



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TÖÖRIISTA ARENDUS TÖÖSTUSLIKU ROBOTJAAMA JAKS SAGEDUSMUUNDURITE TOOTMISLIINI AUTOMATISEERIMISEL

THE DEVELOPMENT OF A ROBOTIC TOOL FOR AN INDUSTRIAL ROBOT CELL IN
THE AUTOMATION OF A FREQUENCY CONVERTER PRODUCTION LINE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Hans Johan Erikson

Üliõpilaskood: 164379

Juhendaja: Margus Müür, insener

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201....

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Hans Johan Erikson

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Tööriista arendus tööstusliku robotjaama jaoks sagedusmuundurite tootmisliini automatiseerimisel

Kuupäev: 14.05.2019

58 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): insener Margus Müür (TalTech), projektijuht Stanislav Perepeljatnik (ABB)

Töö konsultant (konsultandid): automaatikainsener Kristo Piir (ABB), müügispetsialist Silver Kalve (ABB), automaatikaprojektide osakonna operatsioonide juht Andrei Popov (ABB)

Sisu kirjeldus:

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on projekteerida tööriist tööstusliku robotjaama jaoks, et automatiseerida kruvimisprotsessi sagedusmuundurite montaažiliini. Töö koosneb neljast osast, millest esimene kirjeldab üldisemalt terve robotjaama arendust; teine detailselt roboti tööriista kontseptsiooni, tööpõhimõtet ja komponente; kolmas algoritme, mille põhjal robotjaam töötab ning neljas analüüsib tulemust.

Töö raames välja arendatud robotitööriista disaini põhjal luuakse robotjaam, mis tõstab sagedusmuundurite tootmisel kvaliteeti ning tootlikkust ja langetab kulusid.

Märksõnad: tööstusrobotika, mehhatroonika, tööstusautomaatika, automaatne kruvikeeraja, bakalaureusetöö.

ABSTRACT

Author: Hans Johan Erikson

Type of the work: Bachelor

Title: The development of a robotic tool for an industrial robot cell in the automation of a frequency converter production line

Date: 14th May, 2019

58 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: engineer Margus Müür (TalTech), project manager Stanislav Perepeljatnik (ABB)

Consultant(s): automation engineer Kristo Piir (ABB), sales specialist Silver Kalve (ABB), industrial projects department operations manager Andrei Popov (ABB)

Abstract:

The purpose of this bachelor thesis is to design a robotic tool for an industrial robot cell to automatize screwdriving on an assembly line for frequency converters. The thesis consists of four parts. The first part describes more broadly the development of the whole robot cell. The second part focuses on the robotic tool – its concept, working principle and components. The third part describes the algorithms on which the robot cell operates. The final part analyzes the result.

On the basis of the robotic tool design developed as a result of this thesis, a robot cell will be assembled, which will improve productivity and quality and lower costs for the assembly of frequency converters.

Keywords: industrial robotics, mechatronics, industrial automation, automatic screwdriver, bachelor thesis.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Tööriista arendus tööstusliku robotjaama jaoks sagedusmuundurite tootmisliini automatiseerimisel
Lõputöö teema inglise keeles:	<i>The development of a robotic tool for an industrial robot cell in the automation of a frequency converter production line</i>
Üliõpilane:	Hans Johan Erikson, 164379
Eriala:	mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Margus Müür, insener, 620 3263, margus.muur@taltech.ee Stanislav Perepeljatnik, projektijuht, 56 801 985, stanislav.perepeljatnik@ee.abb.com
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	juuni 2019
Lõputöö esitamise tähtaeg:	21.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud teema on pärit ettevõtte ABB AS tööstusautomaatika osakonna hetkel töös olevast projektist, mille eesmärk on luua tööriist robotjaama jaoks sagedusmuundurite tootmisliini automatiseerimiseks. Sellist projekti ei ole varem olnud ning see ülesanne nõuab hästi läbimõeldud spetsiifilist insenerilahendust – seega on see bakalaureusetöö teemaks sobilik.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärkideks on

1. Analüüsida sagedusmuundurite tootmisliini automatiseerimise ülesannet.
2. Projekteerida tööstuslik robotjaam ja tööstusroboti külge käiv tööriist, mis vastaks ettevõtte ABB poolt etteantud nõuetele.
3. Anda ülevaade terve arendusprotsessist ning teha järeldused.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Küsimused, mis töö jooksul lahendada tuleb, on järgnevad.

1. Kui suur ja milline peab olema robotjaama turvaeed, et mahutada ära robot tööriistaga ja konveieril asuv toode, vastates sealjuures turvanõuetele?
2. Millise tööpõhimõttega on optimaalseim roboti tööriist, arvestades tsükliägu, komponentide mõõtmeid ja kaalu?

4. Lähteandmed

Eesmärkide lahendamiseks kasutatakse juhendajate kogemusi, eelnevatelt robotiprojektidelt saadud teadmisi, erinevate tootjate tootekatalooge ja loomingulist mõtlemist.

5. Uurimismeetodid

Töö tulemusteni plaanitakse jõuda esiteks 3D-modelleerimise abil (tööriista CAD-modelleerimine ning robotijaama simuleerimine) ning empiiriliste katsetega (loodava tööriista tööpõhimõtte testimine prototüübiga).

6. Graafiline osa

Puudub.

7. Töö struktuur

Töö koosneb neljast osast, millest esimene kirjeldab üldisemalt terve robotjaama arendust; teine detailselt roboti tööriista kontseptsiooni, tööpõhimõtet ja komponente; kolmas algoritme, mille põhjal robotjaam töötab ning neljas analüüsib tulemust.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Robotjaama ja robotjaama turvalisusega seotud ISO-standardid, robotite manuaalid ning spetsifikatsioonid, erinevad tootekataloogid.

Varasemad lõputööd:

Liiv, O. *Industrial robot cell development*. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikool, 2017.

9. Lõputöö konsultandid

Margus Müür, TalTech insener (teema üldine piiritlemine, vormistamine, juhendamine).

Andrei Popov, ABB automaatikaprojektide osakonna operatsioonide juht (töö viimistlemine).

Kristo Piir, ABB automaatikainsener (peatükk 1, 2).

Stanislav Perepeljatnik, ABB projektijuht (peatükk 1, 2).

Silver Kalve, ABB müügispetsialist (peatükk 1.3.1).

10. Töö etapid ja ajakava

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tööülesande kirjeldamine.	11.03.2019
2.	Materjalide uurimine. Roboti, turvasüsteemi ning muude vajalike komponentide valik ja kirjeldamine.	01.04.2019
3.	Roboti tööriista projekteerimine, koostamine ning testimine.	22.04.2019
4.	Robotjaama simuleerimine kasutades tarkvara ABB Robotstudio.	13.05.2019
5.	Töö lõplik vormistamine, väljatrükkimine ning köitmine.	21.05.2019

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT.....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE.....	5
EESSÕNA.....	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	11
SISSEJUHATUS.....	12
1. ROBOTJAAMA ARENDUS	13
1.1 Robotjaama protsess	13
1.1.1 Nõuded robotjaamale	13
1.1.2 Protsessi etappide kirjeldus	14
1.2 Robotjaama esialgne kontseptsioon.....	15
1.3 Komponentide valik	16
1.3.1 Robot.....	17
1.3.2 Konveier.....	18
1.3.3 Turvaaed	19
1.3.4 Masinnägemissüsteem.....	22
1.3.5 Tihvtide eemaldussüsteem.....	23
2. ROBOTI TÖÖRIISTA ARENDUS.....	25
2.1 Tööriista komponendid	25
2.1.1 Kruvikeeraja	25
2.1.2 Tihvtikoguja.....	27
2.2 Tihvtikogujast täpsemalt	29
2.2.1 Tööpõhimõte.....	29
2.2.2 Ehitus.....	30

2.3 Tihvtikoguja testimine	32
2.4 Tihvtikoguja kulu.....	33
3. ROBOTJAAMA SIMULEERIMINE	35
3.1 Tsükli aeg.....	35
3.2 Robotjaama simulatsioon RobotStudios	36
3.2.1 Üldine algoritm.....	37
3.2.2 Roboti töösükkel	38
3.2.3 Roboti töösükkel suurema toote puhul	38
3.2.4 Toote läbilaskmine.....	38
4. JÄRELDUSED.....	40
KOKKUVÕTE.....	42
SUMMARY	43
KASUTATUD KIRJANDUS	44
LISAD.....	46
Lisa 1 Tööriista koostejoonis	47
Lisa 2 Tihvtikoguja koostejoonis	48
Lisa 3 Tihvtikoguja pneumaatiline skeem	49
Lisa 4 Tööriista elektriskeem	50
Lisa 5 Robotjaama tööprotsessi üldine algoritm	55
Lisa 6 Roboti töösükli algoritm	56
Lisa 7 Roboti töösükkel suurema tootemudeli puhul	57
Lisa 8 Toote läbisõit robotjaamast	58

EESSÕNA

Käesolev bakalaureusetöö valmistehnoloogiaettevõtte ABB AS Eesti tööstusautomaatika osakonna projekti raames, mille eesmärk oli tööstusroboti abil sagedusmuundurite koostamise ühte etappi automatiseerida.

Töö annab ülevaate terve robotjaama loomisprotsessist – projekteerimisest, komponentide valimisest, simuleerimisest ja programmeerimisest. Eraldi keskendub töö jaama kõige tähtsama osa väljaarendamisele, milleks on roboti tööriist.

Töö valmimisele aitasid ettevõttest kaasa automatikainsener Kristo Piir, projekti juht Stanislav Perepeljatnik ning pakkumiste spetsialist Silver Kalve; ülikoolist töö juhendaja insener Margus Müür. Autor soovib tänada ABB AS automatikaprojektide osakonna operatsioonide juhti Andrei Popovit abi eest töö lõplikulvormistamisel.

Märksõnad: tööstusrobotika, mehhatroonika, tööstusautomaatika, automaatne kruvikeeraja, bakalaureusetöö.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- IGBT Isoleeritud paisuga bipolaartransistor (*insulated-gate bipolar transistor*), sagedusmuundurites kasutatav jõuelektroonika element
- TCP Roboti tööriista koordinaadistiku keskpunkt (*tool center point*), punkt, mis defineeritakse robotitööriista külge, mida robotmanipulaator õpetatud punktidesse viib.

SISSEJUHATUS

Käesolev bakalaureusetöö kirjeldab robotjaama loomeprotsessi, mille eesmärk on automatiseerida krüvimisprotsessi sagedusmuundurite tootmisliinil. Töö teema on pärit tehnoloogiaettevõtte ABB AS tööstusautomaatika osakonna robotiprojektide meeskonnast, kus töö autor oli alates 2018. aasta veebruarist praktikant ning 2018. aasta novembrist projektiinsenerina tööle asus.

Tegemist on pilootprojektiga sagedusmuundurite montaaži automatiseerimise valdkonnas. Toodete valmistamine vajab tööjõudu, mis suudab väsimatult ja stabiilselt teha kvaliteetset tööd. Seetõttu liigub tootmine tulevikus aina suurema automatiseerituse poole. Rakendades roboteid tõusevad töö kvaliteet ja tootlikkus, langevad kulud ning valmistamisajad, samuti eemaldatakse inimene ohtlikust või ebaergonoomilisest keskkonnast. Inimlik viga on alati olnud üks suurimaid õnnetuste põhjuseid tööstuses – näiteks selgub S. Salminen ja T. Tallbergi läbi viidud uuringust, et 84% tööstest ja 94% surmaga lõppevatest õnnetustest juhtuvad inimliku eksimuse tõttu [1].

Automatiseerida detailide krüvimist ei ole iseenesest keeruline ülesanne – automaatseid krüvikeeramislahendusi pakuvad mitmed ettevõtted. Antud projekti teeb omapäraseks aga asjaolu, et automatiseerida tuleb nii krüvimisprotsessi kui ka krüviaukudes asuvate positsioneerimistihvtide eemaldamist enne krüvimist. See ongi töö eesmärk – projekteerida robotitööriist, mis sisaldab ühtaegu automaatset krüvikeerajat ja positsioneerimistihvtide kogujat ning suudab ettenähtud tingimustes ülesande lahendada.

Kuna robotjaam on terviklik süsteem, mille kõik osad on omavahel tihedalt seotud ning teenivad sama eesmärki, algab käesolev töö terve robotjaama kirjeldamisest – jaama arendusprotsess, roboti ja muude komponentide valik ning turvaaja loomine. Olles andnud konteksti, liigutakse edasi tööriista juurde – erinevad lahendusvariandid, lõpliku variandi tööpõhimõte, ehitus ning testimine. Lõpuks simuleeritakse tööriista tööd virtuaalses robotjaamas.

Töö koosneb neljast peatükist. Esimeses kirjeldab autor robotjaama arendust igakülgset, alates esmasest kontseptsioonist kuni komponentide valiku ja jaama koostamiseni. Teine peatükk keskendub robotjaama põhilisele osale – roboti tööriistale. Kolmandas peatükis on lahti seletatud robotjaama tööprotsessi põhilised algoritmid, mida kasutatakse nii robotjaama simulatsiooni loomiseks kui ka reaalse jaama programmeerimiseks. Viimases peatükis analüüsitakse tööd ning tuuakse välja, mida projektist õpiti, mida tulevikus paremini teha.

Töö käigus kasutas autor põhiliselt kahte tarkvara: Autodesk Inventorit 3D-modelleerimiseks ning ABB RobotStudios robotjaama koostamiseks ning simuleerimiseks.

1. ROBOTJAAMA ARENDUS

Käesolev töö kirjeldab ABB tööstusautomaatikaprojekti, mille eesmärgiks on automatiseerida kruvimisprotsessi sagedusmuundurite koostamisel. Robotjaam hakkab teenindama kahte tootmisliini, millel valmistatakse kahte erinevat tüüpi sagedusmuundureid: väiksem mudel R6 ja suurem mudel R8. Roboti ülesanne on mudeli R6 puhul kokku kruvida sagedusmuunduri korpuse erinevad osad ning R8 puhul korpus ning korpusel asuvad isoleeritud paisuga bipolaartransistorid ehk IGBT-d (ingl *insulated gate bipolar transistor*).

Toote sisenemisel robotjaama tuleb toote mudel esiteks masinnägemissüsteemiga tuvastada ning toote täpne asukoht konveieril määrata. IGBT-d on sagedusmuunduri korpusel vastavatele kohtadele kinnitatud positsioneerimistihvtidega, misenne kruvi sisestamist eemaldada tuleb. Peale korpuse kokkukruvimist tuleb IGBT-d esmalt kinnitada eelpingutatud kruvidega, mis asetatakse vabadesse kruviaukudesse. Seejärel tuleb eemaldada tihvtid, sisestada kruvid aukudesse, kus tihvtid asusid, ning viimaks pingutada kõik sisestatud kruvid.

Järgnevalt on kirjeldatud autori panust sellesse projekti, kus lisaks autori enda projekteeritud seadmetele on autor kirjeldanud ka ülejäänud robotjaama disainiprotsessi. Seda seetõttu, et kõik jaama osad on omavahel tihedalt seotud ning ühe osa projekteerimine nõuab head ülevaadet ülejäänud jaamast. Samuti soovib autor anda käesoleva töö lugejale tervikliku ning igakülge ülevaate ühe tööstusliku robotjaama valmimisest.

1.1 Robotjaama protsess

1.1.1 Nõuded robotjaamale

Projekt on edukas, kui loodud robotjaam vastab kõigile kliendi esitatud nõuetele ning jääb seejuures eelarvesse. See nõuab robotjaama loojailt optimeeritud, hästi läbimõeldud lahendust ning pidevat koostööd kliendiga. Kliendi järjepidev tagasiside tagab projekti kulgemise soovitud suunal ning ennetab infosulgu, kus kulutatakse palju aega millegi arendamisel e, mida tegelikult ei soovitud.

Kogemus näitab, et projekti arenedes tekib veel mitmeid spetsiifilisemaid ning esmapilgul ettearvamatuid lisatingimusi, millega jaama projekteerides arvestada tuleb. See johtub sellest, et samaaegselt arendatakse välja erinevaid komponente ning muutuseid ühes jaama osas võivad teha vajalikuks muutused mõnes teises osas. Näiteks tingib roboti tööriista mõõtmete suurenemine vajaduse laiendada turvaaeda, mis tekitab vajaduse pikema konveierisegmendi järele. Seejärel jääb jaama kõrval paiknev stand ette laienenud turvaiale, mistõttu tuleb konveier koosstendiga ümber

kujundada jne. Sedasorti vastastikuse optimeerimise järel jõutakse viimaks parima variandini, kus terve jaam töötab efektiivses ning loomulikus kooskõlas.

Antud robotjaam peab vastavalt kokkulepitule olema suuteline

- tuvastama sagedusmuunduri tüübi ning tema täpse asukoha konveieril,
- kruvima R6 sagedusmuunduri komponendid kokku tsükliajaga maksimaalselt 60 sekundit,
- kruvima R8 sagedusmuunduri komponendid kokku, eemaldades sealjuures positsioneerimistihvtid IGBT moodulitelt, tsükliajaga maksimaalselt 240 sekundit,
- kasutama kahte tüüpi kruvisid – M5 x 12 korpusedetailide jaoks ning M5 x 20 transistoride kinnitamise jaoks,
- registreerima statistika jaoks pöördemomendi, millega iga kruvi kinnitati, ning kruvi järjekorranumbri,
- teenindama kahte robotjaama läbivat konveierit.

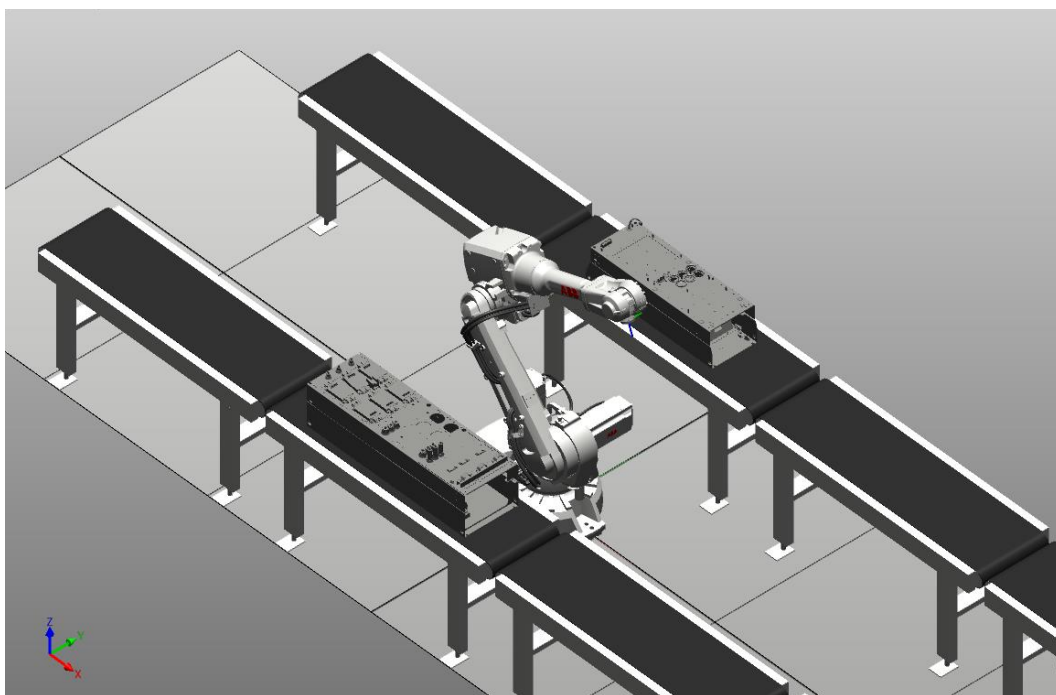
1.1.2 Protsessi etappide kirjeldus

Järgnevalt on samm-sammult kirjeldatud roboti tööprotsess toote sisenemisest kuni selle väljumiseni. Lisaks siintoodud protsessile on roboti poolt juba kokkukruvitud toodet võimalik viia läbi robotjaama konveierile teisel pooljaama. Et toode mööda konveiereid jaamast läbi saaks sõita, tuleb avada luugid mõlemas turvaaias. Siin on aga kirjeldatud robotjaama töö etappe.

1. Turvaaias luuk avaneb, toode siseneb konveieril robotjaama. Luuk sulgub.
2. Masinägemissüsteem tuvastab toote mudeli ning täpse asukoha konveieril.
3. Kui toote mudel on R6, siis kruvib robot kokku erinevad korpuse komponendid pingutusmomendiga 3 Nm.
4. Kui toote mudel on R8, siis robot
 - 4.1. kruvib kokku erinevad korpuse detailid pingutusmomendiga 3 Nm,
 - 4.2. kinnitab transistorid kruvidega ja eelpingutab need momendiga 0,8 Nm,
 - 4.3. eemaldab iga transistori kinni hoidnud positsioneerimistihvtid,
 - 4.4. asetab kruvid aukudesse, kus olid olnud tihvtid, ning pingutab need momendiga 0,8 Nm,
 - 4.5. pingutab kõik transistorikruvid momendiga 3 Nm.
5. Turvaaias luuk avaneb, toode väljub robotjaamast. Luuk sulgub.
6. Robot viib kogutud tihvtid renni, mis juhib need kogumiskasti.
7. Robot ootab uue toote sisenemist.

1.2 Robotjaama esialgne kontseptsioon

Analüüsis ülesannet ja antud nõudeid pannakse paika loodava robotjaama esialgne kavand. Selleks kasutatakse spetsiaalselt ABB tööstusrobotite simuleerimiseks loodud RobotStudio tarkvara, mis võimaldab luua virtuaalseid robotjaamu ja ühendada omavahel erinevaid jaama komponente ning seadmeid. Samuti on RobotStudios olemas ABB tööstusrobotites kasutatav RobotWare tarkvara, mis võimaldab koostada ABB robotite programme *offline* olekus vajamata reaalsel robotikontrollerit [2].

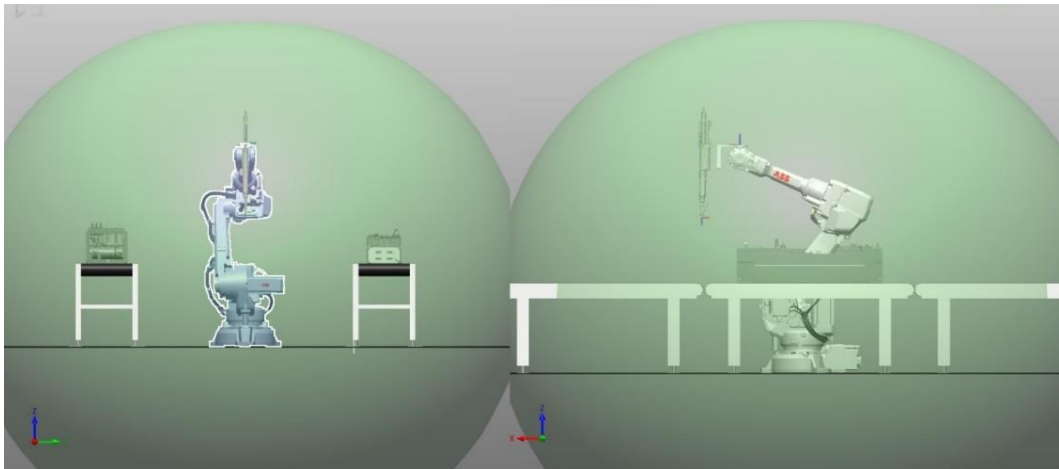


Joonis 1 Esialgne konveierite ning roboti paigutus RobotStudios

Esiteks on teada, et robot teenindab kahte jaama läbivat konveierit. Robotiks on valitud ABB IRB2600 20 kilogrammise kandevõime ja 1,65 meetrise haardeulatusega robot (vt joonis 1), mille valikut on seletatud peatükis 1.3.1. Jaama koostades jälgitakse seda, et konveieritel asuvad tooted, millel robot tööle hakkab, asuksid roboti haardeulatuses. Seda illustreerib heleroheline ala järgneval pildil (vt joonis 2). Konveierid on algelt paigutatud robotist mõlemale poole 500 mm kaugusele. See asetus ei muuda disainitava jaama jalajälge¹ põhjendamatult suureks ning robot ulatub tööriistaga hõlpsalt toodete kohale. Kuna tegu on esialgse paigutusega, võib see asetus

¹ Jalajälg (ing k *footprint*) – tööstuslik termin, mis tähendab seadme või süsteemi poolt hõivatavat pindala [3].

projekti käigus veel muutuda, sest see sõltub paljuski konveierite parameetritest ning kogu jaama turvasüsteemi lahendusest.

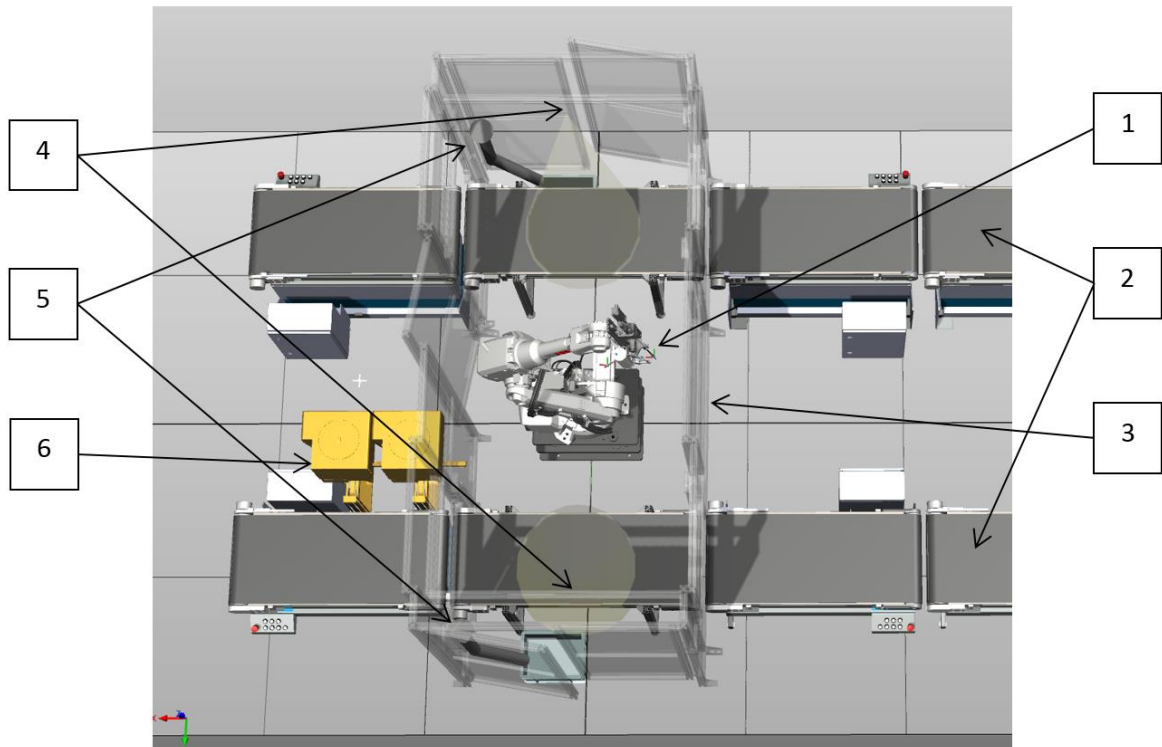


Joonis 2 Roboti haardeulatus näidistööriistaga

1.3 Komponentide valik

Olles paika pannud roboti ja konveierite esialgse asetuse, hakatakse selle ümber arendama ülejäänud robotjaama. Selle robotjaama eesmärk automatiseerida sagedusmuundurite krüvimist ei nõua palju lisaseadmeid, mistõttu on jaama ülesehitus suhteliselt lihtne ja komponentide loetelu lühike. Jaam koosneb järgnevatest osadest, mis on välja toodud ka järgneval illustratsioonil (vt joonis 3).

1. ABB tööstusrobot koos pjedestaali ja tööriistaga
2. kaks jaama läbivat konveierit
3. turvaaed
4. masinnägemissüsteemid mõlema konveieri kohal
5. kogujad, millesse robot asetab kogutud tihvtid
6. kruvikeeraja juurde kuuluvad kruvisööteautomaadid



Joonis 3 Esialgne robotjaama kontseptsioon RobotStudios

Komponentide valiku tegemisel on eelistatud ABB enda tooteid ning ABB ametlikke koostööpartnereid, kui see võimalik on. Viimased tagavad lühemaid tarneaegu ning soodsamaid hindu.

1.3.1 Robot

Antud olukorras tehti roboti valik ära pika eeltöö jooksul, mis käesolevale robotjaama projektile eelnes. Valiti ABB tööstusrobot IRB2600 ja seega ei ole robotivalik autori teha – küll aga võib arutleda, kuidas selle valikuni jõuti ning kas tegu on antud ülesande jaoks kõige optimaalsema robotiga.

Jaama jaoks tööstusrobotit valides on määravateks parameetriteks roboti kandevõime (*payload*) ning haardeulatus (*reach*), samuti roboti tüüp, mis oleneb ülesandest ja töökeskkonnast. Roboteid valmistatakse keevituseks, värvimiseks, masintöötlemiseks, pinkide teenindamiseks, inimesega koostööks, palletiseerimiseks¹ ja paljuks muuks. Kõikides nendes valdkondades asub robot erinevate ohtude ja mõjuritega töökeskkonnas ning nõuded robotile on vastavalt väga erinevad.

¹ Palletiseerimine (ingl *palletizing*) – protsess, milles robot tõstab konveierilt tulevad tooted puust alusele [4].

Praegusel juhul on roboti ülesanne iseenesest üpris lihtne – robot peab kandma kruvikeerajast ning tihvtikollektorist koosnevat tööriista ja liikuma sellega toote kruvikohtadele. Selleks sobivad nõ üldotstarbelised kuuateljelised robotid, milliseid ABB tootevalikus on mitmeid – silma jäävad IRB1600, IRB2400 ning IRB2600 (vt joonis 4) [5].



Joonis 4 ABB IRB2600 tööstusrobot [6]

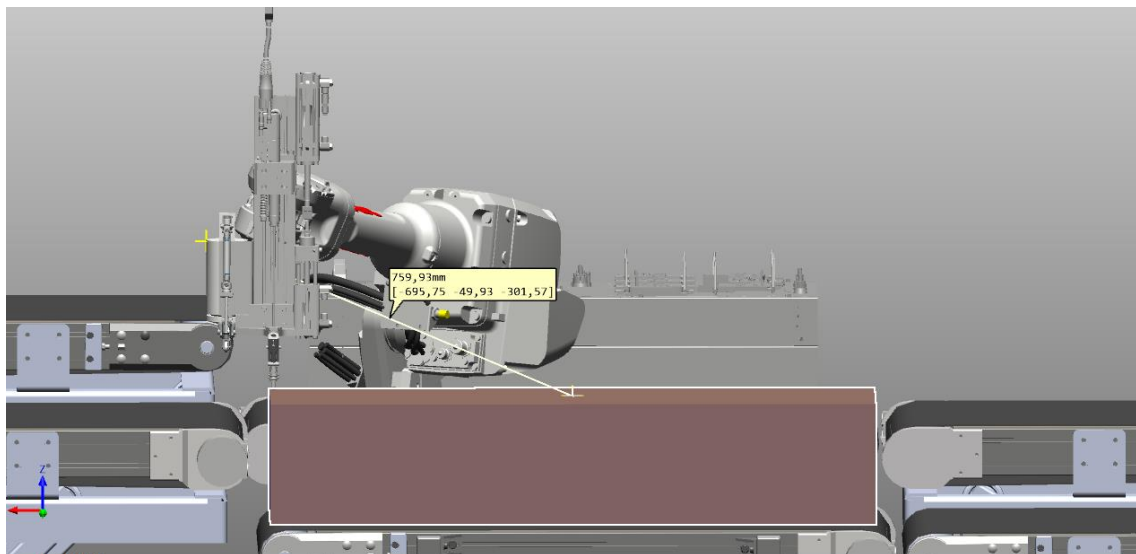
Kõik need robotid on ülesande jaoks piisava haardeulatusega, kuid arvestades kavandatavat tööriista kruvikeeraja ja tihvtikogujaga ning suhteliselt lühikesi töötsüklaeagu, langeb valikust välja IRB1600, kuna selle kandevõime (kuni 10 kg) on liiga väike. Järele jäävad IRB2400 ja IRB2600, kaks küllaltki sarnaste võimetega robotit, mis mõlemad käesolevasse robotjaama sobivad. Konsulteerides ABB müügispetsialist Silver Kalvega selgub, et põhjus, miks eelistada IRB2600 seeria robotit, on selle umbes 20% soodsam hind ning samuti uuem tehnoloogia. Võrreldes mõlema roboti spetsifikatsioone, on näha, et IRB2600 on tunduvalt kompaktsem ja kergem robot kui IRB2400 [7,8].

1.3.2 Konveier

Nagu eelnevatelt piltidelt näha võib, on robotjaamas asuv konveier vaid üks segment pikemast jaama läbivast liinist (vt joonis 3). Samal liinil kõrvuti robotjaamaga asuvad inimeste töökohad, kus enne sagedusmuunduri sisenemist robotjaama toimub selle manuaalne koostamine. Pärast muunduri erinevate osade koostamist liigub see kruvimiseks robotjaama ning seejärel tagasi inimeste ettejärgnevateks koosteoperatsioonideks.

Kuna konveieri ääres töötavad lisaks robotile inimesed, on selle valmistamisele esitatud mitmeid erinõudeid (konveieri reguleeritav kõrgus, lisatud tööriistastendid jm). Siin on aga keskendutud sellele, mis puutub roboti töösse.

Konveierisegmendid peavad olema mõõtudel ja kandevõimelt piisavad kõige suurema toote jaoks, mida selles jaamas tootma hakatakse. Suure R8 mudeli mõõdud on 964 x 300 x 230 mm, kuid kliendi soov on konveier dimensioneerida veel suurema mudeli järgi, mida tulevikus tootma plaanitakse hakata. Selle tulevase toote mõõdud on 1150 x 500 x 500 mm ning see määrab konveieri kahe äärmise rulliku vahelise ala pikkuse ja samuti turvaäia (turvaäida on täpsemalt kirjeldatud peatükis 1.3.3) asukoha, kuna turvaäid peab asuma kahe konveierisegmendi vahel, et mitte katta robotjaama kõrval asuvat inimese tööala. Arvestades juurde tööriista mõõtmed selgub, et konveieri segment peab olema vähemalt 1400 mm pikk (vt joonis 5).



Joonis 5 Robot tööriistaga toodet illustreeriva ristküliku serval ning mõõdetud on tööriista kaugem äär toote tsentrist (ümar datult 700 mm)

Kui oli selgunud, millised on kõige suurema toote mõõtmed, mida sellel liinil valmistama hakatakse, sai lõplikult paika pandud konveieri mõõtmed. Suurema tootega selgus ka asjaolu, et robot ei ulatunud tööriistaga enam terve toote peal liikuma, mistõttu tuli robot asetada 440 mm kõrgusele pjedestaalile. Tasub samuti mainida, et kuigi konveierid inimeste töökohtadel on reguleeritava kõrgusega, on konveier robotjaamas fikseeritud kõrgusel. Kuna lõplikud konveieri mõõdud olid nüüd teada, oli võimalik projekteerida turvaäid.

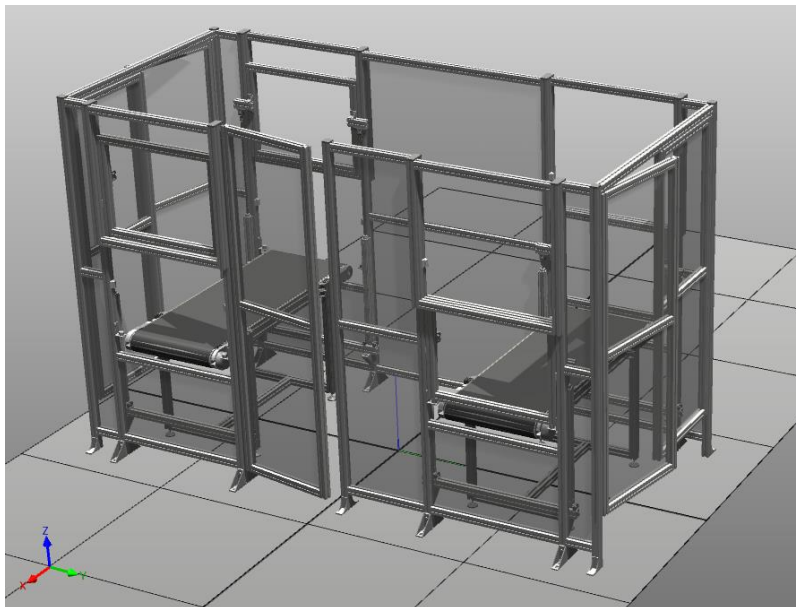
1.3.3 Turvaäid

Robotjaama turvanõuded on sätestatud standardites EN ISO 10218-1:2011 „*Robots for industrial environments - Safety requirements - Part 1 Robot*“ ning ISO 13857 „*Safety of machinery – Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs*“. Need dokumendid määravad ära turvaäia dimensioonid ning turvasensoorika, mida tööstuslikes robotjaamades kasutama peab, et vältida inimeste sattumist alasse, milles ohtlikud seadmed töötavad.

Mõned tähtsamad punktid standardist ISO 13857, mida turvaaija loomisel silmas peeti, on järgnevad [9].

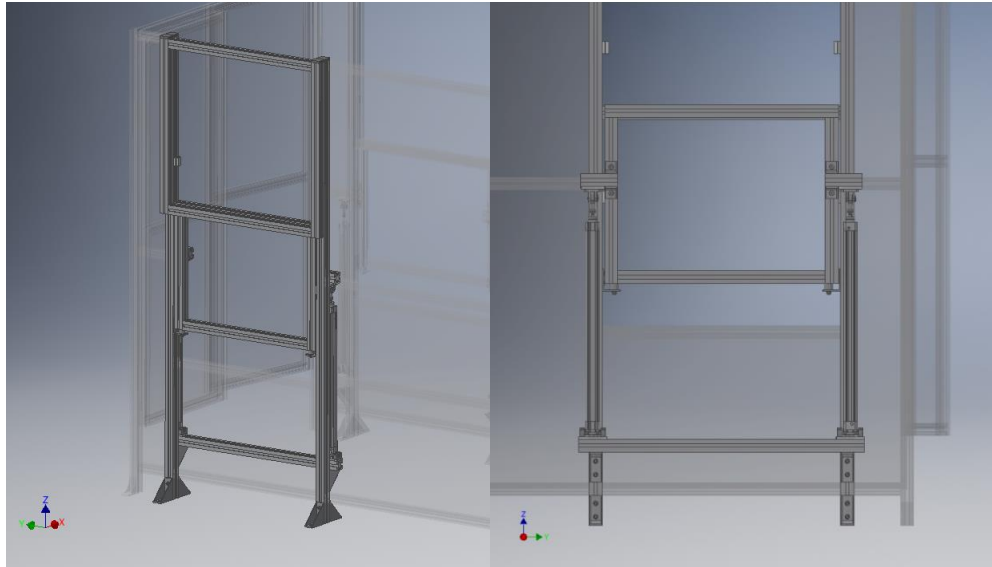
- Kui turvaaed tuleb paigutada ohtlikule seadmele (ruum, milles robot liigub) lähemale kui 200 mm, peab turvaaed olema tehtud paneelidest, mitte metallvõrest.
- Kui turvaaias on pilu, mis on laiem kui 20 mm, peab ohutu kaugus robotist olema 850 mm.
- Avad, mis on suuremad kui 180 mm, ei ole lubatud, kuna inimene või sellest läbi mahtuda.

Nendest nõuetest lähtuvalt projekteeriti turvaaed, mis ümbritseb robotit ning kahte konveierisegmenti (vt joonis 6). Et konveierid ning robot oleks ligipääsetavad, loodi nii külgedele kui ka roboti taha ukсед. Ühe ukse asemel loodi külgedele kaks keskelt avanevat kitsamat ust, et kliendi soovil robotjaama pindala vähendada. Samuti kinnitati turvaaija külge konveierite kohale kaamerad toodete positsiooni määramiseks.



Joonis 6 Turvaaija kujutis RobotStudios koos konveierisegmentidega robotjaamas

Kõige keerulisem ülesanne turvaaija projekteerimisel oli teha turvaliseks avad aias, mille läbi tooted konveieritel robotjaama liiguvad. Avad peavad läbi laskma jaama liikuvad tooted, kuid muul ajal olema suletud, et vältida inimeste ligipääsu roboti tööalale. Selleks projekteeriti pneumaatiliste silindritega avanevad luugid (vt joonis 7).



Joonis 7 Pneumaatilisel jõul avanev luuk robotjaama turvaaias (kahes erinevas vaates)

Kui turvaaias on avad, millest läbi liiguvad tooted või inimesed, kasutatakse robotjaama turvaliseks muutmiseks tihti valguskardinaid. Valguskardinad on kaks paralleelset optilist sensorit, mis registreerivad nende vahele liikuva objekti ning katkestavad turvaahela, peatades ohtlikud seadmed. Selliseid kardinaid ei kasutatud siin seetõttu, et see ei vastaks eelmainitud ISO 13857 standardis sätestatud nõudele – kaugus valguskardinate ja ohtliku seadme vahel peab olema piisav, et seadmel oleks aega seiskuda, enne kui inimene seadmeni jõuab. Standardis on välja toodud valem minimaalse vahekauguse leidmiseks: [9]

$$S = (2000 \cdot T) + 8 \cdot (d - 14) \quad (1.1)$$

kus S – minimaalne kaugus, mm,

T – seadme peatumisaeg ning turvaseadmete reageerimisaeg, s,

d – valguskardina resolutsioon ehk valguskiirte vahekaugus, mm.

Suurima resolutsiooniga Jokab Safety valguskardin (Orion1 mudel) on 14 mm ja IRB2600 peatumisaeg on spetsifikatsiooni järgi 0,2 s [10,9,11]. See tähendab, et minimaalne vahekaugus on valemi 1.1 järgi

$$S = (2000 \cdot 0,2) + 8 \cdot (14 - 14) = 400 \text{ mm}$$

Robot võib töötades asuda valguskardinale umbes 150 mm kaugusel, mis on kõvasti väiksem kui saadud tulemus (400 mm). Seepärast ei vastaks valguskardinate kasutamine siinkohal turvanõuetele.

Luuk koosneb Jokab Safety alumiiniumprofiilist (44 x 44 mm), nagu ülejäänud aedki, ning liigub liugelementide abil ümbritseva struktuuri vahel. Luuk on ühendatud kahe standardse Festo silindriga, mille käigupikkused on 600 mm ja toimivad kahepoolset. Käigupikkus on valitud suurima toote kõrguse järgi (h = 500 mm) koos piisava varuga. Et silindrid konveieritele või tootele ette ei jääks, on need profiilide abil viidud luugi külgedele. Sellest põhjusest tulenevalt on silindreid kaks tükki, mitte üks – luugile rakenduv jõud on sümmeetriline. Ühte luuki on võimalik hõlpsalt juhtida kahe pneumaatilise toruga ühendades omavahel kokku silindrite tagumised tööpordid ja esimesed tööpordid.

Turvaaed on varustatud Jokab Safety ukse sensoritega ning hädapeatusnuppudega, mis moodustavad omavahel robotikontrolleriga ühendatud turvaahela. Uste ning luukide positsiooni määramiseks on kasutatud Jokab Safety kontaktivabu Eden turvasensoreid, aia külge on paigaldatud Smile hädapeatusnupud. Need on ühendatud turvaahelat monitooriva Pluto turvakontrolleriga, mis on ühendatud IRC5 turvasisenditega.

Ahela katkemisel (kui üks avatakse või kui stopp-nupule vajutatakse) seiskub seadmete töö turvaaias kohe. Lisaks turvaahelale on kontrollerisse integreeritud ABB SafeMove turvalahendus, mis võimaldab jälgida roboti tööriista keskpunkti ehk TCP-d (ing k *tool center point*). See võimaldab turvaai luukide avamisele seada tingimuse, et roboti TCP peab asuma parasjagu piisavas kauguses (kodupositsioonil või teise konveieri läheduses) avatavatest luukidest.

1.3.4 Masinnägemissüsteem

Masinnägemine on robotjaama üks tähtsamaid osi, kuna sellest sõltub terve jaama korrektne funktsioneerimine. Kaameral on kriitiline ülesanne tuvastada sagedusmuunduri täpne positsioon ning nurk konveieri suhtes, kuna kraanaga konveierile tõstetud muunduri asukoht võib iga kord olla erinev.

ABB tootevalikus on kaks tööstuslikku kaamerat, mis põhinevad masinnägemistehnoloogiaettevõtte Cognex In-Sight seeria tehnoloogial: keskmise resolutsiooniga (800x600 px) ja kõrge resolutsiooniga (1280 x 1024 px) (vt joonis 8) [12]. Antud olukorras kasutatakse mõlema konveieri kohal kõrge resolutsiooniga kaamerat, kuna tuvastatava objekti mõõtmete ja kaamera kauguse tõttu on vajalik kaamera kõrgem lahutusvõime.



Joonis 8 ABB Integrated Vision kaamera [13]

Integrated Vision liides pakub mitmeid võimsaid mustrituvastus-, pilditötlus- ning matemaatikafunktsioone, mille abil konveieril oleva toote asukoht leida on võimalik. Võimalusi on mitmeid.

Üks võimalus on pildilt tuvastada heleda pinna üleminektumedale. Kuna sagedusmuunduri pind on poleeritud teras, on ta ümberkaudsega võrreldes kõvasti kirkam, mistõttu on kaameraga võimalik tuvastada muunduri piirjooned ning selle abil leida muunduri positsioon ning nurk.

Teine võimalus on masinnägemises laialdaselt kasutatav mustrituvastus, mis otsib pildilt treenitud mustreid. Kaamerale on võimalik õpetada sagedusmuunduri kuju ning leides selle pildilt, annab kaamera automaatselt muunduri koordinaadid.

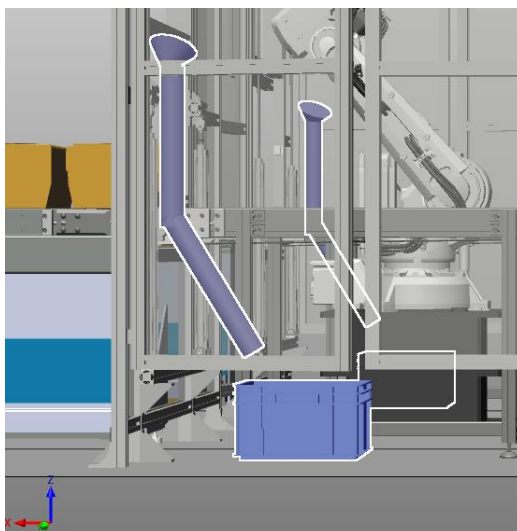
Millist konkreetset meetodit kasutama hakatakse, ei oska autor töö kirjutamise hetkel öelda, kuna kaamera käitumist ennustada on raske ja see nõuab erinevate variantide testimist reaalses töökeskkonnas. Kaamera töö oleneb valdavalt sellest, kuidas detail valgustatud on.

1.3.5 Tihvtide eemaldussüsteem

Roboti tööriist on disainitud selliselt, et see võimaldaks robotil ühe tsükliga eemaldada sagedusmuunduri pealt kõik positsioneerimistihvtid (kui mitte rohkem). Tööriist võimaldab seega tihvte nii koguda kui ka kanda, mis tähendab lühemat tsükliaga, kuna robot ei pea tihvte ära viima peale igat korjamist, vaid siis, kui konveiereid parasjagu teenindada ei ole vaja.

Tihvtikogumisrenni projekteerimisel peeti silmas selle lihtsust, soodsust ning turvalisust. Lihtsus tähendas kõige lihtsama meetodi valimist, mis keerulisi komponente ei vajaks. Soodsus tähendas ülesanne lahendada võimalikult soodsate vahenditega, sealjuures loomulikult kvaliteedil langemata. Turvalisus nõudis seda, et konteiner, millesse tihvtid kogunevad, ei asuks inimesele ohtlikus asukohas ning konteineri tühjendamiseks ei peaks turvaaeda avama ja seiskama roboti tööd.

Kõikidele neile tingimustele vastasid robotjaama nurkadesse paigutatud torud, mis tihvtid torude alla asetatud kastidesse juhtisid (vt joonis 9). Kastidele on hõlbus ja turvaline ligipääs turvaaiast. Kuna kastide maht on tihti mahuga võrreldes väga suur, mahub neid kasti väga palju ning kaste ei pea tihti tühjendama, mis on mugav ka töötajatele.

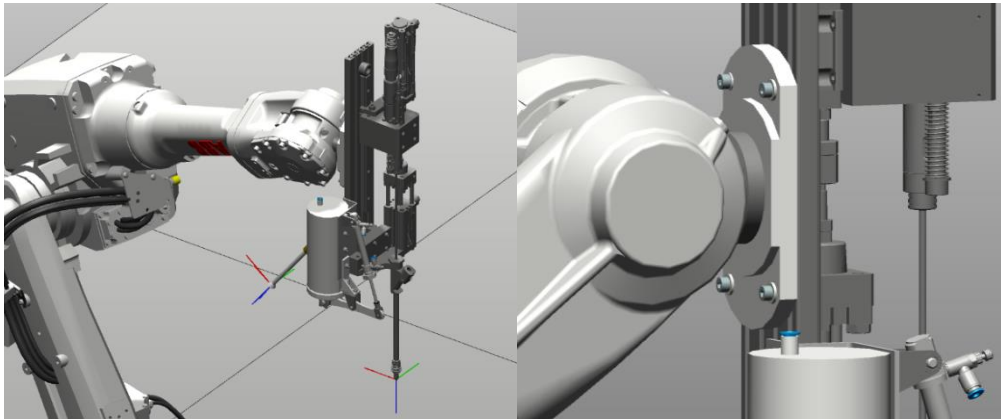


Joonis 9 Torude kujutised jaama nurkades

2. ROBOTI TÖÖRIISTA ARENDUS

Roboti tööriista arendamine algab ülesande ja selle võimalike lahendusvariantide analüüsimisest. Kaalutakse erinevaid mooduseid ülesande lahendamiseks, erinevail tööpõhimõttele toimivaid tööriistu (mehaaniline, pneumaatiline, elektriline) ning nende eeliseid/puuduseid antud olukorras. Loomulikult uuritakse, kas varasemalt on tehtud analoogseid projekte, et mitte iga kord uuesti „ratast leiutada“.

Selle konkreetse robotjaama ülesandeks on kruvide kinnitamine ning positsioneerimistihvtide eemaldamine tootelt. Peale esmast uuringut järeldati, et sellist ülesannet, nagu tihvtide kogumine, ei ole tööstuses robotiga veel lahendatud või vähemalt ei ole selle kohta mingit informatsiooni avaldatud. Seepärast ei olnud võimalik ühtegi olemasolevat lahendust eeskujuks võtta ning tegu on mõnes mõttes pilootprojektiga.



Joonis 10 IRB2600 koos tööriistaga RobotStudios. Kinnitus roboti flantsiga

Ülesandest lähtuvalt koosneb tööriist kahest osast: automaatne kruvikeeraja ning tihvtide koguja (vt joonis 10, lisa 1). Mõlemad tööriistad on ühendatud roboti flantsi külge, kuna tööriistade vahetamine ei ole tsükliaja seisukohast mõeldav. Kruvikeeraja moodul on kinnitusflantsi vahendusel kinnitatud roboti külge. Kruvikeeraja profiili külge oli omakorda hõlbus kinnitada tihvtikogumislahendus. Selle toru ning kruvikeeraja otsik on paigutatud omavahel nurga alla, mistõttu saab robot mugavalt vaheldumisi mõlemat tööriista kasutada.

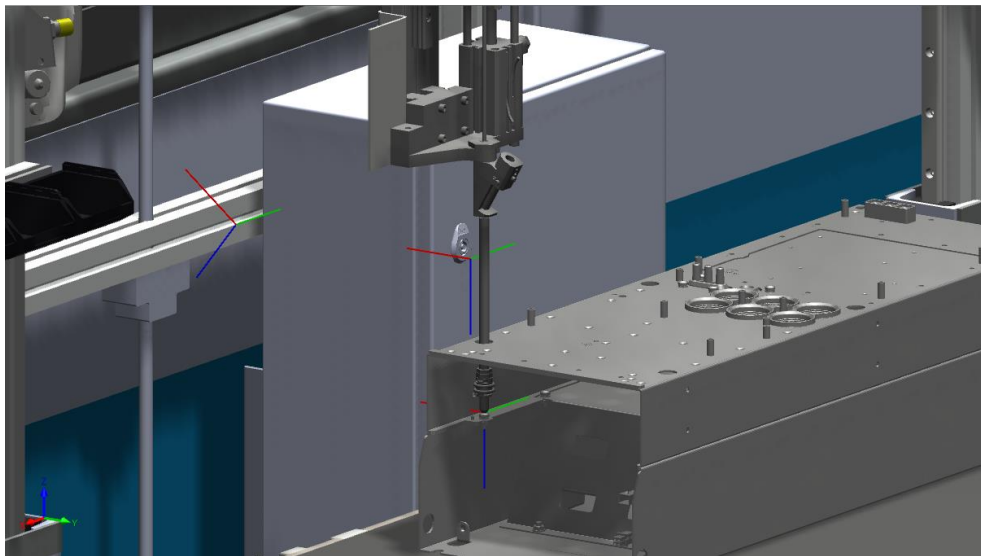
2.1 Tööriista komponendid

2.1.1 Kruvikeeraja

Kruvikeerajaks valiti kruvikeeramistehnoloogiale spetsialiseeruva Saksa firma Deprag SFM-N seeria kruvikeeraja, kelle edasimüüja Eestis on pneumaatikaseadmetega tegelev ettevõtte Pneumacon Oy

Eesti. See konkreetne kruvikeeraja võimaldab kinnitada kruvisid pöördemomendiga 0,06 – 20,00 Nm, mis sobib antud olukorras suurepäraselt [14].

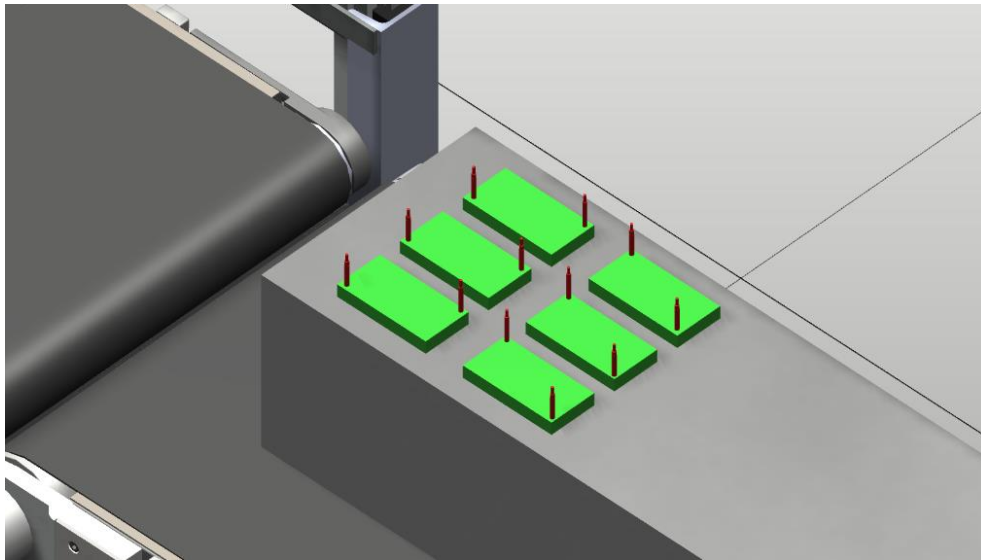
Kruvikeerajale oli vajalik teha kaks modifikatsiooni. Esiteks, kuna teatud kruvipositsioonid ei asu sagedusmuundurite korpuste pinnal, tuli kruvikeeraja otsa 150 mm võrra pikemaks teha, et see ulataks kruvisid asetama läbi avade ka korpuse sisse. (vt joonis 11). Teiseks tuli kruvikeerajaga kinnitada kahte erinevat tüüpi kruvid (M5 x 12 ning M5 x 20 tüüpi). Sellised nõuded esitati Pneumaconile, kes koostöös Depragiga soovitud kruvikeeraja koostasid. Kruvikeeraja tarniti valmislahendusena ning ABB seda enam ei muutnud.



Joonis 11 Kruvikeeraja kinnitamas kruvi läbi ava korpuse sisemusse

Automaatne kruvikeeraja töötab põhimõttel, kus kruvisööteautomaadid söödavad ühendatud toru vahendusel kruvikeeraja spindli ette kruvi, mis seejärel kinni keeratakse. Esmalt liigub robot toru otsaga kruviaugu kohale. Seejärel söödetakse kruviauku sobiv kruvi. Kruvikeeraja spindel, millel on kruvile vastav otsik, liigub alla ning rakendub mootor, mille jõul keeratakse kruvi kinni. Spindel liigub uuesti üles ning kruvikeeraja on valmis järgmiseks tsükliks. Sellist tööriista kasutades on võimalik saada järjepidevalt väga täpse kinnitusmomendiga kruviliiteid.

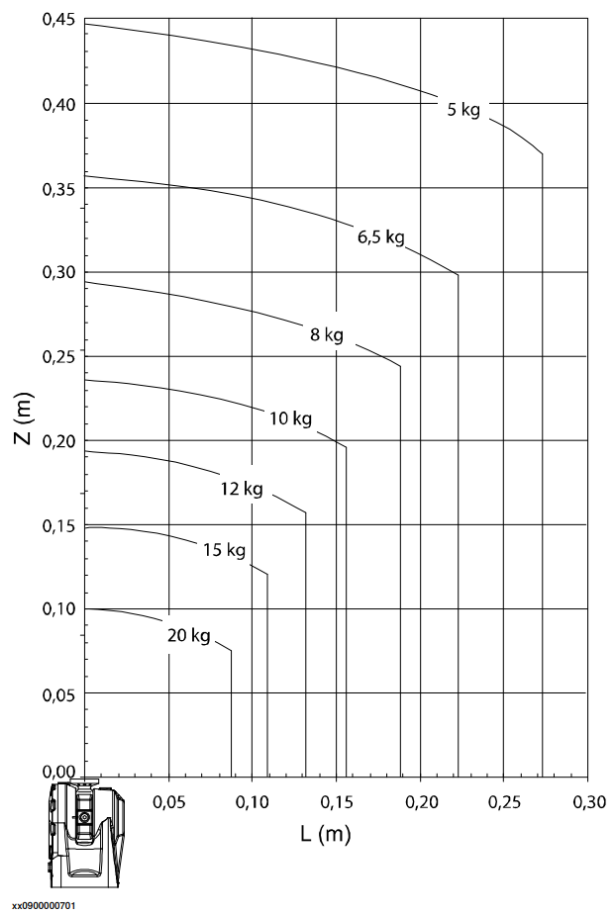
2.1.2 Tihvtikoguja



Joonis 12 Suurema sagedusmuunduri representatsioon, millel asuvad IGBT-d koos positsioneerimistihvtidega

Vaatamata eelmainitud kahele muudatusle on kruvikeeraja standardne toode, tihvtide koguja tuli ülesande spetsiifilisuse tõttu aga täielikult nullist projekteerida. Siin on tegu klassikalise haaramis-ülesandega, mida saab lahendada väga erinevat moodi: elektromagneti, pneumaatilise, elektrilise või mehaanilise haaratsiga. Lahendust luues peeti silmas, et see vastaks järgmistele tingimustele.

- Robot ei pea ühe töötsükli jooksul tihvte ära viima rohkem kui üks kord. See tähendab, et tööriist peab olema suuteline haarama ühelt tooteltkõik 12 tihvti korraga või haarama need ühe või kahe kaupa ning neid hoiustama. See on oluline tingimus lühikese tsükliaja tagamiseks.
- Tööriist peab koosnema võimalikult paljudest standardsetest komponentidest, mida vajaduse korral on lihtne välja vahetada.
- Tööriist peab olema võimalikult kerge, arvestades roboti maksimaalset 20-kilogrammist kandevõimet. Roboti spetsifikatsiooni järgi muutub kandevõime seda väiksemaks, mida kaugemal tööriista raskuskese roboti flantsist asub (vt joonis 13) [15][15]. On ka võimalik, et raskuskese asub flantsile lähedal, kuid kiirelt suure kaaluga tööriista liigutamisest tekkinud inertsvõib hakata robotit kahjustama.



Joonis 13 Diagramm, mis näitab IRB2600 kandevõimet (kg) ning tööriista raskuskeset (m) kahe telje sihis [15]

Kõigepealt kaalutleti mehaanilist lahendust. Kõige lühema tsükliaja tagaks lihtne mehaaniline haarats, mis sobitub täpselt tihvtide positsioonide peale ning haarab korraga kõik 12 tihvti, kuid kliendiga läbi rääkides jõuti otsusele, et selline lahendus on liialt spetsiifiline käesolevale tootemudelile. Tulevikus planeeritavate toodete IGBT-de asetus võib olla teistsugune ja sel juhul ei saaks haaratsit enam kasutada. Seetõttu oli kliendi soov see, et robot korjaks tihvte ühe kaupa.

Järgmisena kaaluti pneumaatilist haaratsit. Kui selgus, et robot peab tihvte korjama ükshaaval, uuriti standardseid paralleelhaaratseid. Selliseid pakuvad mitmed ettevõtted, sealhulgas Festo ja Schunk. Selliste standardsete haaratsite külge saab ühendada korjatava objekti kujuga sobituvad sõrmed, nagu järgneva illustratsiooni Schunki haaratsil ka näha on (vt joonis 14).



Joonis 14 Festo DHPS ja Schunk MPG paralleelhaaratsid väikeste komponentide haaramiseks [16,17]

Arvestades aga seda, et tihvte tuleb ühe tsükli jooksul korjata 12 tükki, on lisaks tihvti haaramisele vajalik selle teisdamine kogumiskarpi roboti tööriista küljes. See eeldaks haaratsi kinnitamist pöörleva telje külge või kogumiskarbi liikumist haaratsi alla, et tihvt haaratsi vahelt sinna kukkuda saaks. Samuti oleks tarvilik avatav luuktihvtide vabastamiseks või pöörav mehhanism kogumiskarbi küljes. Pööravat liigutust on võimalik teha ka roboti viimast telge üle 90° pöörates, kuid suhteliselt pika kruvikeeraja ja piiratud ruumi tõttu ei mahu robot selliseid liigutusi tegema. Lahendus vajab tööriista võimalikult vähest pööramist.

Lõpuks jõuti tööriista variandini (vt peatükk 2.2), mis ei vaja lisatud pöörlevaid telgi, omab minimaalselt liikuvaid osi ja koosneb põhiliselt standardsetest komponentidest.

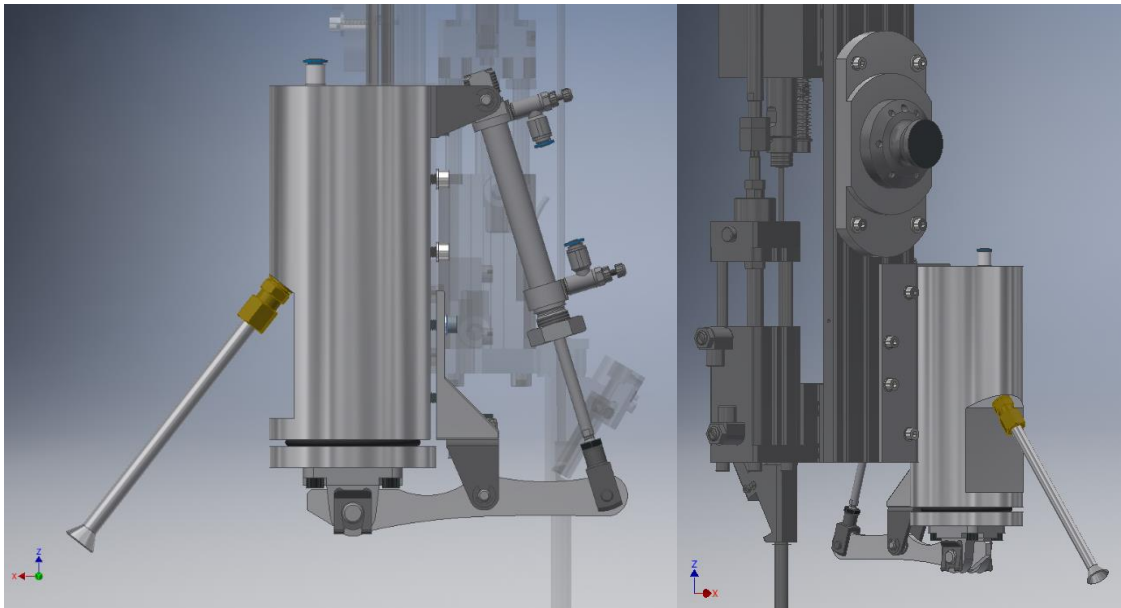
2.2 Tihvtikogujast täpsemalt

2.2.1 Tööpõhimõte

Tihvtikogumistööriist töötab vaakumpõhimõttel. Kui robot on liikunud tööriista torusuudmega tihvti kohale, aktiveeritakse vaakumgeneraator, misjärel tõmbab õhuvool tihvti läbi toru korpusesse. Korpus on seest õõnes silinder, mis kannab tihvte nii kaua, kuni robot töötsükli lõpetab. Töötsükli lõpus liigub robot tihvtide äravoolutoru kohale, kus rakendatakse suruõhk kahetoimelise silindri teisele pordile, silinder sulgub ning klapp avaneb, lastes kogunenud tihvtidel torusse kukkuda. Tööriista pneumaatiline skeem on välja toodud lisas Lisa 3 Tihvtikoguja pneumaatiline skeem ning elektriliste ühenduste skeemid robotikontrolleriga lisas 4.

Tihvtikogujat on kujutatud järgnevail pildidel ning lisas 2 (vt joonis 15, lisa 2). Vasakpoolsel pildil on näha korpus, mille külge on ühendatud toru tihvtide kogumiseks ning pneumaatilise silindriga

avanev klapp nende vabastamiseks. Parempoolsel on näha tihvtikogu ja roboti ühendusplaat ja flants kruvikeeraja profiiliga.



Joonis 15 Tihvtide kogu

2.2.2 Ehitus

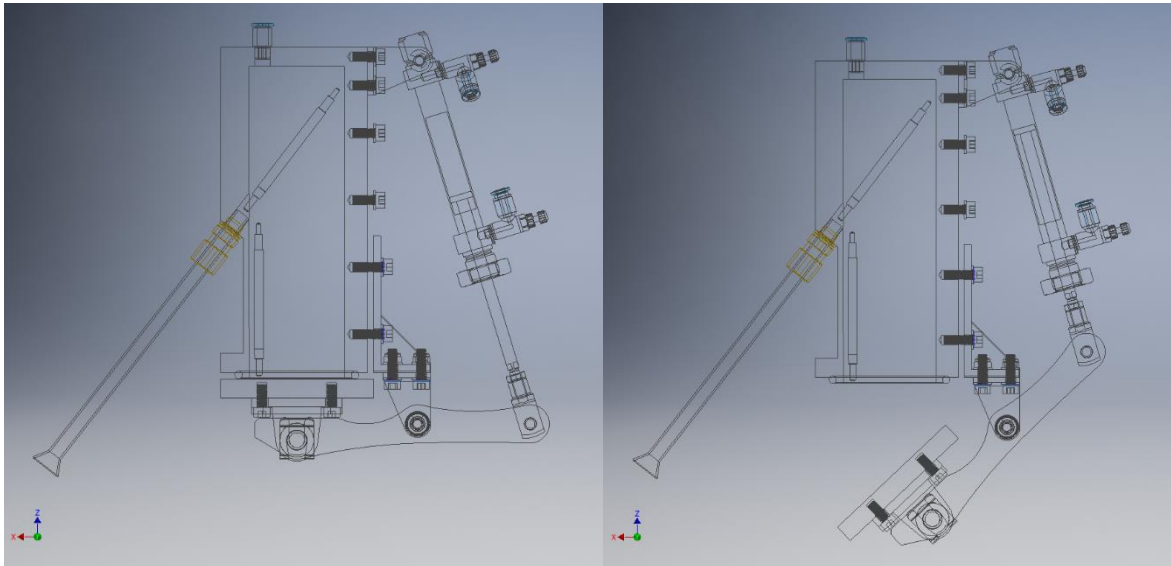
Tööriista keskse osa moodustab silindrikujuline alumiiniumist valmistatud seest tühi korpus (vt lisa 2). Korpus on dimensioneeritud selliselt, et see mahutaks vähemalt ühe tsükli jagu tihvte ning ei oleks põhjendamatult suur ning raske. 160 mm kõrguse, 50 mm sise- ning 80 mm välisläbimõõduga silindrisse mahub tihvte hulgaliselt, isegi mitme tsükli jagu. Kui arvestada, et tihvtide sisendtoru all on korpuses ruumala kõrgusega $H = 80$ mm (pool 160 mm-st) ning raadiusega $R = 25$ mm ja tihvt on läbimõõduga $d = 5$ mm ning kõrgusega $h = 80$ mm, võib arvutada, mitu tihvti korpusesse mahub.

$$n = \frac{V_{korpus}}{V_{tihvt}} = \frac{H \cdot \pi r^2}{h \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{314\,000 \text{ mm}^3}{1570 \text{ mm}^3} = 200 \quad (2.1)$$

Arvutades valemiga 2.1 välja korpuse ning tihvti ruumalad ja need omavahel jagades, selgub, et korpus mahutab teoreetiliselt 200 tihvi, enne kui tihvtide kogus sisendtoru ummistama hakkab.

Selliste mõõtmetega korpus on piisava seinamaterjaliga mitteläbivate poldiaukude puurimiseks, millele kinnituvad terasest ühendusplaat ja silinder. Mida vähem on korpuses avasid, seda vähem on kohti, kust õhk lekkida saab ning seda kvaliteetsem on vaakum. Korpuse silindriline kuju annab samuti eelise näiteks kandilise karbi ees, kuna kandilise karbi seinu tuleb omavahel liita ja tihendada, mis monoliitse alumiiniumsilindri puhul vajalik ei ole. Kinnituseks on kasutatud standardseid varieerivas pikkuses M5-sisekuuskantpolte, seibe ning mutreid.

Silindri sisemus on umbes kahe tihvti pikkune ning toruava on paigutatud natuke kõrgemale kui tihvti pikkus (vt joonis 16). See tagab selle, et tihvtid ei kogune ava ette, mis võiks põhjustada tihvti kinnijäämist torru. Samuti on oht, et tihvt kukub korpusesse sisenemisel torru tagasi, kuid silindri sisemus on mõõtmetelt piisavalt suur, et tihvt väljuks täies pikkuses torust ning põrkaks hooga vastu silindri siseseina, keerates end seinaga paralleelseks ning maandudes toruavast mööda.



Joonis 16 Vaade tööriistale lõikes. Suletud ja avatud positsioonid

Vaakumgeneraatorina kasutatakse Piab VGS5010 mudelit [18]. Sellist konkreetset mudelit kasutatakse seetõttu, et seda on varasematest projektidest üle jäänud ning juba töökojas olemas. See tähendab, et vaakumgeneraatorit ei pea eraldi tellima ning kulud tööriista ehitamisel on selle võrra väiksemad.

Vaakumgeneraator on ühendatud liitmikuga korpuse ülalosas, korpuse alumises osas on ava, mida katab alumiiniumist klapp. Klapp on kuullaagril istuva õla kaudu ühendatud kahetoimelise pneumosilindriga – toimub jõuülekanne silindrilt klapile. Tegu on Festo DSNU seeria ümarsilindriga, mille kolvi läbimõõt on 12 mm ning käigupikkus 50 mm [19].

See silinder on kompaktne ja kerge, kuid rakendab jõuõla vahendusel luugile siiski enam kui piisava jõu. Käigupikkus 50 mm valiti tööriista korpuse pikkuse järgi ning võeti aluseks jõuõla projekteerimisel. Peeti silmas seda, et silindri sulgumisel klapp piisaval määral avaneks, et tihvtid välja kukuksid. Jõuõla tugipunkt valiti õla keskele, mis annab optimaalse jõu ning klapi avanemise suhte.

Et korpuse allosas olev ava hermeetiliselt sulguks, on ava serv tihendatud kummist O-rõngaga ning klapp on ühendatud hoovaga, mis laseb klakil mõne kraadi võrra õõtsuda. Jäiga ühenduse korral võiks klappavale asetuda ebatäpselt, jättes sisse õhupilu, mis vähendaks vaakumi tugevust.

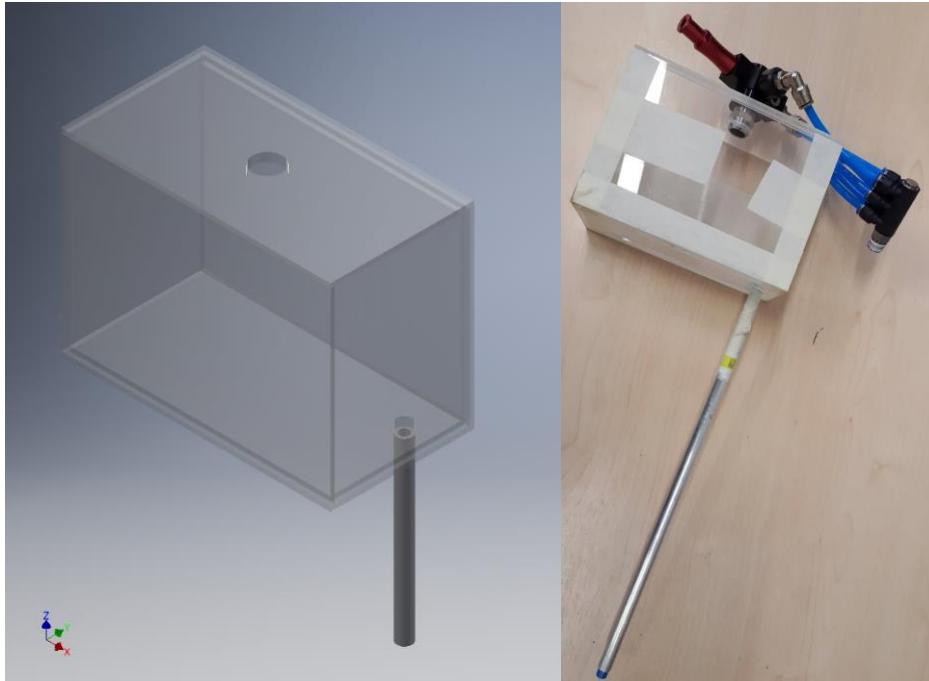
Tihvtide tõmbamiseks korpusesse kasutatakse alumiiniumtoru välisdiameetriga 8,00 mm ja seinapaksusega 1,00 mm. Sellise toru sisediameeter (6,00 mm) sobib hästi tihvtide jaoks, mille läbimõõt on 5,00 mm. Toru ots on lõõdud koonuseliseks, et kompenseerida ebatäpsust tihvti pea asukohas, mis tuleneb sellest, et tihvtid istuvad kruviaukudes lõtkuga. Toru on korpusega ühendatud survekiitmikuga. Kiitmik on keeratud avasse korpuse seinal asuvas sisselõikes 52° nurga all silindri pinnast. Selline nurk saadi optimeerimise tulemusena, kus jälgiti mitut asjaolu. Esiteks, et aval oleks piisav sügavus kiitmiku keerme jaoks. Teiseks, et nurk ei oleks nii suur, et robot, tööriista kallutades, enam turvaeda ära ei mahuks. Kolmandaks, et tihvt jõuaks korpuse sisemusse jõudes täies pikkuses torust välja enne seina vastu põrgates.

Tihvtide koguja koosneb seega alumiiniumdetailidest, erinevatest Festo toodetest, ühest survekiitmikust, O-rõngast ning kinnituselementidest. Alumiiniumdetailide materjaliks on valitud sulam AW-6082 T6, mida tarnib Eestis näiteks ettevõtte Metal Express OÜ, kelle kataloogis sobivad toorikud leiduvad [20].

2.3 Tihvtikoguja testimine

Disainiprotsessi algul viidi läbi tihvtikogumistööriista tööpõhimõtte testi, mille eesmärk oli teada saada, kas eelmises peatükis kirjeldatud meetod on rakendatav. Testimiseks loodi tööriistale analoogne prototüüp.

Prototüüp koosneb karbist, karbi külge ühendatud sobiva läbimõõduga torust ning vaakumgeneraatorist (vt joonis 17). Karbi seinad freesiti CNC-masinal 4 mm paksusest pleksiklaasist (PMMA) ja ühendati käepäraste vahenditega – maalriteibi ning kuuma liimiga. Generaator kinnitati auku karbi laes, toru auku karbi põhjas.



Joonis 17 Pleksiklaasist prototüüp vaakumi testimiseks. Mudel ja valmis prototüüp

Testimine kulges järgnevalt: Rakisel olevatesse aukudesse asetati positsioneerimistihvtid. Vaakumgeneraatori sisendport ühendati õhukompressoriga, milles oli rõhk 4 bari. Prototüübi toru viidi tihvti kohale ja generaatorile rakendati suruõhk. Tekkinud õhusurve imes tihvti suure kiirusega karbi sisemusse.

Pleksiklaasist ning maalriteibist valmistatud karbis esines õhulekkeid palju rohkem kui võib eeldada loodava alumiiniumist silindri puhul. Ruumalalt oli karp silindriga sarnane. Vaakumi genereerimisel kasutati madalamat rõhku kui tööstuslikus olukorras (6 bari). Arvestades neid asjaolusid võib järeldada, et katse oli edukas ning selline tihvtide kogumise meetod on rakendatav.

2.4 Tihvtikoguja kulu

Seadet projekteerides peab insener lisaks kõikidele tehnilistele aspektidele silmas pidama ka seadme kulukust, mille alla kuuluvad komponentide ja materjalide hinnad, detailide töötlemiskulu ja samuti projekteerimisele, jooniste tegemisele ning koostamisele kulunud inseneri töötunnid. Tähtis on leida optimaalne tasakaal kvaliteedi ning hinna vahel, kuna liialt kallis, kuigi kvaliteetne, lahendus ei pruugi turul lihtsalt konkureerida.

Suurema osa komponentide hinnast moodustavad alumiinium-materjali töötlemine ning Festo komponendid, ülejäänud komponendid on võrdlemisi väiksed ning odavad. Seetõttu on alumiiniumdetailid projekteeritud selliselt, et neid oleks võimalikult lihtne töödelda.

Tööriista mehaaniliseks projekteerimiseks ning komponentide valikuks kulus autoril kaks nädalat tööd, mis tundide arvestuses on 80 tundi. Sellele lisandub veel detailide ning koostejooniste loomine (vt lisad 1, 2), komponentide tellimine,ööriista koostamine ning roboti programmeerimine, millele kulub autori ennustusel veel vähemalt kolm nädalat tööd. Kokku teeb see 200 töötundi ning kui arvestada, et palgad.ee andmetel on disainiinseneri keskmine kuine netopalk 1399 €, võib arvutada, et selliseööriista valmistamisele kulub umbes 2340 € [21].

3. ROBOTJAAMA SIMULEERIMINE

Enne reaalse robotjaama koostamist luuakse RobotStudio keskkonnas jaama täpne mudel. Konveierite, turvaaiad, toodete ning muude komponentide CAD-mudelid paigutatakse koos roboti mudeliga RobotStudio keskkonda vastavalt reaalse jaama paigutusele. Loodud robotjaama mudel ühendatakse RobotStudio virtuaalse robotikontrolleriga, mis võimaldab roboti ning seadmete liikumist simuleerida. Kuna virtuaalne kontroller on olemuselt sama päris kontrolleriga, toimub roboti programmeerimine täpselt samas keskkonnas.

Simulatsiooni käigus loodud jaama juhtimisprogramm on võimalik koos kontrolleri seadistusega tõsta otse üle reaalsesse robotikontrollerisse, et päris robotjaama juhtida. Seega on simuleerimise käigus võimalik ära teha suur osa robotjaama programmeerimistööst.

Robotjaama simuleerimine on hädavajalik etapp jaama loomeprotsessil. Simuleerides virtuaalse robotiga läbi kõik roboti liikumisteed, on võimalik ennetada palju võimalikke probleeme roboti telgede konfiguratsioonides, singulaarsustega liikumisteedadel ning kokkupõrgetel ümberkaudsete objektidega. Erinevalt simulatsioonist võib roboti kokkupõrge seadmetega reaalses situatsioonis olla tõsiste tagajärgedega, lõppedes vigastustega inimestele või seadmete purunemisega. Simulatsioonis saab samuti lihtsalt seadmete asetust muuta, et leida roboti optimaalseim liikumine.

3.1 Tsükliäeg

Simulatsiooniga testitakse ühte tähtsamaid aspekte robotjaama töö juures – roboti töösüklikiirust. See tähendab aega, mille vältel robot teostab kavandatud operatsioonid ühel tootel ehk läbib ühe töösükli. Tööstuse automatiseerimise mõtte seisneb osaliselt selles, et robot suudab operatsioonid läbida kiiremini kui inimene. Kui robot seda ei suuda, ei tasu robotjaama loomine end ära, kuna käsitsi toota on efektiivsem. Seetõttu arvutatakse välja teatud tsükliäeg, millele jaam peab vastama, et investering robotiseerimisse end ära tasuks ning esmase kinnituse sellele annab jaama simulatsioon.

Tsükliäega mõjutavad mitmed aspektid: roboti liikumiskiirus, liikumisteed ja tööriista töökiirus. Kuigi robot on võimeline liikuma väga kiiresti (kuni 7000 mm/s lineaarselt ning 500 kraadi/s tööriista pöörämisel), on reaalselt võimalik kasutada palju väiksemaid kiiruseid arvestades tööriista mõõtmeid ja kaalu. Roboti kiirus peab olema võimalikult suur, kuid mitte nii suur, et tekkiv inert robotit lõhkuma hakkaks.

Optimeerides roboti liikumisteedasid on võimalik vähendada tsükli aega mitmeid sekundeid. Tähtis on programmeerida punktid, kus robot seisma jääb, ainult teekonna lõpp-punktidesse. Ülejäänud teekonnal tuleb kasutada punkte, millest robot hooga möödub (selle määrab RAPID koodis *zonedata*). Tulemus on sujuv teekond, kus robot ei pea liialt pidurdama ega kiirendama.

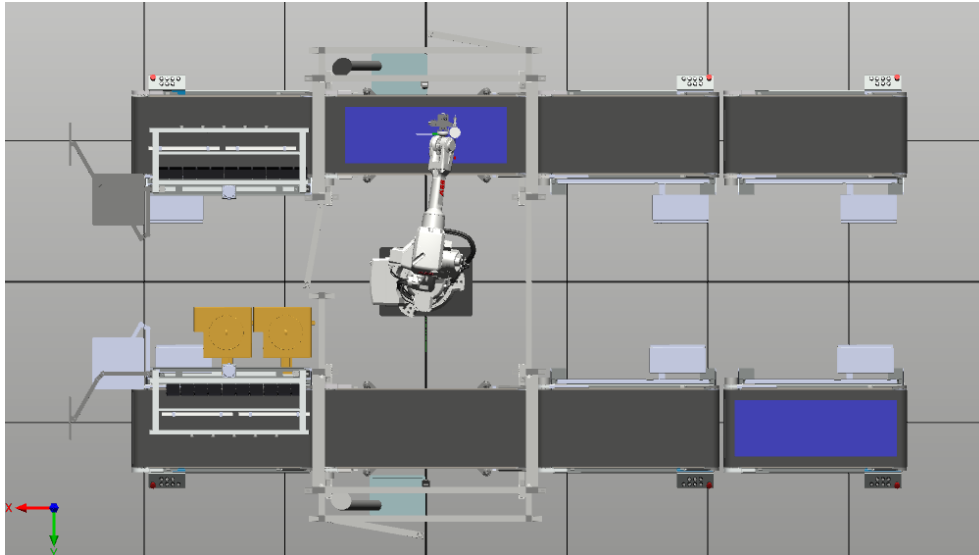
Suur mõju tsükli ajale on tööriistal. Kui robot peab ühe töötsükli jooksul kruvima mitukümmend kruvi, on suur erinevus selles, kas automaatsel kruvikeerajal kulub kruvi kinnitamiseks kaks või kolm sekundit.

Robotjaamal oli ette nähtud 240 sekundit suurema toote töötsükliks ning 60 sekundit väiksema toote töötsükliks. Simulatsiooni tulemusena selgus, et väiksema toote töötsükkel võtab mõnevõrra vähem, 50 sekundit aega ning suurema toote töötsükkel pisut rohkem 250 sekundit aega. Laias laastus võib öelda, et simuleeritud tsükli ajad jäävad nõutud piirkonda ning kuna tegu on ideaalse olukorraga, erineb reaalne tulemus sellest kindlasti.

3.2 Robotjaama simulatsioon RobotStudios

ABB robotitarkvara põhineb ABB RAPID kõrgetasemelisel programmeerimiskeelel, mis on välja töötatud spetsiaalselt ABB tööstusrobotite programmeerimiseks. Järgnevalt on simuleeritud robotjaama tööd liinil, mida illustreerib allolev pilt (vt joonis 18). Näha on kahte konveieriliini, mille keskel asub robotjaam, ning nendel asuvaid tooteid (sinised kastid). Mõlemal pool robotjaama asuvatel konveieritel on inimeste töökohad. Simulatsiooniks loodud programmi struktuur põhineb algoritmil, mis järgib peatükis 1.1.2 välja toodud protsessi.

Algoritmi kirjeldatakse kolmes osas: üldine robotjaama algoritm, roboti töötsükli algoritm, roboti töötsükli algoritm suurema tootemudeli puhul. Lisaks on välja toodud protsessi algoritm, kus juba kruvitud toode liigub läbi robotjaama töökohale teisel pool jaama. Algoritmid on esitatud vastavalt lisades 5 kuni 8.



Joonis 18 Süsteem pealtvaates

3.2.1 Üldine algoritm

Kui robotisüsteem on käivitatud ning programm initsialiseeritud, jääb jaam ootama operaatore käsku töö alustamiseks. Kuna manuaalsed operatsioonid toimuvad nii enne kui pärast robotiseeritud krüvimist, on operaaloril võimalik viia toode otse läbi robotjaama konveierile teisel pool jaama, mille protsessialgoritmi on kirjeldatud peatükis 3.1.4.

Kui operaalor vajutab vastavale nupule kasutajaliidesel, algab krüvimistsükkel (vt lisa 5). Esmalt kontrollitakse seda, et roboti TCP ehk tööriista koordinaadistik ei asuks avatava luugi läheduses, et vastata seatud turvanõuetele. Süsteemi korrektse toimimise puhul ei tohikski robot seal asuda, kuna mõlemal konveieriliinil mahub korraga valmistama ühte toodet (vt joonis 18). Kui luuk avatakse, peab seal asuv konveier olema tühi, robot töötama teisel konveieril või ootama kodupositsioonil uue toote saabumist.

Luuki liigutavad silindrid sulguvad ning luuk konveierite vahel avaneb. Seejärel käivituvad konveierid, mida mööda liigub toode robotjaama. Järgnevalt toimub roboti töötsükkel. Peale krüvide kinnitamist liigub robot uuesti kodupositsioonile või järgmise toote juurde. Luuk avaneb, toode liigub jaamast välja ning luuk sulgub. Viimaks, kui tihvtikoguja vajab tühjendamist, liigub robot seda tühjendama. Peale seda naaseb robot kodupositsioonile ning jääb ootama järgmise toote sisenemist.

3.2.2 Roboti töötsükkel

Kui toode on sisenenud jaama, toimub vastavalt algoritmile toote tuvastamine masinnägemise abil – tuvastatakse kas väiksem mudel või suurem, IGBT-dega mudel. (vt lisa 6). Samuti tuvastab roboti kontrolleri külge ühendatud kaamera toote täpse asukoha ning nurga konveieril.

Väiksema mudeli puhul liigub robot toote kohale, kinnitab kruvid toote korpuse pinnale ning liigub tagasi kodupositsioonile, misjärel lõppeb roboti töötsükkel. Suurema tootemudeli puhul järgneb protsess, mida kirjeldab järgneva peatüki algoritm (vt peatükk 3.1.3).

3.2.3 Roboti töötsükkel suurema toote puhul

Kui on tuvastatud, et robotjaama on liikunud suurem tootemudel, toimub üks lisakontroll (vt lisa 7). Kontrollitakse, kas positsioneerimistihvtid asuvad täpselt ettenähtud kruviaukudes või mitte. See kontroll on väga vajalik, kuna tihvtid asetab aukudesse eksimisvõimeline inimene ning juhul, kui tihvt asub vales augus, võib robot kruvikeeraja spindliga sellesse sisse sõita ning kruvikeeraja ja/või toote ära lõhkuda.

Siinkohal tuleb mainida, et ABB Integrated Vision kaamera ei pruugi olla võimeline seda kontrolli veatult teostama, arvestades kaamera suhteliselt suurt kaugust tootest ning tihvtide väikseid mõõtmeid. Nagu öeldud peatükis 1.3.4, on kaamera tööd teoreetilisel baasil raske hinnata ning vajalikud on empiirilised testid reaalses situatsioonis, mida selle töö kirjutamise ajal paraku läbi viia ei saadud. Autor ennustab, et teatud seadistuste puhul võib kaamera tihvte tuvastada, kuid kui see ei ole suuteline seda töökindlalt tegema, tuleb kasutada teistsugust sensorikat roboti tööriista või konveieri küljes.

Kui tihvtide asukohad on teada, liigub robot toote kohale. Esmalt kinnitatakse kruvid korpusesse, seejärel kinnitatakse eelpingutatud kruvidega IGBT-d. Robot vahetab tööriista ning liigub tihvtikogujaga tihvtidele, kogudes tootelt järjest kõik tihvtid. Seejärel kinnitatakse eelpingutusega kruvid aukudesse, kus tihvtid olid olnud. Lõppeks pingutab robot täielikult kõik kruvid, mis IGBT-sid kinnitavad ning naaseb kodupositsioonile, millega lõppeb suurema toote töötsükkel.

3.2.4 Toote läbilaskmine

Kui robot on tootele kruvid kinnitanud ning inimene vajalikud operatsioonid teostanud, liigub toode läbi jaama viimasele konveierisegmendile, mille jaoks peavad luugid turvaaias avanema (vt lisa 8). Selle jaoks toimub esmalt roboti TCP asukoha kontroll, kuna roboti asumine avanevate luukide läheduses tähendab turvariski. Kui robot on ohutus kauguses, sulguvad silindrid ning avanevad

luugid mõlemas turvaia seinas. Toode liigub konveieritel läbi robotjaama. Silindrid rakenduvad ning luugid sulguvad uuesti, kui toode ei asetse enam robotjaamas.

4. JÄRELDUSED

Käesoleva bakalaureusetöö raames kirjeldati robotjaama loomisprotsessi, kus automatiseeriti tööstusrobotiga sagedusmuundurite krüvimist. Töö kirjutamise ajal on projekt jõudmas staadiumisse, kus saavad lõpliku kinnituse robotjaama planeering, komponentide valik ning tööriista disain. Robotjaama reaalne koostamine algab alles peale selle töö valmimist, seega toetub töö põhiliselt teooriale, kogemustele ning mudelitele. Kuna tegu on autori esimese projekteerimistööga, on järgnevalt analüüsitud projekti kulgu – millised inseneriteadmised on selliseks tööks vaja, mida õpiti ja mida võiks tulevikus paremini teha.

Roboti tööriista projekteerimine nõuab insenerilt mitmekülgseid teadmiseid. Esiteks, kuna tegu on robotiga, peab ta hästi tundma seda, milleks robot võimeline on ning kuidas robot on võimeline liikuma. Hästi tuleb tunda erinevaid robothaaratsi tüüpe, et osata valida vastavalt olukorrale sobivaim: mehaaniline, pneumaatiline, elektriline või vaakumhaarats. Kuna tihti tuleb erinevate komponentide ühendamiseks projekteerida kinnitusflantse ning -plaate, tuleb osata arvestada detailidele mõjuvaid jõudusid ja need vastavalt dimensioneerida, valides sobiva materjali, olgusee robotiprojektides tihti kasutatav alumiinium, teras, POM (polüoksümetüleen) või mõni muu materjal. Loodud mehaanilise süsteemi liigutamiseks kasutatakse tihti pneumaatilisi täitureid või elektrimootoreid koos sensorikaga, mille juhtimist insener tundma peab. Viimaks tuleb tööriist ühendada robotiga, konfigureerida vastavad signaalid ning testida tööriista toimimist. Seega ühendab tööriista disainimine teadmiseid mehaanikast, materjaliteadusest, pneumaatikast, elektroonikast ning programmeerimisest.

Nagu autor projekti käigus täheldas, on inseneritöö puhul kõige tähtsam aspekt kommunikatsioon. Projekti edukal kulgemisel on olulisim pidev infovahetus nii meeskonnasiseselt kui ka kliendiga. Kui mitu inimest arendab korraga ühe projekti erinevaid detaile, peavad kõik muutustega kursis olema, sest muutused ühes robotjaama osas võivad põhjustada vajaduse muuta midagi hoopis teises jaama osas. Samuti on tähtis olla tihedas koostöös kliendiga, et projekti üldine kurss püsiks õige ning tulemus saaks kliendi soovile vastav.

Et selliseid projekte tulevikus efektiivsemalt läbi viia, on tähtis projekti algul võimalikult täpselt välja uurida kliendi probleem ja millist lahendust ta sellele soovib, samuti küsimuste tekkides kliendilt selgitusi küsides. Selle projekti algul kulutati väga palju aega erinevate disainide arendamisse, mis lõpuks kasutuks osutusid, kuna klient soovis hoopis teistsugust lahendust näha. Automatiseerimisülesandesse tuleks suhtuda väga metoodiliselt: kirjeldada erinevate variantide eeliseid ning puudujääke, valida nende hulgast sobiv ning selle variandiga tööle asuda. Selliseid

põhimõtteid õppis autor projektist ning loomulikult muutuvad lahendused just seda paremaks, mida kogenumaks saab insener.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli disainida robotitööriist robotjaama jaoks, mis suudab etteantud tingimustes teostada kruvimist ning positsioneerimistihvtide kogumist montaažiliinil sagedusmuundurite tootmises.

Töö esimene osa annab ülevaate kogu robotjaama arendamisprotsessist. Kirjeldatakse seda, kuidas ülesandest lähtuvalt valitakse tööstusrobot, erinevad vajalikud komponendid, kuidas need komplekteeritakse ning omavahel töötama pannakse.

Teine osa keskendub robotitööriistale. Analüüsitakse erinevaid lahendusvõimalusi, sealhulgas mehaaniline haarats või standardne pneumaatiline haarats, kuni jõutakse lõpliku variandini, milleks on automaatse kruvikeerajaga ühendatud vaakumsüsteem positsioneerimistihvtide kogumiseks (vt joonis 15). Kirjeldatakse tööriista tööpõhimõtet, komponente, rahalist kulu ning empiirilist testi, mis teostati, et tõestada selle lahenduse toimimist.

Peale robotjaama ning tööriista projekteerimist simuleeriti roboti tööd virtuaalses robotjaamas, kontrollimaks seda, et robot loodud tööriista vajalikesse kohtadesse ulatub. Samuti andis simulatsioon kinnituse tsükliajale ehk ühe toote töötlemise ajale, mis oli piisavalt lühike. Töö kolmas osa kirjeldab algoritme, mille põhjal robotisüsteem toimib.

Töö viimases, neljandas osas on analüüsitud tehtud töö käiku ning tulemust. Autor on välja toonud selle, mis ta projekti käigus õppis ning mida tulevikus paremini teha võiks.

Selle bakalaureusetöö raames on edukalt projekteeritud robotitööriist sagedusmuundurite kruvimiseks ning positsioneerimistihvtide korjamiseks. Loodud tööriista, robotjaama disaini ning esialgse juhtimisprogrammiga võib edasi liikuda projekti järgmise etapi juurde, milleks on komponentide tellimine ning reaalse jaama koostamine.

SUMMARY

The purpose of this bachelor thesis is to design a robotic tool for an industrial robot cell, which can at given circumstances perform the screwdriving and collecting of positioning pins on an assembly line for frequency converters.

The first part of the thesis gives an overview of the development of the whole robot cell. Based on the task, the appropriate industrial robot and necessary components are chosen, put together in a cell and integrated.

The second part focuses on the robotic tool. Different possibilities are considered, such as a mechanical gripper or a standardized pneumatic gripper, and a choice is made for a tool consisting of an automatic screwdriver and a vacuum system for collecting positioning pins (see figure 15). The working principle, components, cost and an empirical study proving the validity of this solution is described in detail.

When the tool and the robot cell have been designed, the robot's working paths are simulated in a virtual robot station. This is to ensure that the robot can reach all the necessary spots using the designed tool. The simulation also verifies the cycle time or the time needed to process one product, which was sufficiently short. The third part of the thesis describes the algorithms used for the programming of the robot.

The fourth and final part of the thesis analyzes the work that has been done. The author has brought out the lessons he learned during the project and what could be improved upon in the future, in his opinion.

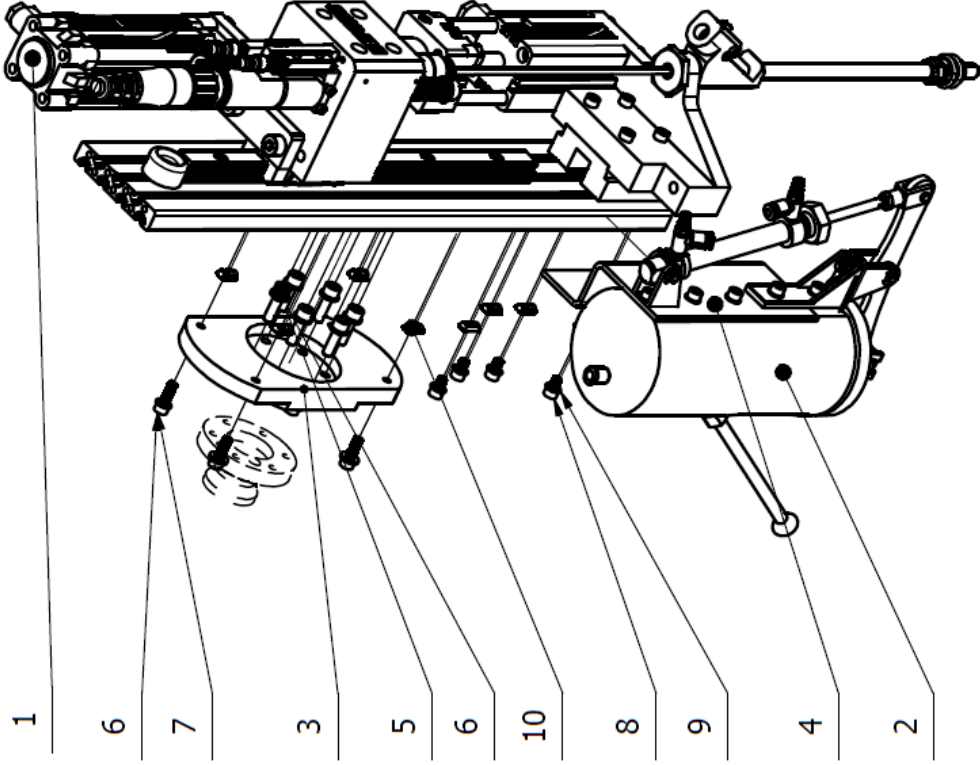
As a result of this bachelor thesis, a robotic tool for the screwdriving of frequency converter details and the collecting of positioning pins for a robot cell has been successfully developed. With these robot cell and tool designs the project can move into its next stage, which is ordering the components and installing the robot cell on the shop floor.

KASUTATUD KIRJANDUS


- [1] Salminen, S., Tallberg, T. *Human errors in fatal and serious occupational accidents in Finland* – Ergonomics, 1996, 39, pp. 980-988.
- [2] RobotStudio, ABB.
<https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio> (06.04.2019).
- [3] “*footprint*”, Dictionary.com.
<https://www.dictionary.com/browse/footprint> (11.05.2019).
- [4] “*palletizing*”, Dictionary.com.
<https://www.dictionary.com/browse/palletize> (11.05.2019).
- [5] Robot selector, ABB.
<https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/robot-selector> (03.03.2019).
- [6] IRB2600 tööstusrobot, ABB.
<https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-2600> (14.04.2019).
- [7] IRB2400 data sheet, ABB.
http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PR10034EN_R7&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch (15.04.2019).
- [8] IRB2600 data sheet, ABB.
http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0142EN_B&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch (15.04.2019).
- [9] *Safety of machinery – Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs*, ISO 13857:2008.
- [10] ABB Safety Products catalogue, Jokab Safety.
<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2TLC010001C0202&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (08.05.2019).
- [11] *Product Specification – Robot stopping distances according to ISO 10218-1*, ABB. 3HAC048645-001.
- [12] Product specification – Integrated Vision, ABB.
<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC046868-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (20.04.2019).
- [13] Integrated Vision, ABB.
<https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/vision-systems/integrated-vision> (20.04.2019).
- [14] Screwdriver Function Module, SFM-N, product catalogue, Deprag.
https://www.deprag.com/fileadmin/bilder_content/emedi/broschueren_pics/emedi_Automation/D3310/D3310en.pdf (21.04.2019).

- [15] IRB2600, product specification, ABB.
<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC035959-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (20.04.2019).
- [16] Parallel grippers DHPS, Festo.
https://www.festo.com/cat/et_ee/products_DHPS (15.04.2019).
- [17] MPG, Schunk.
https://schunk.com/de_en/gripping-systems/series/mpg/ (15.04.2019).
- [18] VGS5010 vacuum pump, Piab.
https://www.piab.com/en-US/products/vacuum-pumps/combined-pump-and-gripper-vgs/vgs5010_/#overview (07.05.2019).
- [19] ISO cylinder DSNU-12-50-P-A, Festo.
https://www.festo.com/cat/et_ee/products_DSNU_1?CurrentPartNo=19192 (21.04.2019).
- [20] Tootekataloog, Metal Express OÜ.
<https://metalexpress.ee/wp-content/uploads/2016/11/Kataloog.pdf> (22.04.2019).
- [21] Disainiinseneri keskmine netopalk Eestis, palgad.ee.
<https://www.palgad.ee/salaryinfo/mehaanika/disainiinsener> (27.04.2019).

LISAD



TÜKITABEL		
Osa	Nimetus	Hulk
1	Kruvikeeraja	1
2	Tihvikoguja	1
3	Kinnitusplaat roboti flantsiga	1
4	Kinnitusplaat tihvikogujaga	1
5	Sisekuuskantpolt M6x20	6
6	Seib M6	9
7	Sisekuuskantpolt M5x16	4
8	Sisekuuskantpolt M5x8	4
9	Seib M5	5
10	T-mutter M5	8

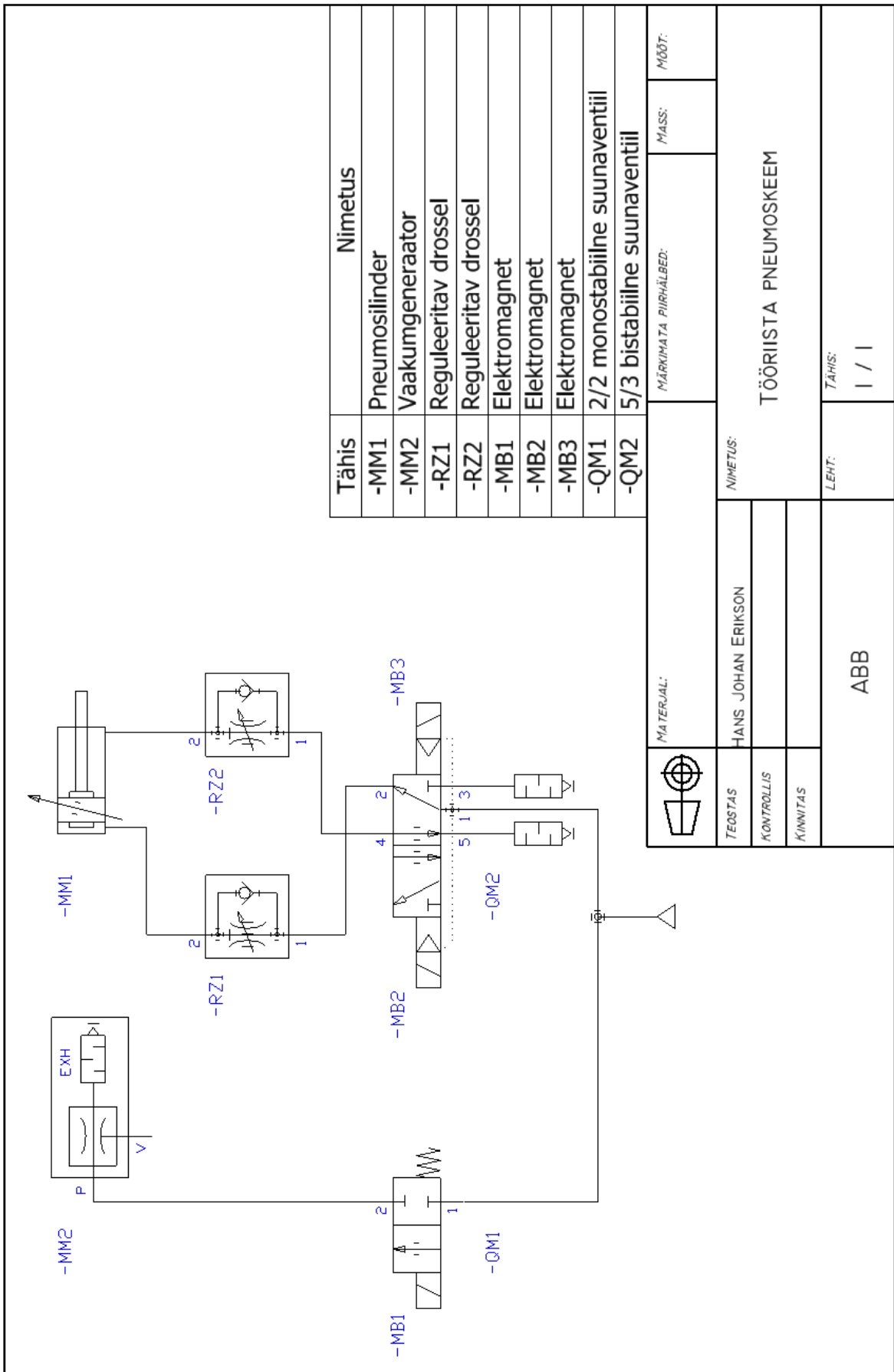
	MATERJAL:	MÄRKIMATA PIIRHALBED:	MASS:	MÕÖT:
TEOSTAS	HANS JOHAN ERIKSON		N/A	1:4
KONTROLLIS		NIMETUS: ROBOTITÖÖRIIST		
KINNITAS				
ABB		LEHT:	TÄHIS:	
		1 / 1		

Lisa 2 Tihvtikoguja koostejoonis

Osa	Nimetus	Hulk
1	Korpus	1
2	Luuk	1
3	Õlg	1
4	Toru	1
5	Kinnitusnurk	1
6	Ümarsilinder, 50 mm	1
7	Kahvelhoob	1
8	Hoob	1
9	Hoova kinnitus	2
10	Kiirliitmik	1
11	Reguleeritav kiirliitmik	2
12	Surveliitmik	1
13	Kuullaager	1
14	O-rõngas	1
15	Sisekuuskantpolt M5-16	4
16	Sisekuuskantpolt M5-12	2
17	Lukustusmutter M5	2
19	Seib 5	10

MATERJAL:	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED:	MASS:	MÕÖT:
		N/A	1 : 2
TEOSTAS	NIMETUS:		
KONTROLLIS	TIHVTIKOGUJA		
KINNITAS			
ABB	LEHT:	TÄHIS:	
	I / I		

Lisa 3 Tihvtikoguja pneumaatiline skeem



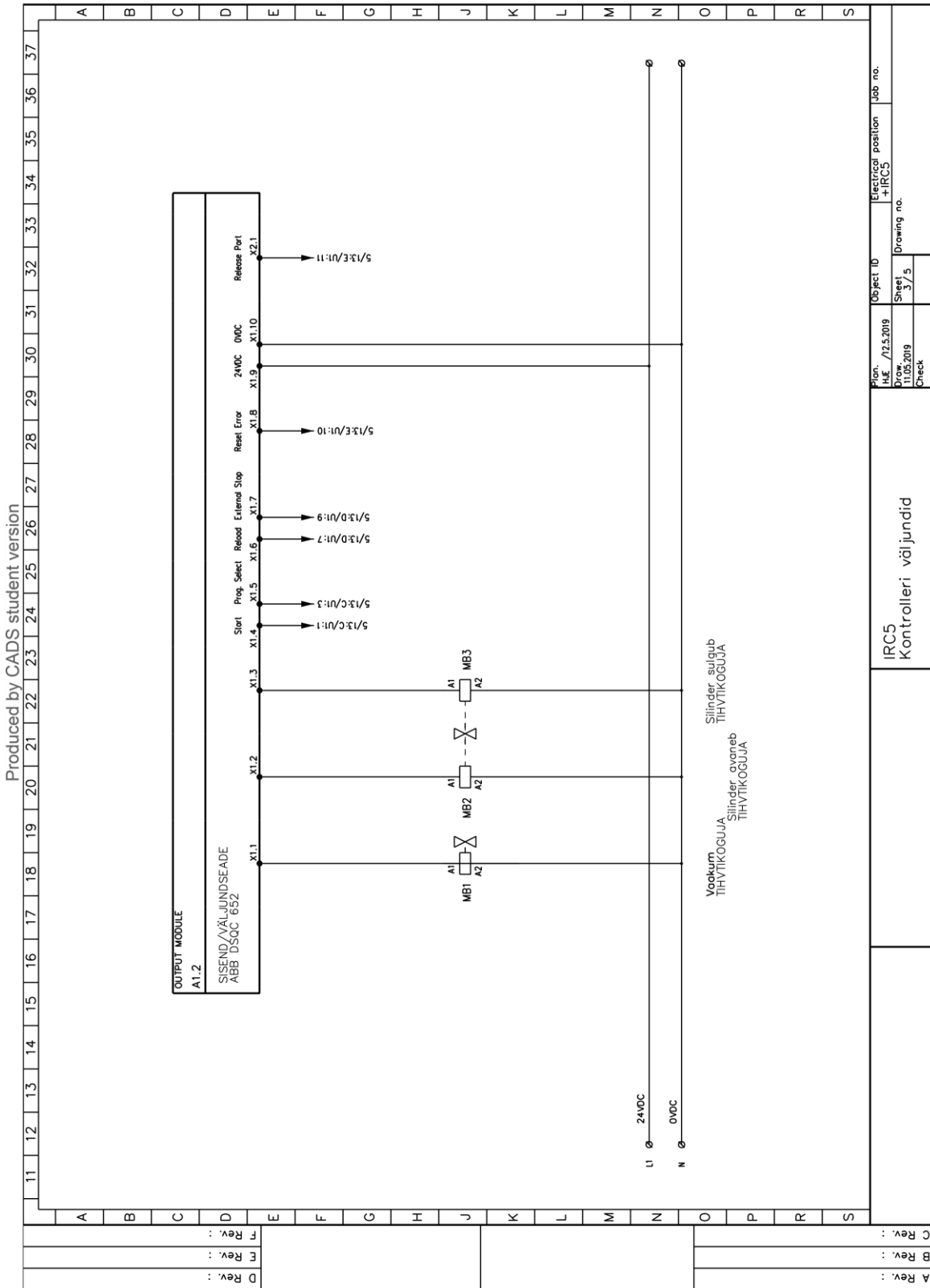
Lisa 4 Tööriista elektriskeem

Produced by CADs student version

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37							
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	R	S																	
							<p>Tööriista juhtimine</p> <p>Lisa 4</p>																	<table border="1"> <tr> <td>Plan.</td> <td>Objekt ID</td> <td>Electrical position</td> <td>Job no.</td> </tr> <tr> <td>H/E /12.5.2019</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Plan.	Objekt ID	Electrical position	Job no.	H/E /12.5.2019			
Plan.	Objekt ID	Electrical position	Job no.																														
H/E /12.5.2019																																	
							<table border="1"> <tr> <td>Draw.</td> <td>Sheet</td> <td>Drawing no.</td> </tr> <tr> <td>11.05.2019</td> <td>17/3</td> <td></td> </tr> </table>		Draw.	Sheet	Drawing no.	11.05.2019	17/3		<table border="1"> <tr> <td>Check</td> <td></td> </tr> </table>		Check																
Draw.	Sheet	Drawing no.																															
11.05.2019	17/3																																
Check																																	
																								<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Tiitelient</td> </tr> </table>		Tiitelient							
Tiitelient																																	
																								<table border="1"> <tr> <td>A Rev. :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B Rev. :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C Rev. :</td> <td></td> </tr> </table>		A Rev. :		B Rev. :		C Rev. :			
A Rev. :																																	
B Rev. :																																	
C Rev. :																																	
							<table border="1"> <tr> <td>D Rev. :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>E Rev. :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>F Rev. :</td> <td></td> </tr> </table>		D Rev. :		E Rev. :		F Rev. :																				
D Rev. :																																	
E Rev. :																																	
F Rev. :																																	
							<table border="1"> <tr> <td colspan="2">14.5.2019</td> </tr> </table>		14.5.2019																								
14.5.2019																																	

Produced by CADs student version

Produced by CADs student version



A Rev. :	
B Rev. :	
C Rev. :	

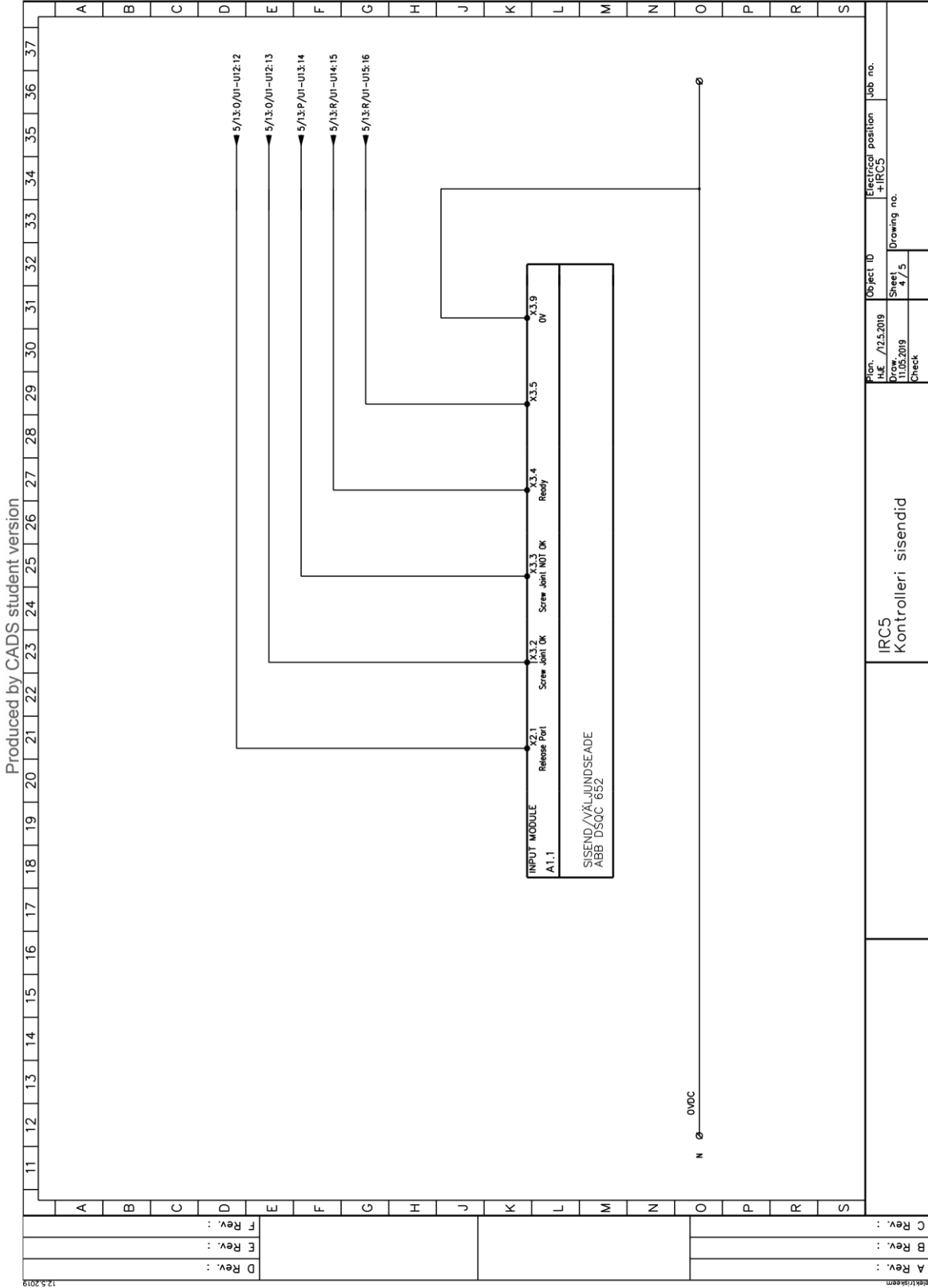
D Rev. :	
E Rev. :	
F Rev. :	

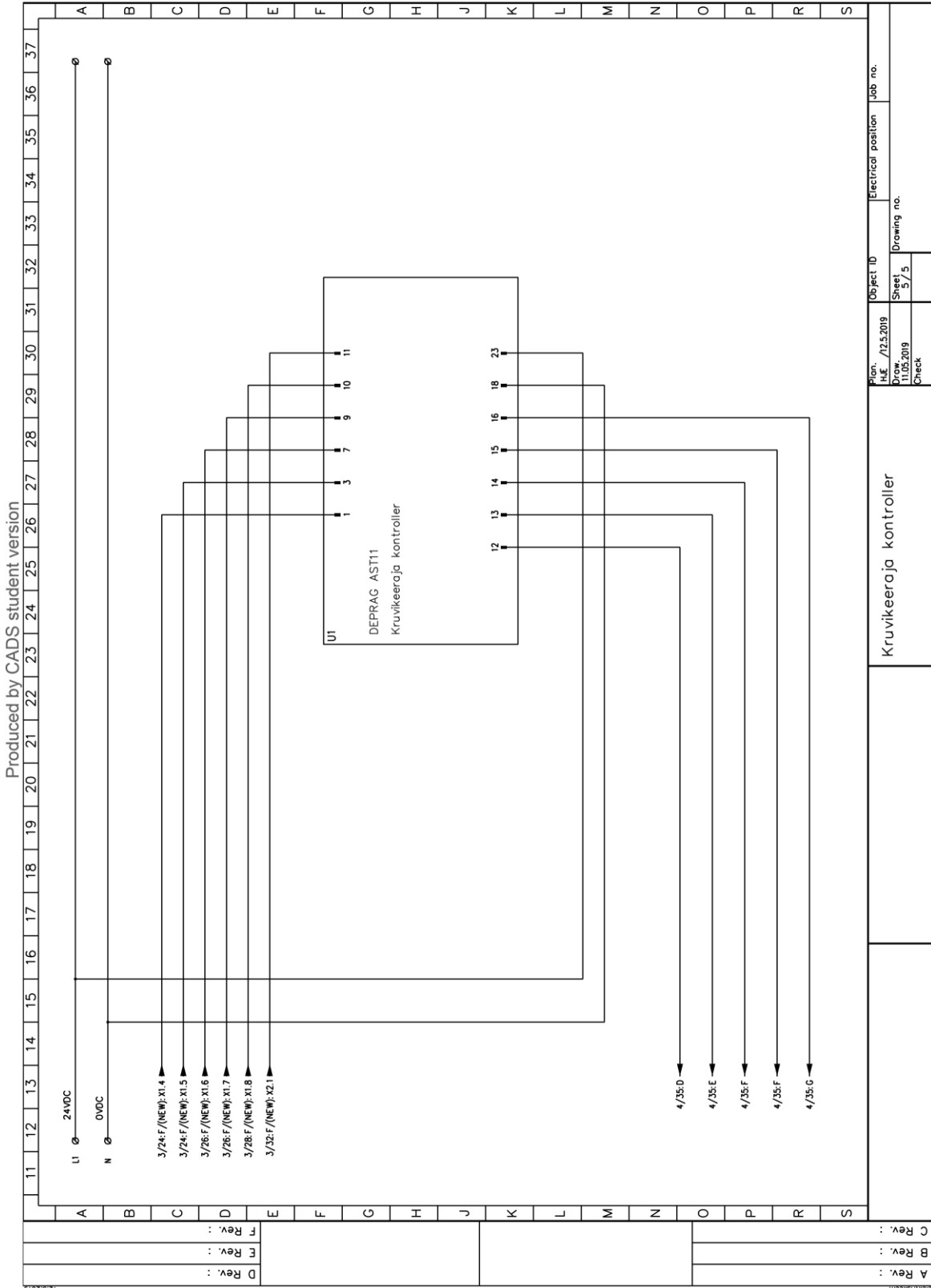
Object ID	Sheet	Drawing no.
11.05.2019	3 / 5	
11.05.2019	Check	

Placed	7/25.2019	Electrical position	Jobb no.
Drawn	11.05.2019	+IRCS	
Check			

IRCS	Kontrolleri väljundid
------	-----------------------

Produced by CADs student version



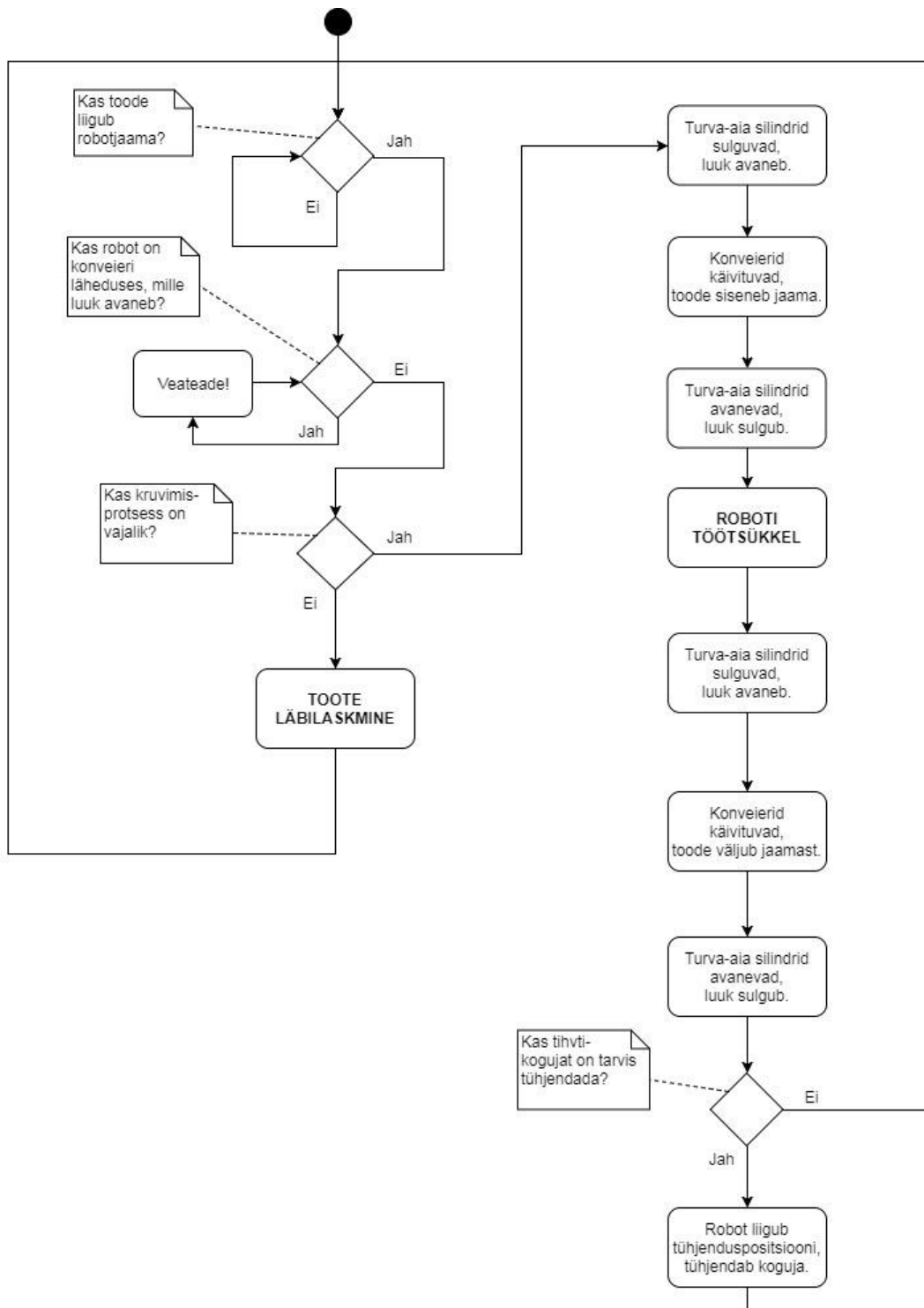


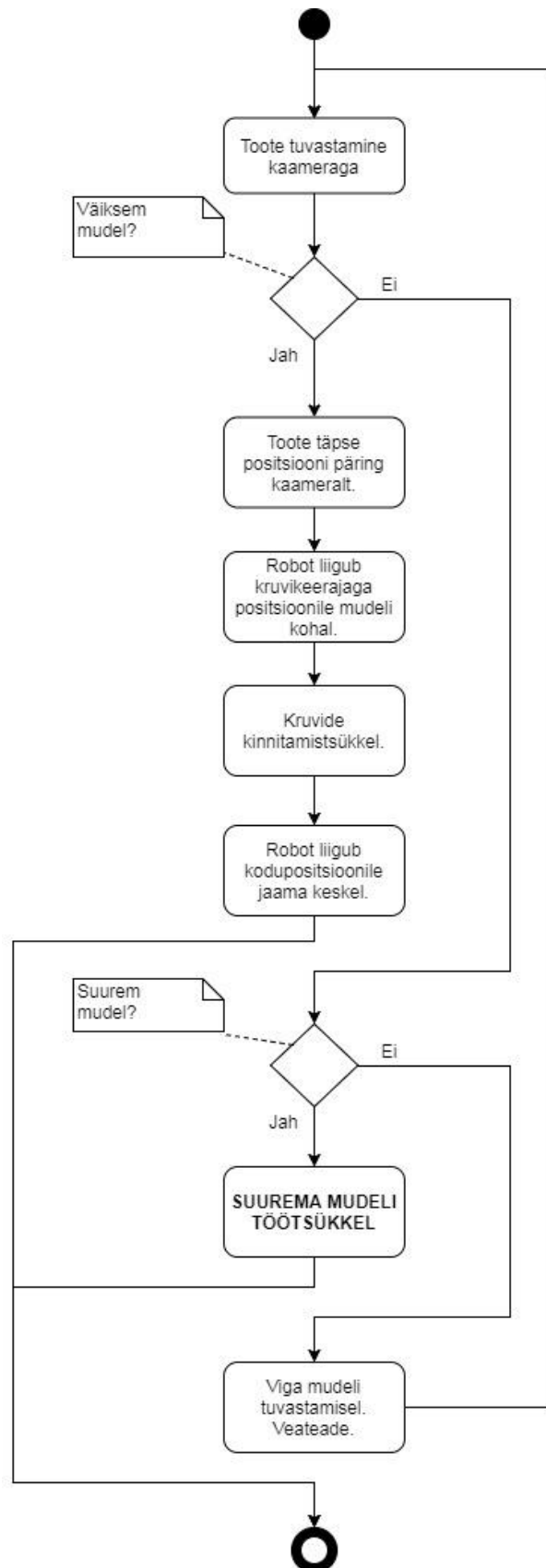
Produced by CADs student version

A Rev. :			Kruvikeeraja kontrollor	Object ID	Sheet 5 / 5	Drawing no.	Jobb no.
B Rev. :							
C Rev. :			Placed	11.05.2019	11.05.2019	11.05.2019	11.05.2019

Produced by CADs student version

Lisa 5 Robotjaama tööprotsessi üldine algoritm





Lisa 7 Roboti töösükkel suurema tootemudeli puhul

