahetada roboti/kontrolleri ja väliskeskkonna ehk serverarvuti (Raspberry Pi 3 Model B) vahel. Tööriista disainimiseks analüüsitakse erinevate tööriistade ja haaratsite eeliseid ja puuduseid. Tehtud analüüside põhjal teostatakse lõplik valik, st millist robotit ja kontrollerit peaks kasutama ning millist haaratsit on vaja detailide töstmiseks.

Lahenduste leidmisel on lähtutud sellest, et projektis peaks kasutama võimalikult vähe kolmandate osapoolte spetsiaaltarkvara. Tehniliste jooniste tegemisel on kasutatud tarkvara QElectoTech ja SolidWorks. Ülejäänud tarkvara on kas autori enda kirjutatud või operatsioonisüsteemi *Linux* standard tarkvara.

Graafilises osas on üks joonis pealkirjaga *Haaratsi tehniline joonis*.

2 Probleemi püstitus ja ülevaade kirjandusest

2.1 Ettevõtte kirjeldus

Holzmaier on peamiselt eritellimusprojektide teostamisele keskendunud (köögi-) mööblitootja [30]. Ettevõtte juriidilised andmed äriregistri kohaselt on järgmised [37]:

1. Ärinimi on Holzmaier OÜ.
2. Aadress on Vana-Kalamaja tn 34-129, Põhja-Tallinna linnaosa, Tallinn, Harju maakond, 10415.
3. Osakapital on 40 000 Eesti krooni.
4. Õiguslik vorm on osäühing.
5. Põhikiri on kinnitatud 25.06.2008.
6. Majandusaasta algab 01.01 ja lõpeb 31.12.

Ettevõtte on registreeritud Tallinnas, kuid tootmishoone paikneb Tabasalus. Tootmine on peamiselt projektipõhine. Ettevõtte ei tegele katalogitoodete tootmisega, st enamus tellimusi teostatakse vastavalt tellija joonistele või kirjeldustele. 2017. aastal keskendutakse peamiselt Eesti ja Soome turule. Valdav osa toodangust on valmistatud puitlaastplaadist.

Holzmaieri juhatus on tegutsenud muutmata kujul viimased neli aastat (vt Tabel 1), kuid töötajate arv on ühtlaselt kasvanud (vt Tabel 2). Osäühingut võib kõikide tehingute tegemisel esindada iga juhatuse liige [37].

Tabel 1. *Osanikud ja juhatus [37, 31]*

Nimi	Isikukood	Osaluse suurus
Kaspar-Patrik Loit	37206250274	20000 EEK
Ahto Hallikma	37211240213	16000 EEK
Kaspar Tees	37804230280	4000 EEK

Tabel 2. *Töötajad*

	2017	2016	2015	2014
Töötajate keskmine arv taandatud täistööajale	9 ¹	8 [32]	6 [32, 31]	4 [31]

Ettevõtte osanikud on ühtlasi ka ettevõtte juhatuse liikmed (vt Tabel 1).

¹Seisuga 31.03.2017.

Tootmiskompleks koosneb üld- ja tööruumidest. Üldruumid koosnevad järgmistest ruumidest: köök, riietusruum ja WC. Tööruumide mõttes koosneb tootmishoone neljast ruumist:

- tootmissaal,
- värvimiskoda,
- töökoda (mis ühtlasi on tõstukite garaaž) ja
- kontor.

Tootmises kasutatakse palju erinevaid masinaid ja seadmeid, sh CNC (*Computer Numeric Control*, arvjuhtimine) pinke, kuid palju on veel ka nõ käsitööd. Holzmaieri tootmishoones paiknevad kasutatud tööstusrobotid (vt Peatükk 2.2), kuid hetkel need robotid tootmisprotsessis ei osale. Tööstusrobotite kasutusele võtmiseks on vaja analüüsida kas neid roboteid on võimalik kasutada ning kui on võimalik, siis milliseid roboteid on võimalik kasutada.

2.2 Tööstusrobotid ja kontrollid

Holzmaieri tootmishoones on mitu kasutatud ABB tööstusrobotit² (vt Joonis 1). Käesolevas töös käsitletakse nendest kahte: IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400.



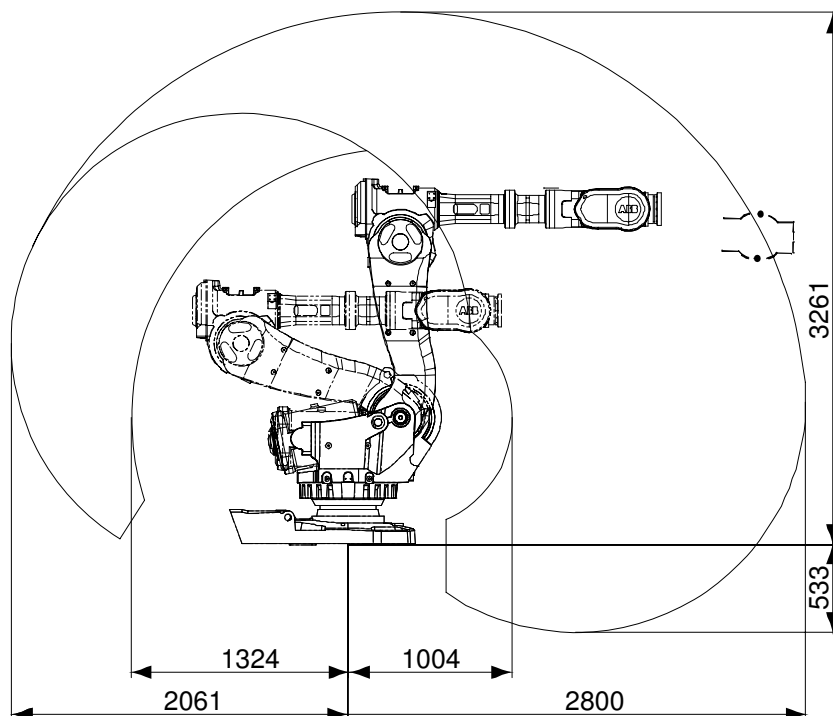
Joonis 1. ABB industriaalrobotid IRB 6600-175/2.8 (vasakul) ja 1400 (paremal)

2.2.1 ABB tööstusrobot IRB 6600-175/2.8

IRB 6600-175/2.8 haarde ulatus on 2,8 m (vt Joonis 2) ning teisaldatav mass on kuni 175 kg (vt Joonised 3 ja 4). Esimesele teljele võib lisada kuni 500 kg massi ning kolman-

²01.05.2017 seisuga on lisandunud ka KUKA (*Keller und Knappich Augsburg*, Saksa robotite tootmisettevõtte) tööstusrobot, kuid antud töös seda robotit ei käsitleta.

dale teljele kuni 50 kg [17]. IRB 6600-175/2.8 asenditäpsus on 0,03-0,13 mm, asendikorduse täpsus on 0,08 – 0,20 mm, rajatäpsus on 2,25 mm ning rajakorduse täpsus on 0,32 mm [15]. ABB käsiraamatu kohaselt on IRB 6600-175/2.8 peamiseks kasutusvaldkondadeks punktkeevitus, teiste seadmete abistamine ja materjalide käitlemine [15].

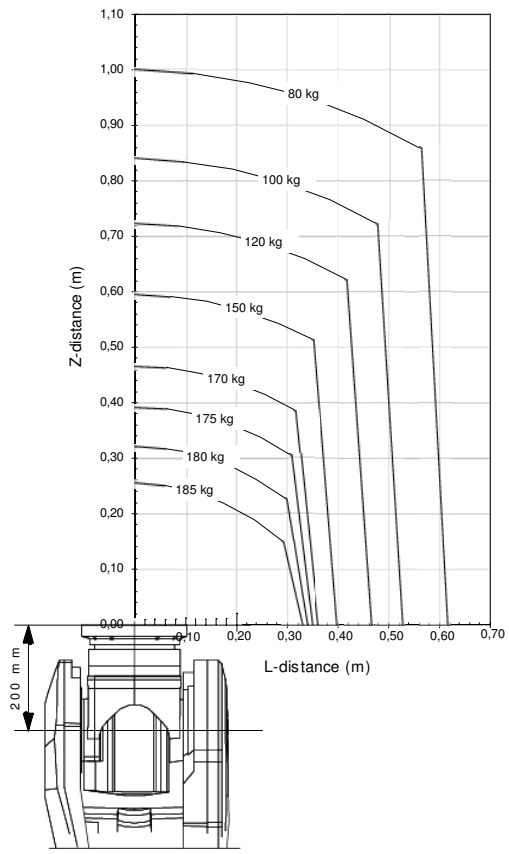


Joonis 2. ABB roboti IRB 6600-175/2.8 tööruum [15]

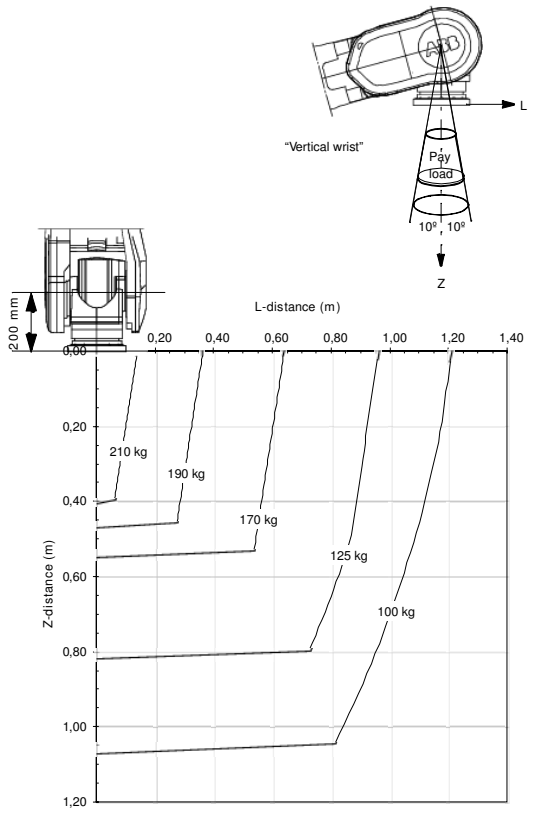
Kuna tööstusroboteid IRB 6600 on erinevates mõõtudes (sh haardeulatusega 2,55 m), siis brošüüris ei ole toodud roboti maksimaalset joonkiirust [17]. Kuid käsiraamatu andmete põhjal on manuaalrežiimis maksimaalne kiirus 0,25 m/s [15] ning kuna manuaalrežiimis on liikumiskiirus maksimaalselt 10% töörežiimi kiirusest, siis tuletatult saab IRB 6600-175/2.8 maksimaalseks joonkiiruseks 2,5 m/s.

Roboti manipulaatori mass on 1700 kg [17].

Algselt turustati tööstusroboteid IRB 6600-175/2.8 koos kontrolleri S4CPlus (vt Joonis 7), kuid S4CPlus asemel saab kasutada ka uuemat kontrolleri, näiteks IRC5.



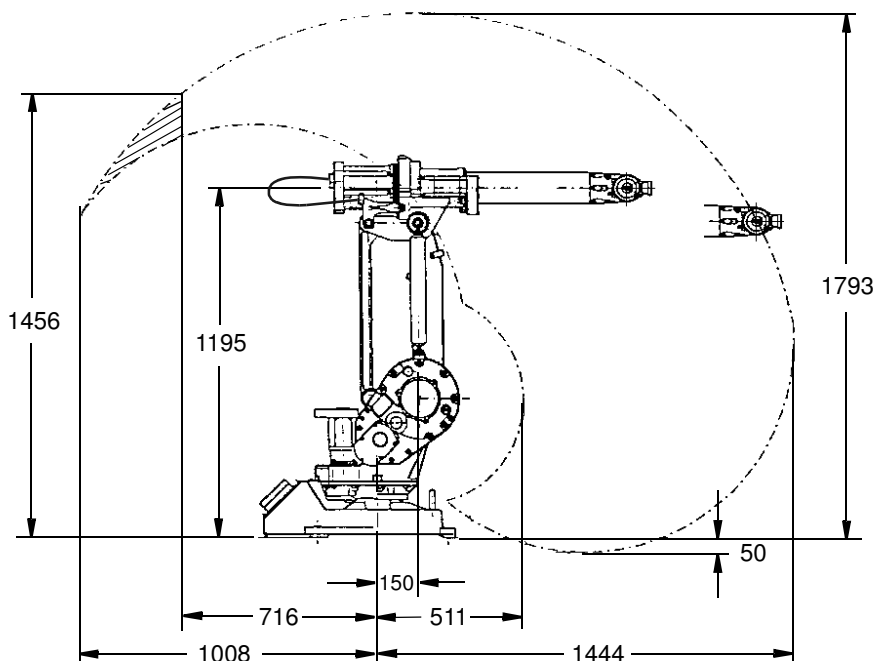
Joonis 3. IRB 6600-175/2.8 teisaldatav mass [15]



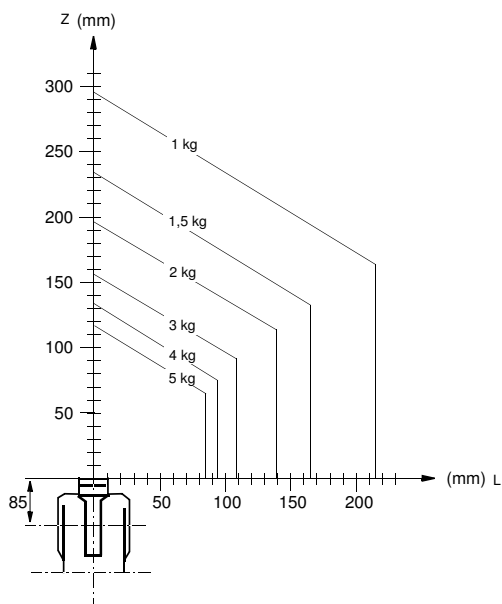
Joonis 4. IRB 6600-175/2.8 teisaldatav mass vertikaalse käelabaga ($\pm 10^\circ$) [15]

2.2.2 ABB tööstusrobot IRB 1400

IRB 1400 haarde ulatus on 1,44 m (vt Joonis 5) ning teisaldatav mass on kuni 5 kg (vt Joonis 6). Esimesele teljele võib lisad kuni 19 kg massi ning kolmandale teljele kuni 18 kg [16]. IRB 1400 asendikoduse täpsus on 0,05 mm, rajatäpsus on 0,45 – 1,0 mm ning rajakorduse täpsus on 0,14 – 0,25 mm [8]. ABB brošüüri kohaselt on IRB 1400 peamiseks kasutusvaldkondadeks kaarkeevitus, montaaž, liimimine, teiste seadmete abistamine ja materjalide käitlemine [16].



Joonis 5. ABB roboti IRB 1400 tööruum [8]



Joonis 6. ABB roboti IRB 1400 teisaldatav mass [8]

Tööstusroboti IRB 1400 maksimaalne joonkiirus on 2,1 m/s ning manipulaatori mass on 225 kg [16].

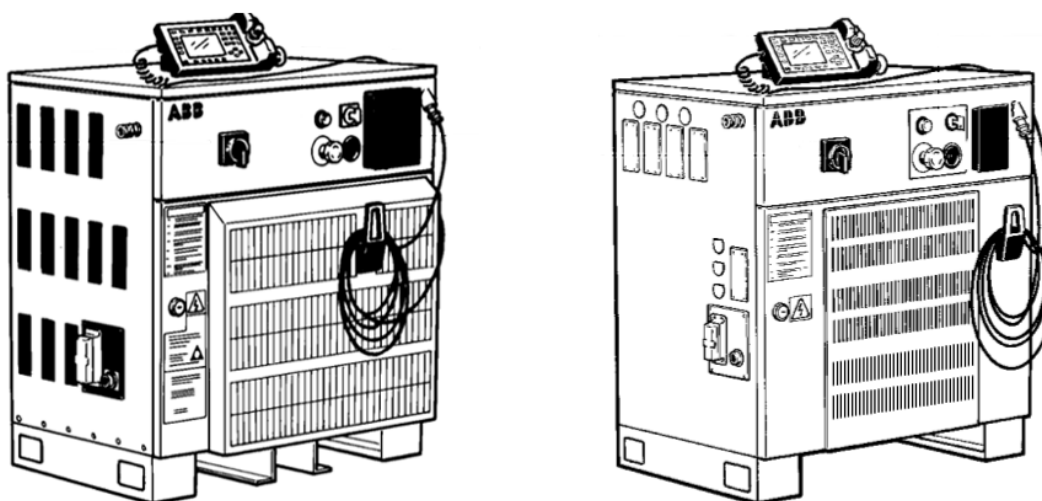
Algselt turustati tööstusroboteid IRB 1400 koos kontrolleri S4C (vt Joonis 7). Kuid S4C asemel saab kasutada ka uuemat kontrolleri, näiteks S4CPlus või IRC5.

2.2.3 Kontrollerid S4C ja S4CPlus

Mõlemad robotid – IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400 – on soetatud koos originaal kontrolleritega, vastavalt, kontrollerid S4C ja S4CPlus. Kontrollerid S4C ja S4CPlus on väliselt väga sarnased (vt Joonis 7). Kontroller S4CPlus on veidi sügavam ja raskem, kui S4C (vt Tabel 3). Kuid oma omaduste ja võimaluste poolest on need kontrollerid märgatavalt erinevad.

Tabel 3. ABB kontrollerid S4C [8] ja S4CPlus [12]

		S4C	S4CPlus
Mass	(kg)	240	250
Kõrgus	(mm)	950	950
Laius	(mm)	800	800
Sügavus	(mm)	540	620



Joonis 7. ABB kontrollerid S4C [8] (paremal) ja S4CPlus [12] (vasakul)

Üheks oluliseks erinevuseks on andmevahetuse võimalused (vt Tabel 4). Nii S4C kui ka S4CPlus on originaalis varustatud FDD-ga, mida on võimalik asendada USB-lugejaga [19]. Antud juhul mõlemal kontrolleriil on USB-lugeja. Nii kontrolleriil S4CPlus kui ka S4C on CAN (*Controller Area Network*, kontrollervõrk) ning COM-port (*communication port*,

järjestikport) ühendus.

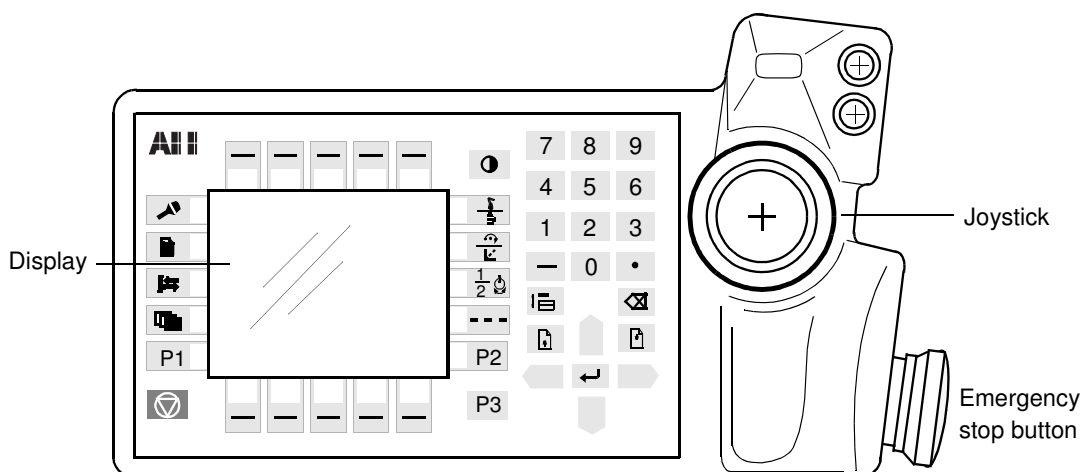
Tabel 4. Andmevahetuse võimalused ABB kontrollritel S4C [8] ja S4CPlus [12]

	S4C	S4CPlus
IO	CAN/DeviceNet	CAN/DeviceNet
Väline seade	FDD	FDD
COM-port	2	3
Internet	(lisamooduliga)	2
RPC	(lisatarkvaraga)	(lisatarkvaraga)

Soetades ABB käest lisa tarkvara on võimalik mõlema kontrolleri puhul kasutada RPC³ (*Remote Procedure Call*, kaugprotseduurikutse) võimalust, mis võimaldaks robotit otse juhtida arvuti kaudu (sh käivitada, peatada, lugeda positsiooni, anda uut positsiooni, jne). Kuid RPC ei tule baasversiooniga kaasa [11, 9]. RPC töötab nii COM-pordi kui ka interneti ühenduse kaudu [36].

Ainult S4CPlus kontrollerial on baasversioonis interneti ühendus. Lisamooduli soetamisel on võimalik ühendada kontrolleri S4C samuti interneti. S4CPlus kontrolleri baasversiooni puhul on võimalik manuseid saata arvuti ja kontrolleri vahel kasutades FTP-d (*File Transfer Protocol*, failiedastusprotokoll).

Mõlema kontrolleri juhtpult on (vähemalt väliselt) sama (vt Joonis 8).



Joonis 8. ABB kontrollrite S4CPlus ja S4C juhtpult [8]

Kontrollerite S4CPlus ja S4C andmeside erinevustest on lähemalt juttu Peatükis 3.1.

³ABB versioon RPC lahendusest kannab nime "RAP" ehk *Remote Access Platform*.

2.2.4 Olemas olev tarkvara

Tööstusrobotite programmeerimiseks on mitmeid tarkvaralisi võimalusi. Eksisteerivad lahendused, mis on mõeldud vaid konkreetse tööstusrobotite tootja riistavara jaoks, kuid leidub ka lahendusi, mida saab kasutada mitme tootja riistvaraga. Levinumad tarkvaralised lahendused ABB tööstusrobotitega suhtlemiseks või nende programmeerimiseks on:

- RobotStudio [21],
- RoboDK [5],
- ROS [6] (*Robot Operating System*, roboti operatsioonisüsteem, programmide kogumik robotitega suhtlemiseks ning nende programmeerimiseks).

RobotStudio ja RoboDK on tasuta tarkvarad. RobotStudio on ABB enda tarkvara ning on kasutatav vaid ABB robotitega. Samas RoboDK abil on võimalik programmeerida ja juhtida erinevaid tööstusroboteid. ROS on vabavara, mille abil on samuti võimalik programmeerida ja juhtida erinevaid roboteid, sh tööstusroboteid nagu ABB, KUKA, jne. Vabavara ROS võimaldab kasutada mitmeid teke (sh algselt ettevõtte *Intel Corporation* poolt arendatud masinnägemise teeki *OpenCV*) ning luua andmesidevõrke erinevate arvutite, andurite ja robotite vahel. Ka RoboDK võimaldab kasutada masinnägemist.

Paraku RoboDK ja ROS ei toimi kontrolleri S4CPlus kui multitegumtöötlus (*multi-tasking*) ei ole aktiveeritud, seega antud projekti käigus ei ole võimalik kasutada ROS-i (ABB tööstusrobotitele mõeldud osa) ega tarkvara RoboDK. Seega nendest kolmest võimalusest oleks kasutatav vaid RobotStudio. Kuid kuna Holzmaieril ei ole RobotStudio tarkvara, siis antud töös uuritakse võimalusi roboti ja kontrolleri suhtlemiseks autori arendatud tarkvara abil.

2.3 Töö eesmärk

Käesoleval uurimistööl on kaks peamist eesmärki:

1. Väljatöötada protokoll roboti/kontrolleri ja arvuti vahelise andmeside jaoks.
2. Disainida tööriist detailide tõstmiseks.

Andmeside süsteemi väljatöötamisel lähtutakse ettevõttes Holzmaieris olemasolevatest ABB tööstusrobotitest IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400 ning kontrolleritest S4CPlus ja S4C.

Tööriista disainimisel aga lähtutakse ettevõtte vajadustest. Nimelt on vaja mehhaniseerida detailide tõstmine tööpinki. Detailide tüüpilised mõõdud on 700×560 ja 700×320 mm. Lisaks tuleb arvestada tootmises kasutatava toormaterjaliga, milleks on peamiselt puitlaastplaat. Ühtlasi ei tohi detailide käitlemine kahjustada detaile.

2.4 Ülevaade kirjandusest

Tööstusrobotite juhtimine ja tööriistade/haaratsite disainimine on väga spetsiifilised teemad ning akadeemilist kirjandust on suhteliselt raske leida võrreldes mõne teise teemaga. Näiteks ABB RPC kasutamise kohta leidis ainult üks artikkel, kuidas robotit ABB tööstusrobotit juhtida arvuti teel [23]. Lisaks eelmainitud artiklile on uuritud võimalusi kuidas ühendada tööstusroboteid interneti andmete 'pilvega' [39, 40] või tarkvaraga Matlab [24] ning kuidas kasutada ROS tarkvara tööstusroboti juhtimiseks [41]. Lisaks sellele on uuritud kuidas tööstusrobotit programmeerida ilma programmeerimata, st kasutades 3D mudeleid ja jooniseid [35].

Samuti on uuritud võimalusi juhtida ABB roboteid veebikaamera abil [29, 25, 34].

Enamus artikleid eeldab, et robotile on soetatud ABB lisatarkvara, mis avab võimaluse kasutada lisa võimalusi, kuid leidub ka töid, kus lahendatakse ülesanne baasversiooni jaoks. Näiteks uuriti võimalust luua andmeside arvuti ja ABB tööstusroboti IRB 1400 vahel ilma ABB lisatarkvara soetamata [29].

Lisaks eelnevale on uuritud tööstusrobotite kasutusvõimalusi paindtootmises [28] ning kuidas vahetada tööriistasid tootmisprotsessi ajal [43, 26, 27].

Lisaks eelmainitud artiklitele leidis õpikuid [36], mis käsitleb ABB robotite programmeerimist (mh kasutades RPC meetodit).

3 Andmevahetus roboti ja väliskeskkonna vahel

Tööstusrobotite järelturult leiab palju pakkumisi, kus müüakse komplektseid ja töötavaid vanema põlvkonna tööstusroboteid koos kontrollritega.

3.1 Kontrollerite S4CPlus ja S4C andmeside käsustik

Sellest tulenevalt vaatleme lähemalt võimalust andmeid vahetada COM-pordi kaudu (vt Tabel 5).

Tabel 5. ABB kontrollerite S4C/S4CPlus RAPID käsud järjestikpordi jaoks [9, 10, 11, 14]

Meetod	Käsk	Selgitus	Kontroller
ASCII-edastus	Open	Ava manus või kanal	Mõlemad
	Close	Sulge manus või kanal	Mõlemad
	Write	Kirjuta manusesse või kanalisse	Mõlemad
	ReadNum	Loe number	Mõlemad
	ReadStr	Loe string	Mõlemad
binaaredastus	Open	Ava manus või kanal	Mõlemad
	Close	Sulge manus või kanal	Mõlemad
	WriteBin	Kirjuta binaaredastuses	Mõlemad
	WriteStrBin	Kirjuta string binaaredastuses	Mõlemad
	ReadBin	Loe binaaredastuse kaudu	Mõlemad
	WriteAnyBin	Kirjuta objekt	S4CPlus
	ReadAnyBin	Loe objekt	S4CPlus

Paraku on Tabelis 5 toodud käsud kasutatavad ainult kui täiustatud valikud on aktiveeritud (*Advanced options*), seega ei ole COM-port kõigi kontrollerite puhul kasutatav andmeside jaoks. Kuid teoreetiliselt on võimalik luua ise andmeside moodul [29] kasutades andmesideks IO (*Input-Output*, sisend-väljund) kanalit. Antud töös, seega, lähtume eeldusest, et täiustatud valikud on aktiveeritud ning pöörame erilist tähelepanu käskudele ReadAnyBin ja WriteAnyBin.

Peatükis 3.1.1 käsitleme lähemalt eelmainitud RAPID käske.

3.1.1 Järjestikpordiga seotud RAPID käskude võrdlus

Kõige olulisemad käsud on `Open` ja `Close`. `Open` käsuga avatakse etteantud COM-port vastavalt kas lugemiseks või kirjutamiseks ning määratakse andmeedastusmeetod: ASCII- või binaaredastus. Käsuga `Close` suletakse COM-port. COM-pordi sulgemine on vajalik, et seda saaks kasutada mõni teine programm või moodul, mis on käivitatud kontrollis.

Andmete edastusega seotud käsud saab jagada kolme kategooriasse:

1. ASCII-
2. binaar- ja
3. spetsiaalbinaaredastuskäsud.

Lihtsustatult võib ASCII- ja binaaredastuse erinevust käsitleda järgnevalt. ASCII-edastuse puhul edastatakse andmed tähthaaval. See tähendab, et näiteks number '0.001' edastatakse kui viis tähemärki: '0', '.', '0', '0' ja '1'. Kuna iga tähemärgi suurus andmete edastamisel on üks bait,⁴ siis edastatud andmete maht oleks viis baiti. Seega mida rohkem numbreid on arvus, seda rohkem kulub aega selle informatsiooni edastamiseks. Binaaredastuse puhul aga edastatakse number selle originaalkujul (mis lühikese murdarvu (*float*) tüüpi muutuja puhul on neli baiti) ehk eeltoodud näite '0.001' puhul edastatakse '6F12833A'. Murdarvu '0.0001' edastamisel ASCII-edastusega oleks sõnumi pikkuseks kuus tähemärki, kuid binaaredastusega saadetakse ikka vaid neli baiti, mis antud näite puhul oleks '17B7D138'. Seega binaaredastuse korral võtab iga murdarvu saatmine konstantse aja, kuid ASCII-edastuse puhul sõltub edastusele kuluv aeg selle numbri väärtusest. Halvimal juhul, kui süsteemi ei oleks sisse ehitatud ümardamist, siis ASCII-edastuse puhul (erinevalt binaaredastusest) võtaks väärtuse 1/3 saatmine lõpmatult palju aega.

ASCII-edastus on lihtsam. Andmeid vastuvõtva arvuti konsooli on võimalik kuvada saabuvald väärtusi ning need kuvatakse inimesele selgelt mõistetavas formaadis, st näiteks '0.001'. Binaaredastuse puhul kuvatakse väärtused hex-koodina, mis ei ole nii lihtsasti loetav ning tuleks kasutaja jaoks loetavaks teha vastava programmi kaudu.

Lisaks eelnevale on ASCII-edastusel veel üks puudus. Nimelt ASCII-edastuse puhul andmed teisendatakse kümnendsüsteemi ASCII kujule. Paraku binaarseid murdarve ei saa täpselt kümnendsüsteemi alati teisendada. Seega teisendamisega kaasneb ümardamisviga. ABB kontrollid edastavad kümnendsüsteemis [9] kõik murdarvud formaadis, mille kohaselt murdarvul on maksimaalselt kuus kohta peale koma ning kui arvu murdosa on väiksem kui 0.000005 või suurem kui 0.999995, siis ümardatakse see arv täisarvuks.

⁴See on lihtsustatud käsitlus. Igale baidile lisandub veel üks nõ algusbit ning kuni kaks lõpubitit ja kuni üks paarsusbit [1].

See tähendab, et ASCII-edastuse puhul kontrolleri sageli ei edastaks tegelikke väärtusi, mida kontrolleri ise arvutuste tegemiseks kasutab.

Seega binaaredastusel on mitmeid eeliseid.

Kuid RS-232 baasil teostatavad ASCII- ja binaaredastused on paraku mõlemad väga lihtsad andmeedastusviisid. COM-pordi kaudu edastatavate andmete puhul on võimalik kasutada ühe bitist CRC (*Cyclic Redundancy Check*, tsükkelkoodkontroll), mis antud juhul on paarsusbit. Seega edastatud andmetes on võimalik tuvastada viga vaid juhul kui viga on ühes bitis (või üldiselt paaritus arvus bittides). Kuna tööstusrobotid töötavad suurtel kiirustel ning on suutelised tekitama suuri jõude, siis selline lihtne veatuvastus ei ole piisav tagamaks inimeste, seadmete ja toodete turvalisust. Selle probleemi lahendamiseks oleks võimalik implementeerida eriotstarbeline CRC arvutussüsteem (st luua ise või võtta kasutusele täiendav protokoll andmete edastamiseks), mis võimaldaks andmeid edastada veakindlamalt. Õnneks kontrolleri S4CPlus puhul on selline protokoll sisse ehitatud, mis lisab edastatavatele andmetele ühe baidise (st kaheksa bitise) CRC koodi.

Nimelt kasutades spetsiaalbinaaredastuskäskude `WriteAnyBin` ja `ReadAnyBin` saadetakse binaarselt andmete lõpus veel ka ühe baidine CRC kood (ilma selleta oleks CRC maksimaalselt üks bit), seega saavutatakse kaheksa biti ulatuses täiendav veakindlus. `WriteAnyBin` ja `ReadAnyBin` on seega ideaalsed käsud saatmaks olulisi andmeid kontrolleri ja arvuti vahel. Lisaks saab käsuga `WriteAnyBin` edastada komplektseid andmeid korraga, st edastada saab näiteks roboti positsiooni kolmemõõtmelises ruumis: x , y ja z . Kasutades `WriteStr` või `WriteStrBin` tuleks andmed ise eelnevalt kokku kirjutada üheks stringiks mingi kindla formaadiga (protokolli järgi) ning teha vastuvõttev programm, mis on suuteline selles formaadis edastatud andmeid dešifreerima. `WriteAnyBin` puhul on protokoll juba olemas ning `ReadAnyBin` suudab neid andmeid korrektselt sisse lugeda ilma täiendava programmeerimise vajaduseta. Paraku on käsud `WriteAnyBin` ja `ReadAnyBin` mõeldud kasutamiseks vaid ABB riist- ja tarkvaraga [18]. ABB andmete edastamise protokoll ei ole avatud, seega ei ole seda võimalik kasutada teiste programmidega.

Ületamiseks ABB poolt seatud piirangut on vaja see protokoll pöördprojekteerida. Sellest on lähemalt juttu järgmises peatükis (vt Peatükk 3.1.2). Kuivõrd need kaks käsku ei ole kasutusel kontrolleri S4C, siis järgnev peatükk käsitleb kontrolleri S4CPlus.

3.1.2 ABB protokollide pöördprojekteerimine

Pöördprojekteerimise esimese sammuna saadeti kontrollerist S4CPlus andmeid ning salvestati arvutisse. Andmete saatmiseks koostati RAPID programmeerimiskeeles programmi, mis käivitati kontrolleris (S4CPlus). Programmi (vt Joonis 9) lühikirjeldus on:

- ava COM-port,
- kirjuta tsükliliselt andmeid (näiteks positsioon) COM-porti,
- sulge port.

Seda operatsiooni korrati erinevate andmetüüpidega (pos, robtarget, jne). Samuti muudeti milline koordinaat jääb muutumatuks. Näitekoodis on z -koordinaat konstantne suurus: $z = 0.0$.

```
%%%  
VERSION:1  
LANGUAGE:ENGLISH  
%%%  
MODULE R_pos_hex  
PROC main()  
  VAR pos repos;  
  VAR num i;  
  VAR num j;  
  repos.z := 0.0;  
  VAR errnum errvar;  
  VAR num TPSelect;  
  VAR iodev chBin;  
  Open "COM2",channelBin\Bin;  
  ClearIOBuff chBin;  
  FOR i FROM 0.0 TO 150 STEP 1 DO  
    repos.x := i;  
    FOR j FROM 0.0 TO 150 STEP 1 DO  
      repos.y := j;  
      WriteAnyBin chBin, repos;  
      TPWrite "x: " + ValToStr(repos.x) +  
              " y: " + ValToStr(repos.y) +  
              " z: " + ValToStr(repos.z);  
      WaitTime 0.1;  
    ENDFOR  
  ENDFOR  
  TPWrite "THE END";  
  Close chBin;  
ENDPROC  
ENDMODULE
```

Joonis 9. Kontrolleri järjestikpordi kaudu andmete saatmine

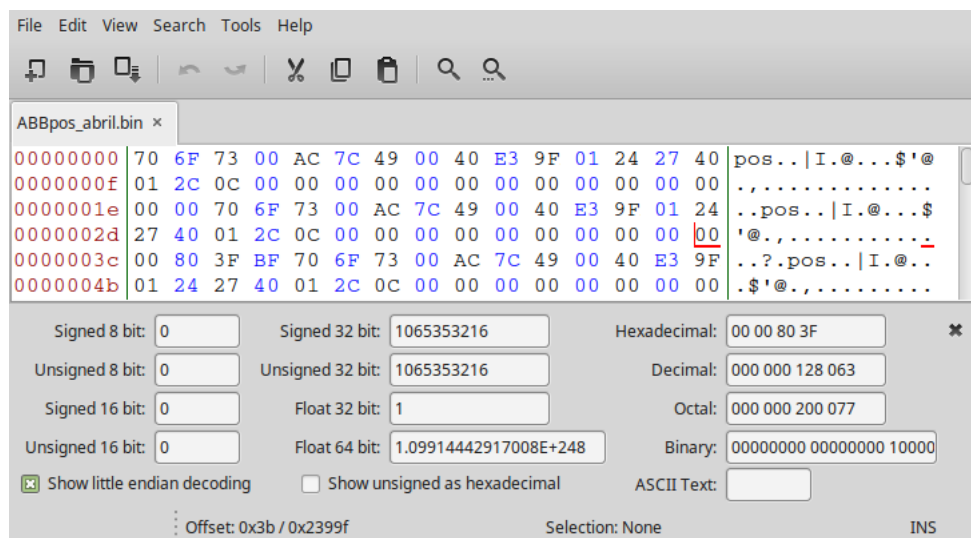
Linux operatsioonisüsteemiga arvutis (sh Raspberry Pi 3 Model B) on COM-porti tulevaid andmeid lihtne manusesse salvestada (vt Joonis 10). Esimese käsuga seadistatakse

COM-port ning teise käsuga alustatakse COM-pordi kuulamist ja saabunud andmete salvestamist manusesse nimega 'outfile.bin'. Oluline on seejuures rõhutada, et saabu-
vad andmed salvestatakse binaarsel kujul. Seega manuse avamine tekstiredaktoris ei anna vajalikku informatsiooni.

```
stty -F /dev/ttyUSB0 raw crtscts icrnl
cat < /dev/ttyUSB0 > outfile.bin
```

Joonis 10. Arvuti järjestikpordi kaudu andmete salvestamine

Andmete analüüsimiseks ja töötlemiseks on otstarbekas kasutada mõnda hex-koodi re-
daktorit. Linux operatsioonisüsteemi kasutades on võimalik andmeid kuvada näiteks
vim tekstiredaktoriga⁵ ning näiteks käskudega (programmidega) `xxd` või `od` (vt näiteks
Joonis 12). Kuid paremaks andmete analüüsimiseks on soovitatav kasutada hex-koodi re-
daktorit Bless (vt Joonis 11), sest see võimaldab jooksvalt konverteerida osa manusest
murdarvudeks, tähemärkideks, jne.



Joonis 11. Bless hex-koodi redaktor

Esimene asi, mis salvestatud andmeid analüüsid äratav tähelepanu on see, et andmepa-
ketid algavad tähemärkidest identifikaatoriga: `pos`, `robtarg` (vt Joonised 12 ja 13).
Lähemal uurimisel selgusid üks haaval ka teised väljad.

Identifikaatorile järgneb paketipäis, mis sarnaselt identifikaatorile, ei ole konstantse suu-
rusega kõigile andmetüüpidele. Andmepäis algab ja lõpeb hex-koodiga `00`. Seejärel tu-
levad andmed, mis samuti sõltuvad andmetüübist. Andmetüübi `pos` puhul on edastatava
paketi sees reaalsed andmed kokku vaid ($3 \times 4 =$) 12 baiti sisaldades kolme murdarvu:
 x -, y - ja z -koordinaat. Andmepaketi lõpus on üks lisa bait, mis lähemal uurimisel osutus
CRC koodiks (vt Tabel 6).

⁵vim kasutab programmi `xxd`, et andmeid teisendada.


```

00000000: 706f 7300 ac7c 4900 40e3 9f01 pos..|I.@...
0000000c: 2427 4001 2c0c 0000 0000 0000 $'@.,.....
00000018: 0000 0000 0000 0000 706f 7300 .....pos.
00000024: ac7c 4900 40e3 9f01 2427 4001 .|I.@...$'@.
00000030: 2c0c 0000 0000 0000 0000 0000 ,.....
0000003c: 0080 3fbf 706f 7300 ac7c 4900 ..?.pos..|I.
00000048: 40e3 9f01 2427 4001 2c0c 0000 @...$'@.,...
00000054: 0000 0000 0000 0000 0000 4040 .....@@

```

Joonis 12. Andmete näide: pos

```

00000000: 726f 6274 6172 6765 7400 9f01 robtarget...
0000000c: 2427 4001 2c44 0014 b0ee 4489 $'@.,D...D.
00000018: 0fdf 3d97 a500 454f 1837 3f66 ..=...EO.7?f
00000024: b21f b874 eb32 3f09 d1ac 3400 ...t.2?...4.
00000030: 0000 0000 0000 0000 0080 bf00 .....
0000003c: 0080 3f3c bc94 4046 1c06 5046 ..?<..@F..PF
00000048: 1c06 5046 1c06 5046 1c06 5046 ..PF..PF..PF
00000054: 1c06 503b 726f 6274 6172 6765 ..P;robtarge
00000060: 7400 9f01 2427 4001 2c44 0001 t...$'@.,D..
0000006c: 98ed 446e 6ce3 3ddd 00c7 4408 ..Dnl.=...D.
00000078: 281b 3fe6 b61b b8a0 9f4b 3fbc (.?.....K?.
00000084: 9ad4 3600 0000 0000 0000 0000 ..6.....
00000090: 0080 bf00 0080 3f55 9f94 4046 .....?U..@F
0000009c: 1c06 5046 1c06 5046 1c06 5046 ..PF..PF..PF
000000a8: 1c06 5046 1c06 5058 ..PF..PX

```

Joonis 13. Andmete näide: robtarget

Jooniste 12 ja 13 kohaselt on, näiteks, pos ja robtarget andmetüübi pakettide pikkused vastavalt 32 ja 88 baiti. Seega käesoleva informatsiooni abil on võimalik tuvastada pakettide identifikaatorid ning edastatud andmed. Kuid paketipäise täpne ülesehitus esmasel analüüsil ei selgunud.

Tabel 6. Pöördprojekteeritava andmepaketi struktuur

Element	Pikkus baitides	Värv joonistel
Identifikaator	3-9	punane
Paketipäis	19-Identifikaator	sinine
Andmed	Sõltub andmetüübist	must
CRC	1	roheline

Kuivõrd CRC kood on vajalik andmete õigsuse tuvastamiseks, siis järgmine samm on CRC koodi algoritmi tuvastamine.

CRC koodide kohta on internetis palju materjali, sh programme, mis on mõeldud CRC koodide pöördprojekteerimiseks [2]. Antud projekti puhul võeti lähtepunktiks CRC koodi pöördprojekteerimise teoreetiline baas [42] ning üritati selles artiklis kajastatud meetodikat kasutada ABB protokollis kasutatud algoritmi tuvastamiseks.

Väga sageli kasutatakse CRC koodide arvutamisel moodularvutust, st XOR tehet. Peamiseks küsimuseks on seega mis polünoomi kasutada ehk mis arvuga teostada matemaatilist jagamist.

Kuid polünoomi leidmiseks on vaja teada kas arvutamisel kasutatakse kõiki baite, sh identifikaatorit ja paketipäist. Polünoomi leidmiseks sai kirjutatud C keeles programm. Kuna jagatav oli 88 baidine arv, siis selle jagamiseks tuli kirjutada eraldi algoritm, sest C keeles ei ole nii suurt täisarvu (tavaline `int` näiteks on vaid neli baiti ehk 22 korda väiksem).

Tulemus oli see, et teatud juhtudel moodularvutusega leitud CRC ühtis ABB kasutatava CRC koodiga, kuid mitte alati. Seega jäi kaks võimalust: kas koostatud programm eksib või ABB ei kasuta klassikalist CRC arvutamisalgoritmi.

Trükkides välja andmeid erinevates formaatides, sh bittide kaupa, tekkis idee arvutada XOR baitide kaupa. Testimise käigus sai kinnitust, et ABB kasutab CRC arvutamiseks andmebaitide XOR tehet. Seega õnnestus CRC algoritm pöördprojekteerida.

Jäänud oli vaid paketipäise pöördprojekteerimine, mis päris lõpuni ei õnnestunud. Analüüsisides `pos` andmetüübi paketipäiseid ilmnes, et mõned paketipäised erinesid teistest. Ebastandardseid paketipäiseid oli vaid üksikutel juhtudel ning need paketipäised erinesid omavahel ka (vt Joonis 14).

00000000:	706f	7300	2001	0000	80e5	afff	pos.
0000000c:	6827	4001	230c	0000	0000	0000	h'@.#.....
00000018:	0000	0000	00e6	42a4	706f	7300B.pos.
00000024:	dce7	a801	b84e	7a01	a3c0	9400Nz.....
00000030:	e80c	0000	0000	0000	00e0	4000@.
0000003c:	00f4	4216	706f	7300	fc26	4001	..B.pos..&@.
00000048:	8c0a	4100	0800	0000	460c	0000	..A.....F...
00000054:	0000	0000	0030	4100	007c	424f0A.. BO

Joonis 14. Andmete näide: ebastandardseid paketipäised

Joonise 12 paketipäised on nõ standardsed (00 ac7c 4900 40e3 9f01 2427 4001 2c0c 00), kuid Joonise 14 neli paketipäist on nõ ebastandardseid (näiteks 00 dce7 a801 b84e 7a01 a3c0 9400 e80c 00). Testimise käigus ei selgunud seaduspära ning kontrolleri S4CPlus aktsepteeris pakendid, mille ebastandardseid paketipäised asen-

dati standardsetega. Seega paketi päiseid võib asendada teineteisega.

3.2 Andmevahetus serverarvuti ja roboti/kontrolleri vahel

Käesoleva töö eesmärk on väljatöötada arvuti (st serveri) ja roboti/kontrolleri (st kliendi) vahelise andmeside protokoll. Eesmärk ei ole valmis kirjutada spetsiifilise roboti tööülesande programmiline lahendus.

Lõplikus versioonis peab süsteem funktsioneerima järgnevalt:

- triipkoodi järgi tuvastatakse detaili mõõt,
- robot haarab detaili vastavalt detaili mõõdule ja asendile,
- robot tõstab detail õigesse tööpinki,
- peale töötlust robot tõstab detaili õigesse kohta, jne.

Seega server peab (minimaalselt) edastama järgnevat informatsiooni:

- detaili mõõdud,
- detaili asend ruumis (koordinaadid),
- tööpingi koordinaadid,
- töödeldud detaili soovitud asend ruumis.

Need andmed on kõik kolmemõõtmelised, seega andmete edastamiseks saaks ideaalselt kasutada *pos* andmetüüpi. Lisaks sellele peab server:

- andma üldisi töökäskude (katkesta töö, jne) ning
- tegema päringuid roboti staatuse kohta (valmisolek, positsioon, jne).

Klient ehk robot/kontroller peab edastama peamiselt kolme liiki informatsiooni:

- staatus (valmisolek, rike, jne),
- positsioon ja
- kinnitus, et teave on vastuvõetud.

Eeltoodu põhjal saame koostada baasprotokolli andmete edastamiseks (vt Tabel 7). Näiteks juhul, kui server soovib teada roboti asukohta, siis server saadab kliendile käsukoodi “2” ning jääb ootama, et robot vastab. Samas juhul, kui server soovib robotit liigutada konkreetsesse punkti, siis esmalt saadetakse käsukood “3”, seejärel *pos* andmetena positsioon. Robot vastab sellele saates positsiooni andmed tagasi *pos* andmetena ning server kontrollib kas CRC kood on õige. Juhul, kui CRC kood on vale, siis server saadab katkestus käsu koodiga “666” ning seejärel saadab soovitud käsu uuesti.

Tabel 7. Serveri ja kliendi vahelise andmeside protokoli näide

Nr	Teema	Kood	Andme tüüp
Server			
1	<i>Päring</i>		
1.1	Staatuse	1	–
1.2	Positsioon	2	–
2	<i>Töökäskud</i>		
2.1	Stop (avarii)	888	–
2.2	Jätka	777	–
2.3	Katkesta/tühista	666	–
2.4	Liigu punkti	3	<i>pos</i>
2.5	Haarats kinni	4	<i>pos</i>
2.6	Haarats lahti	5	<i>pos</i>
2.7	Oota	6	–
Klient			
1	<i>Staatuse</i>		
1.1	OK/positsioon	–	<i>pos</i>
1.2	Rike	900–999	–
1.3	Täidab eelmist käsku	1	–
1.4	Ootab käsku	2	–
2	<i>Kinnitus</i>		
2.1	CRC	–	<i>pos</i>

4 Haarats

Käesolevas peatükis käsitleme haaratsi projekteerimist tööstusrobotile. See sisaldab nii võimalike haaratsi tüüpide alternatiivide võrdlust (vt Peatükk 4.1) kui ka tugevusarvutuste tegemiseks vajaliku programmi tutvustust (vt Peatükk 4.2). Peatükis 5.1 käsitletakse roboti ja haaratsi vahelise kinnituse mehhanismi valimist ning Peatükis 5.2 käsitletakse haaratsi projekteerimist.

4.1 Haaratsi eesmärk ning alternatiivid

Võimalike haaratsi tüüpide alternatiivide analüüsimisel lähtuti väga konkreetsest ja reaalsest vajadusest optimeerida ettevõtte Holzmaier tootmist. Seega alternatiivide valikuks on vaja tutvuda ettevõtte tegevusega. Holzmaier tegeleb peamiselt (köögi-) mööbli tootmisega. Peamiseks toormaterjaliks on puitlaastplaat. Tüüpilise tellimuse valmistamine sisaldab enamasti järgnevat sammude:

- jooniste tegemine vastavalt tellimusele,
- jooniste põhjal nõ 'saemanuse' tegemine,
- puitlaastplaadi lahti lõikamist saemanuse alusel kasutades CNC saagpinkki,
- aukude puurimine,
- CNC pingiga freesimine,
- lihvimine,
- värvimine,
- kantimine,
- komplekteerimine,
- toote üleandmine kliendile.

Suurte puitlaastplaatide töstmiseks CNC saagpinkki kasutatakse pneumohaaratsit, mida juhitakse manuaalselt. Lahtilõigatud detailid märgistatakse triipkoodikleebistega. Saagpinkist edasi liiguvad detailid kärudega ühe pingi juurest teise. Kärudele asetatakse detaile manuaalselt ning samuti neid kärusid liigutatakse manuaalselt.

Ettevõtte Holzmaier soov on automatiseerida (vähemalt osaliselt) detailide liikumist ja käitlemist peale CNC saagpinkist lahkumist. See tähendab, et detaile töstetakse CNC freespinkki tööstusroboti abil. Võimalusel oleks ideaalne kui sama robot saaks plaate tõsta ka puurpinkki, sest hetkel ei ole CNC pingi koormust saja protsendiline.

Seega järgnevat analüüsimise millised on tüüpilised detailid, mida robot peaks tõstma (vt ka Tabel 8).

Tabel 8. Tõstetavate detailide andmed

Suurus		A	B
Pikkus	(mm)	700	700
Laius	(mm)	560	320
Paksus [4]	(mm)	3 – 40	3 – 40
Tihedus [4]	(kg/m ³)	660	660
Max mass	(N)	≈ 102	≈ 58

Tüüpiliste detailide mõõdud on vastavalt 700×560 ja 700×320 mm. Tarnija kataloogi [4] kohaselt on pakutavate puitlaastplaatide paksus vahemikus 3 kuni 40 mm ning tihedus on 600 kg/m^3 . Reaalsuses 3 mm plaati ei kasutata Holzmaieri tootmisprotsess. Plaadi massi leiame Valemiga 1 ning ümardades üles saame detailide 700×560 ja 700×320 massid vastavalt Valemitega 2 ja 3.

$$mass = Pikkus \times Laius \times Paksus \times Tihedus \times 10^{-9} \times 9.8 \text{ N} \quad (1)$$

$$\lceil m_{700 \times 560} \rceil = \lceil 700 \times 560 \times 40 \times 660 \times 10^{-9} \times 9.8 \text{ N} \rceil = \lceil 101.4 \dots \text{ N} \rceil = 102 \text{ N} \quad (2)$$

$$\lceil m_{700 \times 320} \rceil = \lceil 700 \times 320 \times 40 \times 660 \times 10^{-9} \times 9.8 \text{ N} \rceil = \lceil 57.9 \dots \text{ N} \rceil = 58 \text{ N} \quad (3)$$

Järgnevas analüüsimis kuidas detaile tõsta. Oluline seejuures on, et detailide tõstmiseks on vaja kasutada tööriista/haaratsit, mis ei kahjusta detailide pindasid (vt Tabel 9).

Tabelis 9 toodud otsustusmaatriksi koostamisel on lähtutud järgnevatest hindamiskriteeriumitest. Nii pinna kriipimist ja määrimist kui ka plaadi murdumist hinnatakse kolme palli süsteemis. Esiteks, juhul, kui sündmuse toimumine on suure tõenäosusega, siis hinnatakse seda null punktiga. Teiseks, juhul, kui sündmuse toimumise tõenäosus on väike, siis hinnatakse seda ühe punktiga. Viimaseks, kui sündmuse toimumise tõenäosus on olematu, siis hinnatakse, seda kahe punktiga.

Otsustusmaatriksi (vt Tabel 9) kohaselt on kahveltõstukitüüpi haaratsi puhul suur oht pinda kahjustada kriipimise teel. Külghaaratsi [33, 38] puhul, mis surub horisontaalselt kokku kahelt poolt detaili, on samuti suur oht, et detail murdub või mureneb. Murdunud plaat läheb suure tõenäosusega tervenisti praaki, seega murdumisoht on teatud mõttes kõige tõsisem probleem. Samas kriibitud pindade taastamisega kaasneks väga ajamahu- kas töötus ning lõppkokkuvõttes ei pruugi detailid tulla ühtlase paksusega. Seega mitte kumbki nendest kahest haaratsi alternatiivist ei ole rakendatav. Samuti tuleb tähele panna, et hüdroajamite puhul on märkimisväärne oht, et hüdrovedelik satub detailide pinnale. Kuna paljud detailid on valget värvi, siis see võib oluliselt kahjustada toodet. Järelikult parim

alternatiiv on kasutada pneumaatilist iminappade süsteemi.

Tabel 9. Tõstmise otsustusmaatriks

Meetod	Pinna kriipimine		Pinna määrimine		Plaadi murdumine		KOKKU
	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	
Kahveltõstuk							
Elekter	Suur	0	Väike	1	Väike	1	2
Hüdro	Suur	0	Suur	0	Väike	1	1
Pneumo	Suur	0	Puudub	2	Väike	1	3
Külghaarats							
Elekter	Väike	1	Väike	1	Suur	0	2
Hüdro	Väike	1	Suur	0	Suur	0	1
Pneumo	Väike	1	Puudub	2	Suur	0	3
Iminapad							
Pneumo	Puudub	2	Puudub	2	Puudub	2	6



Kuivõrd analüüsi tulemusel selgus, et parim alternatiiv on kasutada iminappasid, siis järgneviks käsitleme iminappade valikuga seonduvaid küsimusi.

4.2 Pneumohaaratsi tugevusarvutuste programm

Iminappade valiku tegemiseks tuleb arvutada kui palju iminappasid on kokku vaja. Kui võrd nende arvutuste tegemiseks puudus mugav programm, siis kõigepealt tuli kirjutada Java programm, mis teostaks vajalikud arvutused ning kuvaks vastused graafiliselt.

SMC Pneumatics Estonia OÜ [7] võimaldas kasutada nende koostatud Excel manust iminappade diameetrite valimiseks (vt Joonis 15). See on hea programm lihtsamate probleemide lahendamiseks. Kuid keerukamate probleemide puhul (nagu antud juhul) sellest üksi ei piisa. Juhul, kui plaati tõstetakse tsentrist väljas, siis on tarvis lisaks raskusjõule arvestada ka tekkivaid jõumomente.

Iminapale mõjuva summaarse reaktsioonjõu leiame Valemiga 4.

Jõud	W	102 N	2
iminappade arv	n	12 tk	4
alarõhk	p	60 kPa	6
varutegur (horisontaalne, min 4)	t	4	8
varutegur (vertikaalne, min 8)	t	8	10
			13
			16
 min. Iminapa läbimõõt (horis.)	D	26.8608 mm	20
			25
			32
			40
 min. Iminapa läbimõõt (vert.)	D	37.9869 mm	50
		Vali lähim suurim reast ->	63
			80
			100
			125
			150
			200
			250

Joonis 15. Lihtne iminappade tugevusarvutus

$$\vec{F}_i = \vec{F}'_i + \vec{F}''_i \quad (4)$$

kus

F_i – iminapale i mõjuv summaarne reaktsioonjõud,

F'_i – iminapale i mõjuv reaktsioonjõud (objekti raskusjõust ilma momendita),

F''_i – iminapale i mõjuv reaktsioonjõud (momentist).

Ühele iminapale mõjuv reaktsioonjõud on leitav Valemiga 5.

$$F'_i = \frac{F_o}{N} \quad (5)$$

kus

F_o – detaili keskkoha mõjuv detaili raskusjõud,

N – iminappade arv kokku,

F'_i – iminapale i mõjuv reaktsioonjõud (objekti raskusjõust ilma momendita).

Jõumomendist tulenev reaktsioonjõud leitakse jõumomendi kaudu (vt Valemid 6, 7, 8 ja 9) [22, lk 456–457].

$$M_o = F_o \times r_o \quad (6)$$

kus

M_o – jõumoment,

F_o – detaili keskkoha mõjuv detaili raskusjõud,

r_o – detaili keskkoha ja haaratsi keskkoha vaheline kaugus.

$$M_o = \sum_{i=1}^N F_i'' \times r_i \quad (7)$$

kus

M_o – jõumoment,

N – iminappade arv kokku,

F_i'' – iminapale i mõjuv reaktsioonjõud (momentist),

r_i – iminapa i ja haaratsi keskkoha vaheline kaugus.

$$\frac{F_i''}{r_i} = \frac{F_j''}{r_j} \quad (8)$$

kus

F_i'' – iminapale i mõjuv reaktsioonjõud (momentist),

r_i – iminapa i ja haaratsi keskkoha vaheline kaugus,

F_j'' – iminapale j mõjuv reaktsioonjõud (momentist),

r_j – iminapa j ja haaratsi keskkoha vaheline kaugus.

$$F_j'' = \frac{M_o \times r_j}{\sum_{i=1}^N r_i^2} \quad (9)$$

kus

M_o – jõumoment,

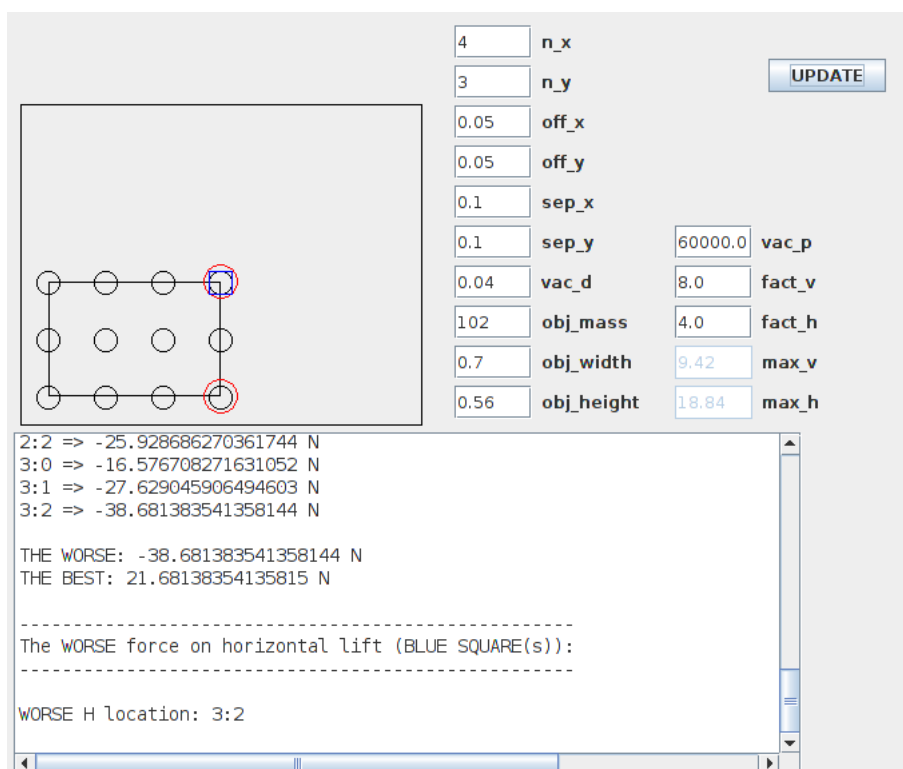
N – iminappade arv kokku,

F_j'' – iminapale j mõjuv reaktsioonjõud (momentist),

r_j – iminapa j ja haaratsi keskkoha vaheline kaugus,

r_i – iminapa i ja haaratsi keskkoha vaheline kaugus.

Eeltoodud valemite 4 – 9 baasil on koostatud Java programmi, mis võtab lisaks massile arvesse nii detaili mõõtmeid kui ka haaratsi asukohta detaili keskkoha suhtes ning iminappade geomeetrilist paigutust (vt Joonis 16). Lihtsustatud arvutuste (vt Joonis 15) kohaselt on iminapp diameetriga 40 mm piisav tõstmaks detaili nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt, kuid jõumomendiga arvestades (vt Joonis 16) selgub, et iminapp diameetriga 40 mm on praktiliselt ainult siis piisav kui detaili tõstetakse massikeskmest.



Joonis 16. Jõumomendi mõju iminapale

Programmi graafiline liides on jagatud kolme ossa:

- andmete sisestusväljad ja andmete uuendus nupp,
- detaili ja iminappade vaade (horisontaalse detaili puhul pealtvaade, vertikaalse detaili puhul külgvaade),
- arvutatud andmete (jõudude) tekstväli.

Andmeid saab sisestada nii formaadis '60000' kui ka '6E4'. Kõik sisestatavad andmed peavad olema SI mõõtühikusüsteemis. Detaili ja iminappade vaates on detail kuvatud musta riskülikuna ning iminapad mustade ringidena. Lisaks kuvatakse iminapad, millele mõjuvad maksimaalsed jõud. Horisontaalse detaili puhul on maksimaalse jõu asukoht kuvatud sinise ruuduna ning vertikaalse detaili puhul punase ringina. Juhul, kui maksimaalne jõud mõjub mitmele iminapale, siis on märgitud rohkem kui üks iminapp. Tekstiväljas kuvatakse muuhulgas igale iminapale mõjuv jõud. Iminapad on nummerdatud nii, et esimene iminapp on indeksiga (0:0) ning asub all vasakus nurgas.

5 Süsteemi komponentide valik ja skemaatika

5.1 Roboti ja kontrolleri valik

Roboti valiku jaoks vajaminev otsustusmaatriks (vt Tabel 10) on koostatud Peatükkides 2.2.1 ja 2.2.2 toodud andmete põhjal. Hindamiskriteeriumiteks on teisaldatav mass (st kui raskeid detaile robot suudab tõsta), roboti manipulaatori haardeulatus ning manipulaatori kiirus. Iga kriteeriumi eest on võimalik saada kuni kümme punkti. Ulatuse ja kiiruse hindamisel on lähtutud proportsionaalsusest. See tähendab, et parima tulemusega robotit on hinnatud kümne punktiga ning teist vastavalt proportsionaalselt lähtuvalt parima tulemusest. Seega IRB 6600-175/2.8 ulatuse punktid on kümme punkti ja IRB 1400 punktid pool sellest ehk viis punkti. Sarnaselt IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400 kiiruse kriteeriumi punktid on vastavalt kümme ja kaheksa punkti. Teisaldatava massi hindamisel on lähtutud roboti võimest teisaldada üle 10 kg (vt Peatükk 4.1) raskust detaile.

Tabel 10. Roboti lõpliku valiku otsustusmaatriks

Seeria	Teisaldatav mass		Ulatus		Kiirus		KOKKU
	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	
1400	5 kg	0	1,44 m	5	2,1 m/s	8	13
6600	175 kg	10	2.8 m	10	2,5 m/s	10	30

ABB tööstusrobot IRB 1400 eelisteks on, et IRB 1400 on kerge ja täpsem kui suurem IRB 6600-175/2.8. Kuid kuivõrd IRB 1400 ei ole võimeline teisaldama detaile, mille mass on suurem kui 5 kg, siis IRB 1400 ei ole sobilik seatud eesmärkide saavutamiseks. Seega roboti valikul osutus parimaks alternatiiviks IRB 6600-175/2.8.

Kontrolleri valiku tegemisel (vt Tabel 11) on lähtutud andmetest, mis on toodud Peatükkides 2.2.3 ja 3.1. Otsuse tegemiseks on olulised kaks kriteeriumi: FTP olemasolu ja andmeside võimalus kasutada veatuvastus koodi ehk CRC. Kriteeriumite hindamine lähtub binaarsuset, st kui vastab kriteeriumile, siis selle kriteeriumi eest saab punkti. Kui ei vasta kriteeriumile, siis punkti ei saa.

Kuivõrd kontrolleri S4C ei vasta seatud kriteeriumitele, siis parimaks alternatiiviks osutus S4CPlus. See valik on sobilik, sest kontrolleri S4CPlus on IRB 6600-175/2.8 originaal kontrolleri.

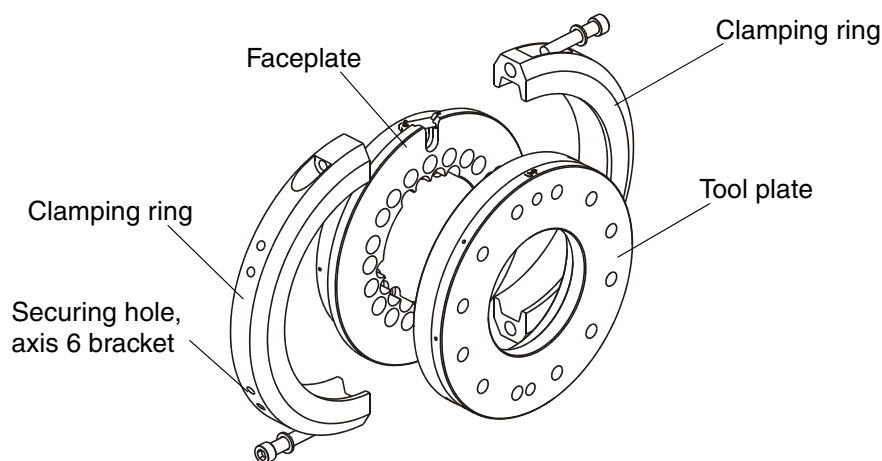
Alternatiiviks oleks soetada uuem ja võimekam kontrolleri IRC5. Soetades taastatud (ka-

sutatud) kontrolleri IRC5 ABB käest läheks see hinnanguliselt maksma 10000 €.⁶

Holzmaieris oleval ABB tööstusrobotil IRB 6600-175/2.8 on QMT (*Quick Mounting Tool*, kiirpaigaldustööriista) näoplaat (*faceplate*). See tähendab, et roboti tööriistasid saab kiirelt vahetada (vt Joonis 17). Kuid puuduseks on see, et vahetama peab manuaalselt ning peab kasutama QMT, st ei saa näoplaadile otse tööriista kinnitada.

Tabel 11. *Kontrolleri lõpliku valiku otsustusmaatriks*

Seeria	FTP		CRC		KOKKU
	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	
S4C	Ei	0	Ei	0	0
S4CPlus	Jah	1	Jah	1	2



Joonis 17. *Kiirpaigaldustööriist [13]*

Kuid kuna puudub kinnitusrõngas (*clamping ring*) ja tööriista plaat (*tool plate*), siis hetkel ei saa tööriistu kinnitada. Puuduvate osade soetamiseks pöörduiti ABB AS poole e-posti teel. Hinnapakkumine⁷ on toodud Tabelis 12.

Tabel 12. *Kiirpaigaldustööriista osade hinnad*

Detail	Hind	Kirjeldus
3HXC 0000-153	731€	Ainult tööriista plaat
3HXC 0000-151	1343€	Tööriista plaat ja kinnitusrõngas

Seega lisaks tuleks soetada 3HXC 0000-151 maksumusega 1343€.

⁶Allikaks on e-posti vahetus ABB töötajaga.

⁷Hinnad on 27.04.2017 seisuga ning ilma käibemaksuta.

5.2 Pneumohaaratsi komponentide valik

Käesolevas peatükis analüüsime erinevaid iminappade suurusi ja paigutusi haaratsil ning koostame otsustusmaatriksi parima alternatiivi valimiseks (vt Tabel 14). Otsustusmaatriksisse on lisatud vaid haaratsid, mille iminappadele mõjuvad jõud ei ületa piirmäärasid (vt Tabel 13). Kõik tulemused on arvutatud Peatükis 4.2 kirjeldatud programmiga.

Tabel 13. *Iminapale rakenduvate jõudude piirmäärad alarõhul 60000 Pa*

Diameeter	Vertikaalis	Horisontaalis
∅25 mm	3,68 N	7,36 N
∅32 mm	6,03 N	12,06 N
∅40 mm	9,42 N	18,84 N
∅50 mm	14,72 N	29,45 N
∅63 mm	23,37 N	46,75 N

Kõikide alternatiivide puhul võetud eelduseks, et esimese rea ja veeru iminappade tsentrite kaugus detaili äärest on 5 mm. Mõõtmete puhul tähistavad 'X' ja 'Y' vastavalt iminappade veergude ja ridade arvu. 'Vahe' tähistab iminappade vahelist kaugust (vt Joonis 18). Analüüsitud on iminappasid diameetritega 25, 32, 40, 50 ja 63 mm.

Esmalt on hinnatud haaratsi suurust. Väiksema haaratsiga saaks tõsta mõlema suurusega detaile ilma lisa moodulite või loogikata. Seega kaks esimest vaatlusalust suurust on kas haaratsi pikkus on alla 550 ja laius alla 320 mm. Kui haarats on väiksem etteantud mõõtmetest, siis see on väärt kaks punkti, va kui haarats mahub väga napilt etteantud mõõtmetesse, sel juhul on see väärt ühe punkti. Kui haarats on ideaalsest suurem, siis punkte ei saa. Järgmiseks hinnatakse kas antud tüüpi iminappadega haaratsiga saab tõsta ka detaile, mille laius on (veidi) alla 80 mm. Kui saab, siis see on väärt kaks punkti, kui mitte, siis null punkti. Iminappade koguse hindamisel on lähtutud järgnevast loogikast: kui iminappasid on üle 50, siis punkte ei saa; kui iminappasid on alla 50, siis on kasutatud Valemit 10 (tulemus on ümardatud üles) ning parimale/parimatele on üks lisapunkt.

$$\text{Punktid} = \lceil (50 - X \times Y) \div 10 \rceil \quad (10)$$

Mida rohkem on haaratsil iminappasid, seda kallim on haarats. Kusjuures arvestada tuleb sellega, et igal iminapal peab olema lisaks pneumokinnitus ning selle kinnitus haaratsile. Eelnevale sarnaselt ka 'Hooldatavuse' puhul on parimale üks lisa punkt. Hea hooldatavuse eest saab kaks punkti ning halva hooldatavuse eest ei saa punkte. Kui iminapad on liiga lähestikku, siis on raske neid, näiteks, väljavahetada.

Tabel 14. Iminappade suuruse ja paigutuse otsustusmaatriks

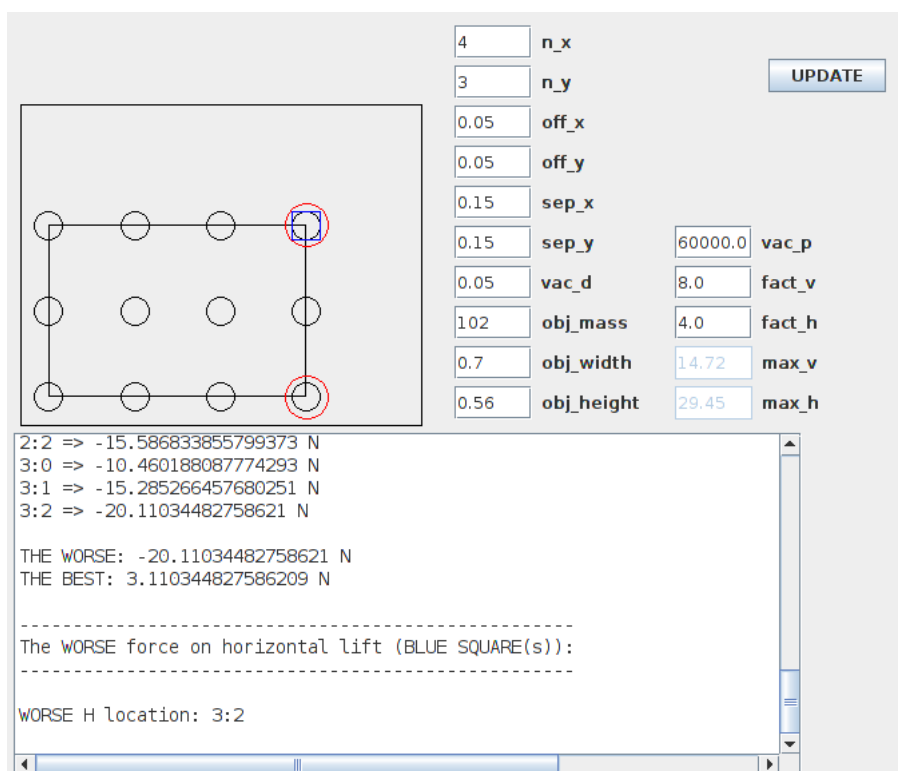
Mõõtmed		Pikkus <550 mm		Laius <320 mm		Detail <80 mm		Iminappade kogus		Hooldusmugavus		KOKKU	
X	Y	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid	Hinnang	Punktid		
∅25 mm													
10	6	50	Jah	2	Napilt	1	Jah	2	60	0	Halb	0	5
7	5	100	2 veergu üle	0	2 rida üle	0	Jah	2	35	2	Hea	2	6
∅32 mm													
8	6	50	Jah	2	Napilt	1	Jah	2	48	1	Halb	0	6
6	4	100	1 veerg üle	0	1 rida üle	0	Jah	2	24	3	Hea	2	7
∅40 mm													
7	5	50	Jah	2	Jah	2	Jah	2	35	2	Halb	0	8
5	4	100	Jah	2	1 rida üle	0	Jah	2	20	3	Hea	2	9
∅50 mm													
5	3	100	Jah	2	Jah	2	Jah	2	15	4	Hea	2	12
4	3	150	Jah	2	1 rida üle	0	Jah	2	12	5	Parim	3	12
∅63 mm													
4	3	100	Jah	2	Jah	2	Napilt	0	12	5	Hea	2	11

Tabel 14 kohaselt on kaks parimat alternatiivi (mõlemad 12 punkti) vastavalt:

- $\varnothing 50$: 5×3 vahega 100 mm ja
- $\varnothing 50$: 4×3 vahega 150 mm.

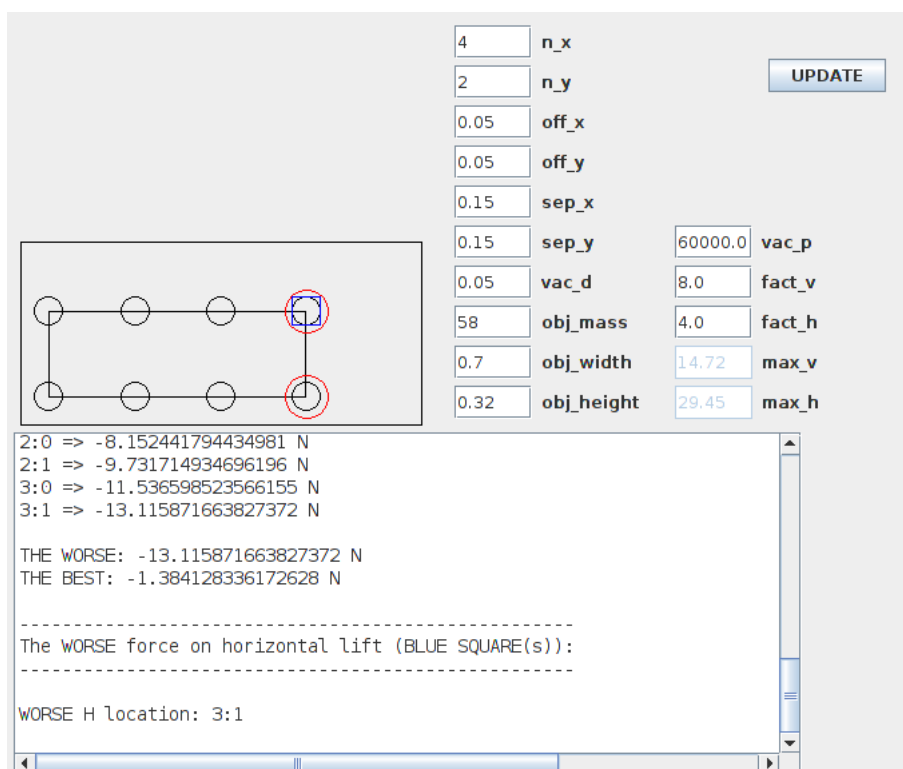
Nende kahe alternatiivi vahel valides on eelis alternatiivil $\varnothing 50$: 4×3 vahega 150 mm. Valiku tegemisel lähtuti kahest kriteeriumist: hind ja kiirus. Kuna mõlema alternatiivi puhul on iminapad identsed, siis hinna võrdlusel piisab koguste võrdlemisega: ($5 \times 3 =$) 15 on suurem kui ($4 \times 3 =$) 12, järelikult $\varnothing 50$ 4×3 alternatiiv on odavam. Samuti ruumalad on identsed, seega kogu ruumala võrdlemiseks piisab samuti iminappade koguse võrdlemisest. Järelikult ka töökiirus on parem alternatiivil $\varnothing 50$ 4×3 , sest ruumala on väiksem.⁸

Joonistel 18 ja 19 on toodud alternatiivi $\varnothing 50$: 4×3 vahega 150 mm lahendi graafiline illustatsioon vastavalt plaatide suurusega 700×560 ja 700×320 mm. Joonistel on märgitud punasete ringide (vertikaalne plaat) ja sinise ruuduga (horisontaalne plaat) nende iminappade asukohad, mis saavad kõige suurema koormuse. Arvatavasti neid iminappasid tuleb sagedamini välja vahetada.



Joonis 18. Iminappade tugevusarvutus plaatidele 700×560 mm

⁸Pneumaatikasüsteemi reaktsiooni kiirust saab arvutada valemite abil või kasutades SMC Pneumatics Estonia OÜ koostatud Excel tabelit. Kuid kuna antud juhul piisab iminappade arvu võrdlusest, siis ei ole mõistlik liigseid arvutusi tegema hakata.



Joonis 19. Iminappade tugevusarvutus plaadile 700×320 mm

Joonisel 20 on toodud iminappadele mõjuvad arvestuslikud jõud plaati 700×320 mm tõstmisel vertikaalasendis. Kahele parempoolsele iminapale mõjub maksimaalne jõud. Joonisel 21 on toodud iminappadele mõjuvad jõud sama plaadi tõstmisel horisontaalasendis. Suurim jõud mõjub üleval paremas nurgas asuvale iminapale (alt teine rida, vasakult neljas veerg). Seega üleval paremas nurgas asuv iminapp saab kõige suuremat töökoormust. Joonistel 22 ja 23 on toodud samad andmed plaati 700×320 mm tõstemise kohta. Juhul, kui peamiselt tõstetakse plaati 700×320 mm, siis suurima töökoormuse saab iminapp, mis on alt kolmandas reas vasakult neljandas veerus.

Kompenseerimaks potentsiaalset pinna ebäühtlust on soovitatav kasutada lõõtsaga (*bellows*) iminappasid. Samuti on vajalik, et iminapad on sobilikud suure töökoormusega olukorra jaoks. Nendele kahele tingimusele vastab SMC iminapp koodiga ZPT50HBN-B10.

Pneumaatika komponentidele küsiti hinnapakkumist. Hinnapakkumine on toodud Lisas “Pneumaatika komponentide hinnapakkumine”. Pneumaatika komponentide maksumus on 758,41€ (910,10€ koos käibemaksuga).

0:0 => 3.8210855060367916 N
0:1 => 3.821085506036792 N
1:0 => 6.1613152455912825 N
1:1 => 6.161315245591282 N
2:0 => 8.54420693933745 N
2:1 => 8.54420693933745 N
3:0 => 10.941923708582712 N
3:1 => 10.941923708582712 N
THE WORSE: 10.941923708582712 N
THE BEST: 3.8210855060367916 N

The WORSE force on vertical lift (RED CIRCLE(s)):

WORSE V location: 3:0

WORSE V location: 3:1

Joonis 20. Iminappadele mõjuvad jõud vertikaalse 700 × 320 mm plaadi tõstmisel

0:0 => -1.384128336172628 N
0:1 => -2.9634014764338446 N
1:0 => -4.768285065303806 N
1:1 => -6.347558205565021 N
2:0 => -8.152441794434981 N
2:1 => -9.731714934696196 N
3:0 => -11.536598523566155 N
3:1 => -13.115871663827372 N
THE WORSE: -13.115871663827372 N
THE BEST: -1.384128336172628 N

The WORSE force on horizontal lift (BLUE SQUARE(s)):

WORSE H location: 3:1

Joonis 21. Iminappadele mõjuvad jõud horisontaalse 700 × 320 mm plaadi tõstmisel

```

0:0 => 5.6290496869428885 N
0:1 => 5.17391304347826 N
0:2 => 5.6290496869428885 N
1:0 => 7.716748289194755 N
1:1 => 7.391304347826087 N
1:2 => 7.716748289194754 N
2:0 => 9.861229960441205 N
2:1 => 9.608695652173914 N
2:2 => 9.861229960441205 N
3:0 => 12.032171744943263 N
3:1 => 11.82608695652174 N
3:2 => 12.032171744943263 N
THE WORSE: 12.032171744943263 N
THE BEST: 5.17391304347826 N

```

```

-----
The WORSE force on vertical lift (RED CIRCLE(s)):
-----

```

```

WORSE V location: 3:2
WORSE V location: 3:0

```

Joonis 22. Iminappadele mõjuvad jõud vertikaalse 700 × 560 mm plaadi tõstmisel

```

0:0 => 3.110344827586209 N
0:1 => -1.714733542319749 N
0:2 => -6.539811912225705 N
1:0 => -1.4131661442006251 N
1:1 => -6.238244514106584 N
1:2 => -11.06332288401254 N
2:0 => -5.936677115987459 N
2:1 => -10.761755485893417 N
2:2 => -15.586833855799373 N
3:0 => -10.460188087774293 N
3:1 => -15.285266457680251 N
3:2 => -20.11034482758621 N
THE WORSE: -20.11034482758621 N
THE BEST: 3.110344827586209 N

```

```

-----
The WORSE force on horizontal lift (BLUE SQUARE(s)):
-----

```

```

WORSE H location: 3:2

```

Joonis 23. Iminappadele mõjuvad jõud horisontaalse 700 × 560 mm plaadi tõstmisel

5.3 Skemaatika

Käesoleva töö puhul on kõige olulisemaks pnemaatikaskeem (vt Lisa 2). Iminapad on jagatud kahte gruppi:

- kaks alumist rida ja
- ülemine rida.

Väiksemate detailide tõstmiseks on vaja kasutada vaid kahte alumist iminappade rida. Suurema detaili tõstmiseks on vaja kasutada kõiki kolme rida. Kumbagi iminappade gruppi juhust eraldi vaakuminjektorplokk (ZK2A15K5RW-08), millede abil saab iminappasid juhtida.

Elektronika põhimõtteline ühendusskeem on toodud Lisas 3.

Vaakuminjektorploki (ZK2A15K5RW-08) sisesendpinge on 24V, seega saab seda juhtida otse läbi kontrolleri S4CPlus. Serverina saab kasutada arvutit Raspberry Pi 3 Model B. See on ühendatud järgmiste seadmetega:

- 12V toiteplokk,
- monitor,
- USB kaamera (triipkoodide lugemiseks ning asendi määramiseks),
- teised arvutid (interneti teel) ja
- kontrolleri S4CPlus (läbi *USB-to-Serial* konverteri).

Olenevalt konkreetsest lahendusest saab vajadusel juhtida teisi seadmeid kasutades selleks arvuti Raspberry Pi 3 Model B IO ühendusliistu.

Haaratsi tehniline joonis on toodud graafilises lisan. Haarats koosneb 16 mm paksusest alumiinium plaadist ning ettevõtte MiniTec GmbH & Co. KG 45 × 45 alumiiniprofilist (tootekoodiga 20.1006/0) [20, 3].

6 Kokkuvõte

Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks oli väljatöötada protokoll roboti/kontrolleri ja arvuti vahelise andmeside jaoks ning disainide tööriist detailide töstmiseks. Ülesande lahendamisel lähtuti ettevõtte Holzmaier OÜ võimalustest ja vajadustest.

Esmalt analüüsiti Holzmaier OÜ tegevust. Holzmaier OÜ põhitegevuseks on kööginööbli tootmine. Peamiseks toormaterjaliks on puitlaastplaat. Hetkel on ettevõttes kasutusel kaks CNC pinki, kuid detailide liikumine tootmishoones ei ole automatiseeritud. Holzmaier OÜ valduses on mitmed kasutatud ABB tööstusrobotid, mida tootmises hetkel veel ei kasutata. Nendest lähemalt uuriti kahte: IRB 6600-175/2.8 ja IRB 1400.

Analüüsides kontrollerite S4C ja S4CPlus andmeside võimalusi jõuti järeldusele, et andmete veakindla edastamise eesmärgil oleks otstarbekas saata andmeid ABB protokolliga. Paraku see protokoll ei ole avalik. Seega kerkis vajadus protokolliga pöördprojekteerimisele. ABB kasutab ebastandardset CRC koodi arvutusalgoritmi ning selle algoritmi leidmine oli aeganõudev töö, kuid lõpuks õnnestus protokoll (peamiselt ning olulises osas) pöördprojekteerida. Andmepäise puhul jäi arusaamatuks millest sõltuvalt päis aegajalt muudab oma sisu. Kuid testide tulemusel selgus, et kontroller S4CPlus aktsepteeris ka muudetud andmepäiseid. Seejärel koostati andmeside protokoll näidis kuidas server ja kontroller andmeid omavahel vahetavad. Kokkuvõtlikult saab seda kirjeldada nii, et server esmalt saadab toimingukoodi (töökäsk, staatuse päring, jne) ning see järel saadab vajadusel lisandmed või jääb ootama informatsiooni kontrollerilt. Juhul, kui edastatud andmetes esines viga, siis server saadab uuesti töökäsu koodi (ja andmed).

Seejärel valiti roboti tööriista tüüp vastavalt ettevõtte vajadustele. Lisaks koostati Java programm, mille abil saab teostada tugevusarvutusi iminappadega haaratsi jaoks.

Lõpuks tehti süsteemi komponentide valik.

Robotitest IRB 1400 on täpsem kui IRB 6600-175/2.8, kuid aeglasem, väiksema tööruumi ja tõstevõimega. Kuivõrd ainult IRB 6600-175/2.8 suudab teisaldada detaile, mille mass on üle 10 kg, siis osutus valituks IRB 6600-175/2.8. Sõltumata roboti valikust järeldus, et kontrolleritest S4C ja S4CPlus on otstarbekam kasutada just kontrollerit S4CPlus, mis ütlasi on IRB 6600-175/2.8 originaalkontroller.

Seejärel tehti pneumaatika süsteemi komponentide valik. Kuivõrd tõstetavad detailid ei ole ühesuurused, siis tuli arvestada kahe enim töödeldatavate detailide mõõtmetega. Analüüsitud iminappade hulgast osutus parimaks alternatiiviks iminapp diameetriga 50 mm

(ZPT50HBN-B10). Detailide tõstmiseks on vaja 12 iminappa, mis on asetatud 150 mm vahedega kolme ritta. Iminapad on kinnitatud alumiiniumprofiilidele.

Seatud eesmärgid saavutati, kuid edasist tööd on veel palju. Käesolevat uurimistööd tuleks jätkata ning tellitud detailidest haarats valmistada. Seejärel tuleks reaalselt haaratsit ja arvutuslikke (tugevusarvutuse) tulemusi kõrvutada. Samuti tuleks järgnevalt kirjutada tarkvara, mis tuvastab detailidel tootekoodid (triipkoodid) ning asendi ruumis. Kuivõrd plaan on projektis kasutada arvutit Raspberry Pi 3 Model B, siis masinnägemise projekti jaoks oleks sobilik kasutada *OpenCV* teeki.

7 Summary

The main goals of current thesis are: (i) developing a protocol for data exchange between robot/controller and computer and (ii) designing gripper for lifting objects. The proposed solutions are based on the needs and possibilities of company Holzmaier OÜ.

Holzmaier OÜ produces mainly kitchen furniture. The main raw material is particle board. Currently the company uses two CNC machines, however the movement of materials is not yet automatized. In the premises of Holzmaier OÜ there are several ABB industrial robots which are not currently yet used for production. Current thesis focused on two of those robots: IRB 6600-175/2.8 and IRB 1400.

Analysing controllers S4C and S4CPlus a conclusion was reached that data should be transmitted using ABB protocol in order to achieve error protection in data transmission. Unfortunately that protocol is not an open protocol. Therefore it became necessary to perform reverse engineering on the protocol. ABB is using non-standard CRC algorithm, therefore the reverse engineering was a time consuming process, however in the end it was possible to (at least partly) reverse engineer (the relevant part). The data header changes sometimes and it is unclear why this happens. However tests confirmed that controller S4CPlus accepted headers in both original and changed form. Next a protocol was drafted for transferring work commands between server and controller. Summarizing the data transmission process it can be described as server sending work command code and either additional data or waits for controller's response. In case data transmission was not successful, server retransmits the command code (and data).

After that different tools were analyzed. In addition a Java program was written for selecting vacuum pads with required diameter.

Lastly a final selection was made choosing the most suitable alternatives for the system as a whole.

IRB 1400 is more accurate than IRB 6600-175/2.8, however IRB 1400 is slower, has smaller range of movement and smaller maximum load permitted. Given that only IRB 6600-175/2.8 is able to lift objects that weigh over 10 kg, IRB 6600-175/2.8 was chosen as the best alternative. Independent from robot selection controller S4CPlus was chosen over S4C. This is convenient as S4CPlus is the original controller of IRB 6600-175/2.8.

After that components of pneumatics system were chosen. As the objects to be lifted are not all of the same size, two most common objects were used. Analysing the vacuum pads

the best alternative appears to be vacuum pad with diameter of 50 mm (ZPT50HBN-B10). It is required to use a total of 12 vacuum pads with distance of 150 mm in three rows to lift objects. Vacuum pads are fastened to aluminum profiles.

The goals of the thesis were achieved. However, there is still work to be done. Next the gripper has to be built and tested comparing with the theoretical calculations. In addition a software needs to be developed for recognizing product codes (barcodes) and location of the objects. Since the project expects to use Raspberry Pi 3 Model B as the computer/server, *OpenCV* library should be sufficient to use for computer vision.

Kasutatud kirjandus

- [1] RS-232. [WWW] <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232> (12.04.2017).
- [2] Bruteforce CRC. [WWW] <https://github.com/sitsec/bruteforce-crc> (12.04.2017).
- [3] iCAD. [WWW] <http://minitec.kimweb.de/> (12.04.2017).
- [4] Environmental product declaration. [WWW] https://www.egger.com/downloads/bildarchiv/225000/1_225058_ZF_EPD_Eurodekor_EN.pdf (12.04.2017).
- [5] Simulator for industrial robots and offline programming. [WWW] <http://robodk.com/> (12.04.2017).
- [6] abb-ROS Wiki. [WWW] <http://wiki.ros.org/abb> (12.04.2017).
- [7] SMC Pneumatics Estonia OÜ. [WWW] <http://www.smc Pneumatics.ee> (12.04.2017).
- [8] Product On-line Manual: IRB 1400, 1998. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [9] RAPID Reference Manual: For BaseWare OS 3.1 Rev.1, 1998. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [10] Product specification: Robotware for baseware os 3.2, 1999. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [11] Product Specification RobotWare Options 3HAC 9218-1/Rev.2 BaseWare OS 4.0, 2001. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [12] Product Specification: S4Cplus BaseWare OS 4.0, 2001. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [13] Product Manual: Manual Changer: QMT 6600, 2002. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [14] RAPID Reference Manual: RobotWare-OS 4.0, 2003. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [15] Product specification: Articulated robot 3HAC 14064-1, 2004. [WWW] <http://www.abb.com> (15.05.2017).

- [16] IRB 1400, 2005. [WWW] <http://www.abb.com> (15.05.2017).
- [17] IRB 6600, 2005. [WWW] <http://www.abb.com> (15.05.2017).
- [18] Technical reference manual: RAPID Instructions, Functions and Data types, 2010. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [19] Industrial robot upgrade package: Enhanced USB disk drive replacement unit, 2012. [WWW] <http://www.abb.com> (12.04.2017).
- [20] Minitec catalogue 2015, 2015. [WWW] http://www.automation.ee/minitec/Kataloogid/MINITEC_CATALOGUE_2015.pdf (12.04.2017).
- [21] ABB. RobotStudio. [WWW] <http://new.abb.com/products/robotics/robotstudio> (12.04.2017).
- [22] Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett. *Shingley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill, 2011.
- [23] Per Cederberg, Magnus Olsson, and Gunnar Bolmsjö. Remote control of a standard ABB robot system in real time using the Robot Application Protocol (RAP). International Symposium on Robotics, ISR2002, 2002. [WWW] http://www.mkon.lth.se/fileadmin/maskinkonstruktion/robotteknik/arkiv/2002/cederberg_isr2002.pdf (12.04.2017).
- [24] Peter Davidsson and Fredrik Hansson. Communication between Matlab / Simulink and ABB Advant Control Builder, 2000. [WWW] <http://www.control.lth.se/documents/2000/5639.pdf> (12.04.2017).
- [25] Sébastien Ducatteuw, Martijn Jaeken, Patrick Geenen, and Peter Slaets. Visiegebaseerde controle van een industriële robot met behulp van een webcam, 2011. [WWW] <http://dl.dropbox.com/u/6537121/paper.pdf> (12.04.2017).
- [26] L. B. Gueta, R. Chiba, T. Arai, T. Ueyama, and J. Ota. Design of the end-effector tool attachment for robot arm with multiple reconfigurable goals. In *2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pages 876–881, Aug 2008. doi: 10.1109/COASE.2008.4626570.
- [27] D. Gyimothy and A. Toth. Experimental evaluation of a novel automatic service robot tool changer. In *2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 1046–1051, July 2011. doi: 10.1109/AIM.2011.6027122.

- [28] Mathias Haage. On the Programming and System Integration of Robots in Flexible Manufacturing, 2010. [WWW] http://fileadmin.cs.lth.se/cs/Personal/Mathias_Haage/phdthesis_mathias_v0.pdf (12.04.2017).
- [29] Tomi Haapalainen. ABB robotin käyttöönottoasennus ja ohjelmointi konenäkösovelluksessa, 2011. [WWW] https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/33889/Haapalainen_Tomi.pdf?sequence=1 (12.04.2017).
- [30] Holzmaier OÜ. Holzmaier. [WWW] <http://www.holzmaier.ee/> (2017.03.31).
- [31] Holzmaier OÜ. Majandusaasta aruanne, 2016. [WWW] <https://ariregister.rik.ee> (2017.03.31).
- [32] Holzmaier OÜ. Majandusaasta aruanne, 2017. [WWW] <https://ariregister.rik.ee> (2017.03.31).
- [33] Tõnu Lehtla. *Robotitehnika*. TTÜ kirjastus, 2008.
- [34] Yong Liu, Ning Xi, and Yantao Shen. High-Accuracy Positioning of an Industrial Robot Using Image/PSD-Based Hybrid Servo Control. *International Journal of Optomechatronics*, 5(2):170–187, 2011. doi: 10.1080/15599612.2011.581742.
- [35] F. Nagata, K. Nakamura, A. Otsuka, and K. Watanabe. Robot arm without using robot language and its application to machining process. In *2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Cybernetics (CYBERNETICSCOM)*, pages 97–101, Dec 2013. doi: 10.1109/CyberneticsCom.2013.6865789.
- [36] J.N. Pires. Industrial robots programming: Building applications for the factories of the future, 2007. [WWW] <https://books.google.ee/books?id=oYTg9Kn-OU4C> (12.04.2017).
- [37] Registrate ja Infosüsteemide Keskus. [WWW] <https://ariregister.rik.ee> (2017.03.31).
- [38] Paul E. Sandin. *Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated*. McGraw-Hill, 2003.
- [39] R. Toris, J. Kammerl, D. V. Lu, J. Lee, O. C. Jenkins, S. Osentoski, M. Wills, and S. Chernova. Robot web tools: Efficient messaging for cloud robotics. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4530–4537, Sept 2015. doi: 10.1109/IROS.2015.7354021.

- [40] A. Vick, C. Horn, M. Rudorfer, and J. Krüger. Control of robots and machine tools with an extended factory cloud. In *2015 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, pages 1–4, May 2015. doi: 10.1109/WFCS.2015.7160575.
- [41] M. Wenger, W. Eisenmenger, G. Neugschwandtner, B. Schneider, and A. Zoitl. A model based engineering tool for ROS component compositioning, configuration and generation of deployment information. In *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 1–8, Sept 2016. doi: 10.1109/ETFA.2016.7733559.
- [42] Ross N. Williams. A painless guide to CRC error detection algorithms, 1993. [WWW] http://www.ross.net/crc/download/crc_v3.txt (12.04.2017).
- [43] Zhang Yanyan, Li Chengren, and Xie Jihong. The research of the docking application between industrial robot and machine tool. In *2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA)*, pages 1272–1275, Sept 2014. doi: 10.1109/WARTIA.2014.6976514.

Lisa 1 – Pneumaatika komponentide hinnapakumine



Pakkumine nr 36759

3.05.2017

HOLZMAIER OÜ
VANA-KALAMAJA 34-129
10415 TALLINN

Tellijä
Address

Kontaktisik

Klienditellimus:

Maksetingimus: KOKKULEPPEL

Märkus/Selgitus: KASPAR TEES

Jrk	Kood	Kauba nimetus	Ühik	Kogus	Hind	Summa
1	00052259	KM11-08-12-10 FITTING MANIFOLD	TK	1,00	16,85	16,85
2	00052267	KM11-08-12-6 FITTING MANIFOLD	TK	1,00	12,29	12,29
3	00978572	ZK2A15K5RW-08 VACUUM EJECTOR	TK	2,00	193,53	387,06
4	01441627	AFJ20-F02-80-T VACUUM FILTER	TK	1,00	28,17	28,17
5	00084862	ZPT50HBN-B10 VACUUM PAD	TK	12,00	17,15	205,82
6	00028245	TU0805B-20 20M POLYURETHANE BLACK TUBING	TK	1,00	17,35	17,35
7	00001255	KQ2P-08 FITTING	TK	4,00	0,42	1,70
8	00001263	KQ2P-12 FITTING	TK	2,00	0,65	1,30
9	00983508	KQ2H08-02AS FITTING	TK	3,00	1,15	3,46
10	00000757	KQ2H08-U01 FITTING	TK	12,00	1,13	13,54
11	00999736	VHS20-F02A PRESSURE RELIEF 3 PORT VALVE	TK	1,00	18,96	18,96
12	00999687	Y200T-A SPACER	TK	1,00	2,80	2,80
13	00880920	AN10-01 SILENCER	TK	1,00	2,50	2,50
14	00981660	KQ2U08-00A FITTING	TK	1,00	2,47	2,47

SMC Pneumatics Estonia OÜ
Reg.nr. 10745304
Laki 12 10621 Tallinn Harjumaa

Tel (+372) 651 0370
Fax (+372) 651 0371
smc@smcpneumatics.ee

EE032200221016444989
HABAE2X
Swedbank 767
KMKR EE100681552



SMC Pneumatics Estonia OÜ

Jrk	Kood	Kauba nimetus	Ühik	Kogus	Hind	Summa
15	01223268	AW20-F02CE-B FILTER REGULATOR	TK	1,00	41,00	41,00
16	00981627	KQ2R08-12A FITTING	TK	2,00	1,58	3,15

Summa	758,41
Käibemaks 20%	151,68
Kokku	910,10

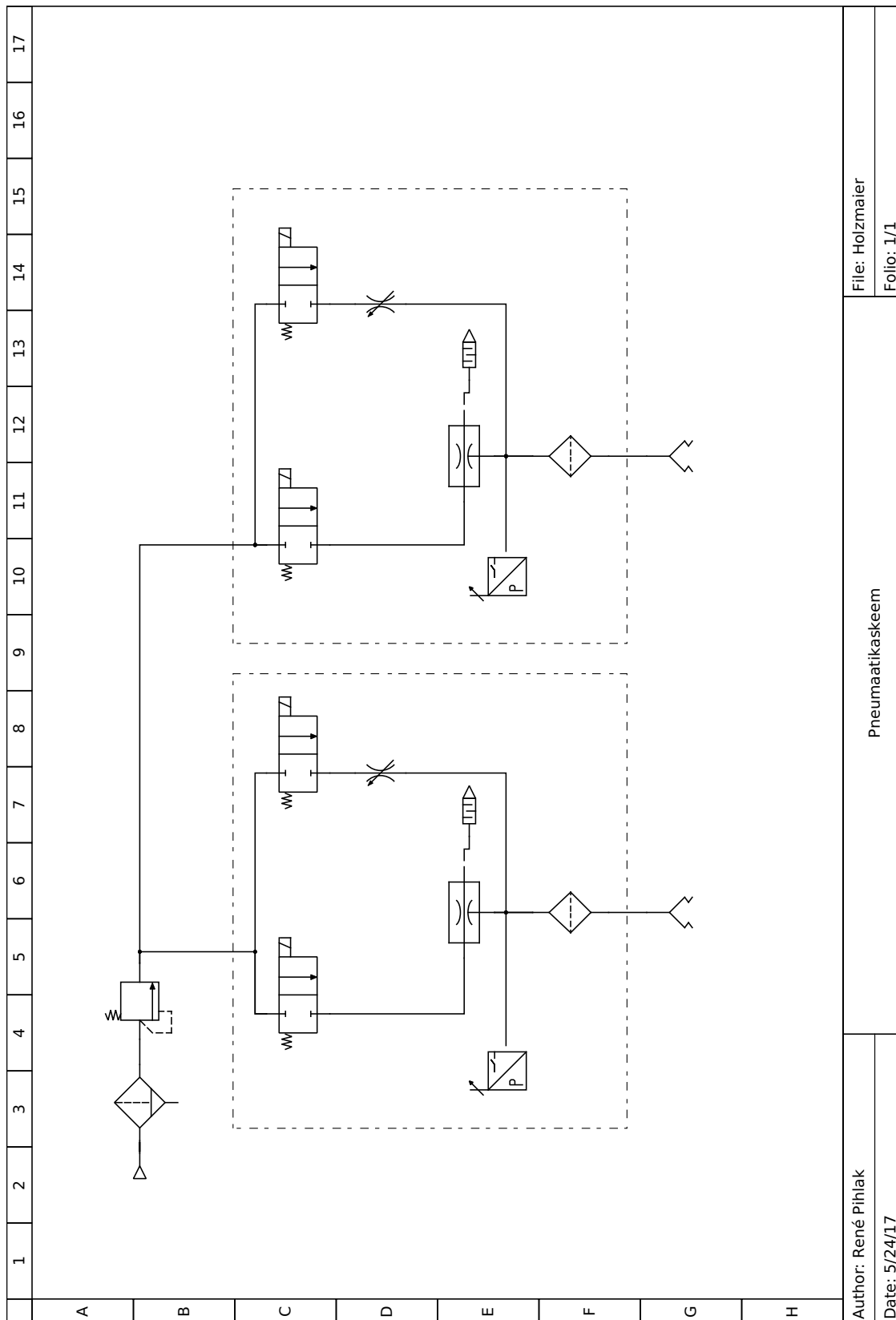
Pakkumise koostas: Indro Dsilna

SMC Pneumatics Estonia OÜ
Reg.nr. 10745304
Laki 12 10621 Tallinn Harjumaa

Tel (+372) 651 0370
Fax (+372) 651 0371
smc@smcpneumatics.ee

EE032200221016444989
HABAE2X
Swedbank 767
KMKR EE100681552

Lisa 2 – Pneumaatikaskeem



Lisa 3 – Ühendusskeem

