



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SÜSTEEMI PROJEKTEERIMINE KOTTIDE LADUMISEKS KAUBAALUSELE

SYSTEM DESIGN FOR PALLETIZING BAGS ONTO A PALLET

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Vladislav Magilnitski

Üliõpilaskood: 213718EAAB

Juhendaja: Madis Lehtla, vanemlektor

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Vladislav Magilnitski

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Süsteemi projekteerimine kottide ladumiseks kaubaalusele“,

mille juhendaja on Madis Lehtla, vanemlektor,

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

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

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

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

13.05.2024

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

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Vladislav Magilnitski, 213718EAAB
Õppekava, peeriala: EAAB16/17, mehhatroonika
Juhendaja(d): Vanemlektor, Madis Lehtla
Konsultant: Dmitri Shvarts, insener
Eastman Specialties OÜ, dshvarts@eastman.com

Lõputöö teema:

Süsteemi projekteerimine kottide ladumiseks kaubaalusele
System design for palletizing bags onto a pallet

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kottide automaatse ladumissüsteemi projekteerimine kasutades keskkondi ABB RobotStudio ja Solidworks
2. Koostada esialgne kottide ladumisalgoritm kaubaalusele EPAL3
3. Süsteemi tehniliste ja majanduslike külgede ülevaade

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lähteandmete kogunemine, Eastman Specialties OÜ tehase külastamine	31.01.24
2.	Ladumissüsteemi komponentide ülevaade ja valik	29.02.24
3.	Süsteemi visualiseerimine ja ladumissalgoritmi koostamine tarkvara paketiga ABB Palletizing PowerPac + kasutusjuhend	17.03.24
4.	Süsteemi majanduslikke ja tehniliste külgede osa analüüs	07.04.24
5.	Eelkaitsmiseks töö valmis kirjutamine ja juhendaja paranduste sisseviimine	24.04.24
6.	Vajalike täienduste/paranduste sisseviimine ja töö lõpliku versiooni esitamine	13.05.24

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13". mai 2024a

Üliõpilane: ".....".....20....a
/allkiri/
Juhendaja: ".....".....20....a
/allkiri/
Konsultant: ".....".....20....a
/allkiri/
Programmijuht: ".....".....20....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE.....	4
EESSÕNA.....	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
SISSEJUHATUS	9
1. SÜSTEEMI EELOTSUSED JA TEHNOLOOGIATE ÜLEVAADE.....	11
1.1 Süsteemi piirangud.....	11
1.1.1 Ohutustehnika automatiseeritud ladumisel.....	12
1.2 Ladumissüsteemi otstarbekus ettevõttes	13
1.2.1 Otsustusülesande lahendamine	13
1.3 Ladumissüsteemide ülevaade ja võrdlus	15
1.3.1 Kauba ladumises kasutatavad liigendkäed.....	15
1.3.2 Ristkoordinaatsüsteemis töötavad ladumissüsteemid	16
1.3.3 Koostöörobotid ladumisprotsessis.....	16
1.3.4 Mobiilsed robotid ladumisprotsessis.....	17
1.3.5 Ladumissüsteemide võrdlus	17
2. LADUMISROBOTI JA HAARATSI VALIMINE	19
2.1 Ladumisrobotite ülevaade ja võrdlus	19
2.1.1 Liigendkäega ladumisrobot KUKA KR70 R2100	20
2.1.2 Liigendkäega ladumisrobot ABB IRB460	20
2.1.3 Liigendkäega ladumisrobot Yaskawa MOTOMAN PL80.....	20
2.1.4 Liigendkäega ladumisrobot FANUC M410iC-110	21
2.1.5 Ladumisrobotite võrdlus ja valik.....	21
2.2 Haaratsite ülevaade ja võrdlus	21
2.2.1 Kahveltüüpi haarats Applied Robotics ARPG30.....	22
2.2.2 Kahveltüüpi haarats Gizelis Robotics FP50.....	22
2.2.3 Kahveltüüpi haarats ABB Flexgripper Claw	23
2.2.4 Haaratsi maksimaalne kiirendus koti tõstmisel	23
2.2.5 Haaratsite võrdlus ja valik	24

3.	ROBOTISEERITUD TÖÖKOHA KAVANDAMINE	25
3.1	Seadmete paigutusplaan.....	25
3.2	Ohutus- ja ühendusahelate ülevaade	26
3.2.1	Ohutusahelate ülevaade.....	26
3.2.2	Ühendusahelate ülevaade	27
3.3	Ladumisprotsessi töötsükkel.....	28
3.4	Ladumisprotsessi tsükliäeg.....	30
3.5	Süsteemi koostamine tarkvarapaketi ABB Palletizing PowerPac	31
3.5.1	Tarkvara paketi ABB Robotstudio Palletizing PowerPac seadistused	31
3.5.2	Tööriista ja konveierite lisamine	32
3.5.3	Toote suuruse seadistamine ja ladumismustri tekitamine ...	34
3.5.4	Robotile ülesande lisamine.....	36
3.6	Süsteemi visualiseerimine ja ladumisalgoritmi süntees	37
4.	SÜSTEEMI MAJANDUSLIKUD KÜLJED	39
4.1	Süsteemi maksumus ja tasuvus.....	39
4.2	Riskianalüüs.....	41
4.3	Tulemuslikkuse hindamine	42
4.4	Võimalikud edasiarendused.....	43
	KOKKUVÕTE.....	44
	SUMMARY.....	45
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	46
	Lisa 1: Seadmete paigutus koos mõõtmega.....	50
	Lisa 2: Funktsioonide selgitused RAPID koodis	51

EESSÕNA

Töö teema pakkus välja ettevõtte Eastman Specialties OÜ [1] insener Dmitri Shvarts, lähtuvalt vajadusest leida kottide kaubaalusele ladumise lahendus ühte tsehi. Töö eesmärgiks on nii ladumissüsteemi tehniliste ja majanduslike külgede analüüsimine kui ka nüüdisaegsete visualiseerimiskeskondadega tutvumine laiendamaks nende kasutusvõimalusi ka ülikooli õppe- ja teadustöodes. Ladumissüsteemi näide sobib töö autori arvates selleks hästi.

Lühendite ja tähiste loetelu

E211 – naatriumbensoaat (säilitusaine, EL toidulisandite regulatsiooni järgi)

EPAL3 – standardile EN 13698-2 vastav kaubaalus mõõtmetega 1000x1200x144 mm

SCARA – horisontaalne liigendkäsi (ingl. Selective Compliant Assembly Robot Arm)

r – raadius

AMR – autonoomne mobiilne robot

DOF – liikuvusastmete arv (ingl. Degrees Of Freedom)

3D – kolmemõõtmeline

EOAT - roboti tööriist (ingl. End Of Arm Tool)

KPI – võtmetulemusnäitajad (ingl. Key Performance Indicators)

ROI – investeeringutasuvus (ingl. Return On Investment)

CVT – konveieri jälgimissüsteem (ingl. Conveyor Tracking System)

SISSEJUHATUS

Mitmesugustel transpordiprotsessidel on oluline mõju tootmisprotsesside ohutusele, tõhususele ja tootlikkusele. Traditsiooniliselt paigutatakse tootmisprotsessis kotid kaubaalusele käsitsi. See töö on seotud mitmete riskidega seoses inimtööjõu kasutamisega. Suure kaaluga kottide monotoonsel tõstmisel kaasnevad terviseriskid, sest töö nõuab tugevat füüsilist ettevalmistust ja tuleb vältida vigastuste ohtu. Õnnetuste vältimiseks on vajalik alternatiivne lähenemisviis tehniliste lahenduste näol. Ladumissüsteem pakub selleks ohutumast ja töökindlamast tõstmisprotsessi, millega saab parandada ka tootmisprotsessi tootlikkust ja kiirust. Ladumissüsteemid on varustatud täpsete ja jõuliste mehhanismidega, mis võimaldavad tõsta suuri kotte kiiresti ja ohutult. Ladumissüsteemi integreerimisel tuleb arvestada selle osade gabariitidega ja töötsooni suurusega, et kõik oleks ohutusnõuetele vastav.

Väljapakutud ladumissüsteemi projekteerimisel on lähtutud kristalliseeritud helbekujulise aine E211 kottide ladumisest kaubaalusele, kuid sarnasel viisil saab laduda ka teise sisuga kotte. Töö eesmärk on analüüsida süsteemi tehnilisi ja majanduslikke aspekte, kasutades selleks visualiseerimist ning animeerimist. Selleks sobivad mitmesugused tarkvaravahendid nagu nt ettevõtte ABB tarkvarapakett RobotStudio [2], ettevõtte FESTO tarkvarapakett Ciroso Studio [3], tarkvarapakett RoboDK [4], CoppeliaSim [5] ja ka mitmed teised. Paketi RobotStudio teeb eriti sobivaks selle lisapakett Palletizing PowerPac [6]. Töö keskendub ladumissüsteemi koostamisele arvestades tootmisruumi eripära, konveieri, kottide massi ning aluste transpordiga seotud asjaolusid.

Käesoleva töö esimene osa tegeleb piirangutega tootmistehhis, nõuetega ja ladumissüsteemide ülevaatega. Selles osas esitatakse esmane eskiis ning uuritakse, kas on üldse vaja süsteem tekitada läbi otsustuskriteeriumite. Esimese osa eesmärgiks on uurida erinevaid ladumissüsteem ja nende sobilikust käesolevale projektile.

Teises töö osas keskendutakse konkreetsele roboti ning tööriista valikule. Võrreldakse erinevad liigendkäed ja kahvelhaaratsid ning otsustatakse, mida valida ladumissüsteemi visualiseerimiseks vastavalt autori teadmistele ning komponentide omadustele. Eesmärgiks valida konkreetne ladumissüsteem ning haarats, millega saab visualiseerimist teostada.

Kolmandas ja neljandas osas tegeletakse süsteemi robotiseeritud töökoha kavandamisega, mille alla kuulub süsteemi asetusplaani teostamine, töötsükli ja tsükliaja väljatöötamine ning ohutus- ja ühendusahelate ülevaade. Sellest tulenevalt koostatakse ka RobotStudio Palletizing PowerPac [6] tarkvarapaketi süsteemi visualiseerimise juhend, et näidata ladumistöökohta koostamist ning teha õppematerjal järgmistele kasutajatele. Neljandas osas vaadeldakse süsteemi tehnilisi ja majanduslikke külgi, teostatakse riskianalüüs ning ligikaudne tasuvusarvutus.

Kogu töö jooksul kasutab autor 3D modelleerimiseks projekteerimistarkvara Solidworks [7] ning visualiseerimise teostamiseks RobotStudio tarkvara paketi Palletizing PowerPac [6].

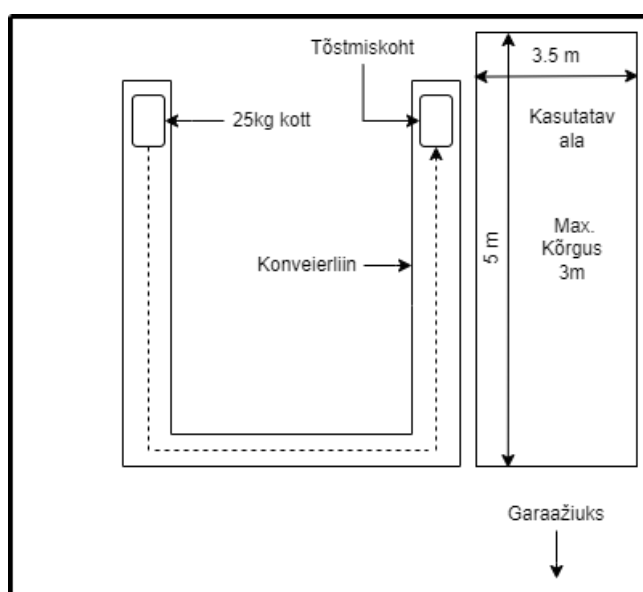
1. SÜSTEEMI EELOTSUSED JA TEHNOLOOGIATE ÜLEVAADE

Peale toote valmimist on saatmise etapp, milles tuleb tavaliselt paigutada toode kaubaalusele, et tagada mugav transport ja jaotamine. Automaatika puudumisel peavad töötajad toodet enne saatmist füüsiliselt laduma alusele, mis nõuab suurt hulka tööjõudu [8]. Kuna laadimine toimub traditsiooniliselt paljudes ettevõtetes inimtööjõuga, uurib autor automaatse süsteemi loomist ja integreerimist, mis asendaks ohtlikku ja vigasid tekitavat käsiladumist.

Automaatne ladumissüsteem pakub mitmeid eeliseid. Nendeks on näiteks suurenenud tööefektiivsus, vähenenud tööjõukulud, parem ohutus ja suurem paindlikkus mitmekesiste toodete käsitlemiseks [9].

1.1 Süsteemi piirangud

Esiolgu on vaja määratleda kasutatava ala mõõtmed ja uurida piiranguid, mis kehtivad tööstusruumis. Selleks pidi autor külastama ettevõtte tootmistehhi, et viia läbi mõõtmised vajalikute pikkuste ja esmaste teadmiste saamiseks. Peale teostatud mõõtmisi autor koostas järgmise eskiisi (vt. Joonis 1.1), mis üldjoontes näitab ruumilist planeeringut ja aitab mõista, millise kasutatava alaga peab arvestama.



Joonis 1.1 Tööstusruumi lihtsustatud eskiis vastavalt teostatud mõõtmistele

Süsteemi kasutusala on mõõtude poolt 3,5 m lai ja 5 m pikk. See on üsna kompaktne ala, millele peab mahutama nii laadija kui ka vajalikud seadmed nagu elektrikilp ja kontrolleri kapp, arvestades ohutustehnika tingimusi. Samuti peab alasse mahtuma ka roboti ette kaubaaluste konveier, mille peale pannakse kaubaalus ja kotid. Võimalikuks probleemiks võib osutada ruumipuudus või seadmete liiga tihe paiknemine.

1.1.1 Ohutustehnika automatiseeritud ladumisel

Automatiseeritud ladumisel on ohutustehnika äärmiselt oluline, kuna masin töötab automaatrežiimis ja igal hetkel võib masina mistahes osa käivituda ilma hoiatuseta. Ohutuse tagamiseks on vajalik hoida kõik ohustusseadmed paigas enne, pärast ja masina töö ajal. Hooldus töid võib teostada ainult siis, kui süsteemi kõik energiaallikad on välja lülitatud. Kõik süsteemi töötajad peavad lugema juhendmaterjali ja ohutuslaseid materjale ning järgima hoiatussilte, mis näitavad ohtlike piirkondi. [10]

Ohutustehnika nõudeid saab vaadata näiteks standardist EVS-EN ISO 10218-2:2011 (Tööstusrobotid. Ohutusnõuded. Osa 2: Robotsüsteemid ja integreerimine) [11], milles on kirjeldatud peale nõudeid ka kuidas teostada riskide analüüsi ja ohtude identifitseerimist ning kõrvaldamist. Järelduseks järgis autor järgmiseid põhimõtteid:

- Automaatjuhtimise ajal tuleb seadmed paigutada väljapoole turvatud ala
- Roboti ja seadmete paigaldused tuleb kavandada nii, et personali kokkupuude ohtudega oleks minimaalne
- Protsessi jälgimine tuleks läbi viia väljaspool turvatud ruumi
- Süsteem peab olema kavandatud nii, et tagada ohutu juurdepääs kõikidele aladele, kus sekkumine on vajalik reguleerimise ja hoolduse ajal

Töö käigus uuriti ka ohutustehnikat ettevõttes ning ettevõtte poolseks soovitusel oli igasuguse süsteemi tekitamisel piirata ladumise ala aiaga, et inimesed ei sattuks liikuvate osade ja mehhanismide vahele. Olukorda lihtsustab see, et ruumis ühelt poolt piirab ala sein ja teiselt poolt konveierliin.

1.2 Ladumissüsteemi otstarbekus ettevõttes

Peale toote valmimist on kauba saatmise etapp, milles tuleb tavaliselt paigutada toode kaubaalusele, et tagada selle mugav transport ja jaotamine. Automaatika puudumisel peavad töötajad toodet enne saatmist füüsiliselt laduma alusele, mis nõuab suurt hulka tööjõudu [8]. Automaatne ladumissüsteem pakub mitmeid eeliseid. Nendeks on näiteks suurenenud tööefektiivsus, vähenenud tööjõukulud, parem ohutus ja suurem paindlikkus mitmekesiste toodete käsitlemiseks. [9]

1.2.1 Otsustusülesande lahendamine

Enne süsteemi projekteerimist oleks vaja välja selgitada süsteemi põhjendatus ettevõttes. Selleks kasutati mitmeid üldiseid kriteeriume, et lahendada Tabelis 1.1 toodud otsustusülesanne. Laotavaks tooteks on 25 kg kott kristalliseeritud helbekujulise naatriumbensoaadiga (E211), mida on vaja laduda konveierliinilt kaubaalusele EPAL 3. Koti mõõtmed on 900x450x120 mm ja kaubaaluse mõõtmed 1000x1200x144 mm. Selleks, et määrata vajalikud kriteeriumid koostati tabel 1.1.

Tabel 1.1 Otsustuskriteeriumite loetelu ja vastavus

C _p	Otsustuskriteeriumid	Kirjeldus	Väike vastavus (0)	Keskmine vastavus (3)	Suur vastavus (5)
C ₁	Protsess on ühetüübiline ja raske	Ladumise protsess on ühetüübiline ja raske füüsilise koormusega			X
C ₂	Töökoha tootlikkuse tõstmine on oluline	Töökoha tootlikkuse tõstmine on üks eeldatavaid robotiseeritud töökoha tulemusi		X	
C ₃	Omatakse ka teatavaid kogemusi ladumissüsteemidega	Eastman insenerid omavad kogemusi automatiseeritud ladumissüsteemides			X
C ₄	Toode käsitsi ladumine tekitab terviseriske	Toote käsitsi ladumine on füüsilist raske ja tervist kahjustav tegevus			X
C ₅	Tootel on kõrged kvaliteedinõuded	Eastman seab kõrged kvaliteedinõuded enda produktile			X
C ₆	Tööruum on piiratud	Tööruum on kompaktne, seega tasub automatiseerida			X

Otsustuskriteeriumite alla läksid esiteks protsessi ühetüübilisus ja toote raskus. Teiseks, kas ettevõtte jaoks on tootlikkuse tõstmine oluline või mitte, kuna robotiseeritud töökoht on kindlam ja kiirem, kui traditsiooniline inimtööjõuga ladumine. Samuti võeti arvesse ka käsitsi ladumisega kaasnevate terviseriskide tekkimist ja olemasolevaid teadmisi ladumissüsteemide kasutamisest. Viieandaks uuriti kvaliteedinõuded, mis arvestades, et tegu on tooraine keemiatööstusega, on kindlasti kõrged. Eastmanis on range kvaliteedipoliitika, mis juhib ettevõtteid kõrgete standardite tagamisel kõigis toodetes

ja teenustes. Viimaseks otsustuskriteeriumiks on tööruumi piirangud ehk füüsiline suurus, mis on välja toodud joonisel 1.1, peatükkis 1.1.

Vastavalt tabelile 1.1 on võimalik arvutada süsteemi vastavustegur, mille läbi saab ka arvutada süsteemi otstarbekuse protsent. Väike vastavuse puhul kriteeriumilt loetakse 0 punkti, keskmiselt 3 punkti ja suurelt vastavuselt 5. Kokku on 6 kriteeriumi igaüks maksimaalselt annab 5 punkti, mis annab kokku 30.

$$O = \frac{\sum C_p}{C_{max}} = \frac{28}{30} \approx 93\% \quad (1.1)$$

Kus O - Süsteemi otstarbekuse protsent

C_p - otsustuskriteeriumi vastavus

C_{max} - maksimaalselt võimalik kriteeriumite summa

Üldiselt kui saadakse >75% siis süsteemi koostamine on otstarbekas. Süsteemi otstarbekus ettevõttes on 28/30 (93%) ehk vajadus süsteemi tekitamiseks eksisteerib vastavalt tabelile 1.1 ja valemile 1.1. [12]

1.3 Ladumissüsteemide ülevaade ja võrdlus

Uurides mitmeid võimalusi ja tehnoloogilisi lahendusi tuleb teha kaalutud otsus, et valida optimaalne ladumistehnika vastavalt tootmisvajadustele, toodete omadustele ning tootmisprotsessi nõuetele.

Tänapäeva seisuga on kasutusel mitmekesine valik ladumisseadmeid, mis on kohandatud vastavalt erinevatele tootmisvajadustele. Uurimistöö kontekstis on oluline uurida erinevate tehnoloogiate sobilikkust. Erinevaid võimalusi ladumiseks kirjeldavad hästi EVS standardid EVS-EN 415-4:1999 (Pakkemasinate ohutus. Osa 4: Kaubaaluste pakkimis- ja lahtipakkimismasinad) [13] ja EVS-EN 415-6:2013 (Pakkemasinate ohutus. Osa 6: Kaubaaluste pakkemasinad) [14].

Standardis EVS-EN 415-4:1999 on lahti kirjeldatud, mis tüüpi ladumise süsteeme on olemas ning mis printsibil nad töötavad. Näiteks kas on kotti vaja tõsta ühekaupa, rida kaupa või terve kihina. Projekteeritava süsteemi puhul on teada, et kotid tõstetakse ühekaupa. Üldiselt kirjeldab see standard ladumispriintsiipe, mille alusel võib teha ladumisseadme valik. [13]

Teises standardis EVS-EN 415-6:2013 on näiteid erinevatest pakkimismehhanismidest, mis kirjeldavad kuidas toimub kaubaaluse pakkimine. Konstruksioonid, mis on kirjeldatud pakkimiseks sobivad hästi ka toodete ladumiseks ning põhinevad tavaliselt ristkoordinaatsüsteemis töötavatel lahendustel. [14]

Standardite läbivaatamisel otsustasin keskenduda liigendrobotitele tööriistaga, koostöörobotitele ja traditsioonilistele horisontaalsetele ladumislahendustele.

1.3.1 Kauba ladumises kasutatavad liigendkäed

Liigendkäed on olulised tööriistad ladumise valdkonnas. Need on mitmekülgsed, mis võimaldab kiiret ja lihtsat ümberseadistamist erinevate ladumisalgoritmidega, kuna muuta peab vaid liigendkäe liikumise programmi. Lisaks on liigendkäed märgatavalt kompaktsemad kui tavapärased vertikaalsed ladumisseadmed, mis teeb neid optimaalseteks lahendusteks piiratud ruumiga keskkondades. [15] Tavalised liigendkäega ladumissüsteemid on näiteks suurema liikuvusastmetega liigendrobotid nagu KUKA KR PA 40 [16].

SCARA robotid tavaliselt ei tegele raskete koormuste tõstmisega. Sellest tulenevalt vaadeldi ka ettevõtte KUKA erinevaid liigendroboteid, mis võiks ladumiseks sobida. Ettevõtte KUKA veebilehelt Marketplace [17] vaadeldi müügil olevat KUKA KR 70 R2100 robotit (Tabel 1.2, Joonis 1) [18]. Selle mõõtmed, tõstejõud ja tööriista ulatus on sobilikud, et teostada ladumisülesanne, võrreldes KUKA KR40 PA liigendrobotiga. KUKA KR40 PA roboti tõstejõud on kaks korda vähem.

1.3.2 Ristkoordinaatsüsteemis töötavad ladumissüsteemid

Traditsioonilised ladumises kasutatavad tõstemehhanismid pakuvad tasakaalustatud jõudlust ja lihtsamat hooldust võrreldes teiste ladumisseadmetega. Need on suure vastupidavusega usaldusväärsed mehhanismid, mis on võimelised raskete koormuste käsitlemiseks. Suure vastupidavuse tagab koormuse ühtlasem jaotus. Sellised robotid on lihtsasti hooldatavad kuna võimaldavad kiiret ja lihtsat varuosade väljavahetamist (vt. Tabel 1.2, Joonis 2) [15].

Traditsiooniliste ladumissüsteemide koostajad nagu Vention [19] kasutavad enda süsteemides 2 või 4 liigendiga ristkoordinaatroboteid. Hinna sisse kuulub terve konstruktsioon koos etteandmiskonveieriga ja kontrollieriga.

1.3.3 Koostöörobotid ladumisprotsessis

Koostöörobotid nagu näiteks Tabel 1.2 Joonisel 3 välja toodud UR30 [20] on ohutud, paindlikud ja ka ladumiseks kohandatavad mehhanismid. Erinevalt tööstusrobotitest on koostöörobotid kavandatud ohutuks koostööks inimesega, ühendades roboti efektiivsust inimlikku paindlikkusega. Koostöörobotid on varustatud täiustatud ohutusfunktsioonidega nagu näiteks jõu-moment ja kokkupõrke tuvastamine anduritega. Koostöörobotite suuremaks miinuseks on väike tööriista ulatus. Samuti pole nende tõstevõime piisav raskete toodete tõstmiseks.

Koostöörobotid on kaasaegne alternatiiv tööstusrobotitele, kuid selle tõstejõud on ebasobilik konkreetse ülesande teostamiseks. Koostöörobot on hea alternatiiv kuna selle ohutusnõuded on leebemad kui tööstusrobotitel ja see võimaldab töötada otseselt inimesega koos, kui on järgitud konkreetsed ohutusnõuded.

1.3.4 Mobiilsed robotid ladumisprotsessis

Mobiilse roboti (AMR-i) kasutamine on alternatiiv tavalistele lähenemistele nagu liigendkäega tööstusrobotid. AMR võiks pöörata kaubaaluse vastavalt sellele, mis kohta on vaja kotti paigutada ning seejärel kui kaubaalus on täis, transportida iseennast lattu.





Süsteem nagu MiR1350 (Tabel 1.2, Joonis 4) [21], omab piisavat kandevõimet, et laduda täis ühe tonnine kaubaalus. Suurte kandevõimetega AMR-id on vastavalt ka kõrgehinnalised lahendused, mis võrreldes eelnevalt käsitletud süsteemidega on kallimad (kuni 120 000 EUR [22]) ja seejuures ei sobi projekteeritavasse süsteemi, kuid nende potentsiaali saab realiseerida näiteks täiesti automatiseeritud tootmises.

1.3.5 Ladumissüsteemide võrdlus

Selleks, et valida optimaalne ladumissüsteem, arvestades erinevate süsteemide eripäradega koostati järgmine otsustustabel. Parameetrid on võetud süsteemide dokumentatsioonist. Uuriti liigendkäega tööstusrobotit KUKA KR 70 R2100 (Tabel 1.2, Joonis 1), ristkoordinaatrobotit Vention 4-axis Cartesian palletizer (Tabel 1.2, Joonis 2), koostöörobotit Universal Robotics UR30 (Tabel 1.2, Joonis 3) ja mobiilset robotit MiR1350 (Tabel 1.2, Joonis 4).

Võttes arvesse kõik varem käsitletud tehnoloogiad valiti liigendkäega tööstusroboti integreerimise lahendus seoses varasemate kogemustega liigendrobotite käsitlemise ja simulatsioonkeskkondadega. Otsustavateks faktoriteks osutusid ristkoordinaat-süsteemiga ladumissüsteemi kõrge hind ja suur kasutatav põrandapind ning koostööroboti põhjal tõstejõud ja tööriista ebapiisav ulatus. Autonoomsed mobiilsed robotid on liiga kallis alternatiiv ettevõtte jaoks, võrreldes teiste süsteemide maksumusega.

Tabel 1.2 Ladumissüsteemi otsustustabel





	Liigendkäega tööstusrobot	Traditsiooniline ristkoordinaat robot	Koostöö robot	Mobiilne robot (AMR)
Ladumissüsteemi pilt	 *1	 *2	 *3	 *4
Töstejõud	Kuni 85 kg	Kuni 100 kg	Kuni 30 kg	Kuni 1350 kg
Vajalik põrandapind / mõõtmed	0,603 x 0,480 m	2,672 x 2,547 x 4,106 m	r = 0,245 m	1,350 x 0,910 x 0,322 m
Tööriista ulatus	2,09 m	Tööala praktiliselt sama nagu gabariidid	1,30 m	-
Süsteemi kestvus	Kuni 75000h	Komponentide kättesaadavuse tõttu on kestvus ülipikk	30000-40000 h	Pole konkreetseid andmeid
Süsteemist teadlikkus	Ettevõtte on tööstuslikkest liigendkätest teadlik	Teadmised puuduvad.	Teadmised puuduvad.	Teadmised puuduvad.
Ohutus omadused	Süsteemile peab eraldi projekteerima aed ja viia kontrolleri aias välja	Süsteem on eraldatud aiaga, mille mõõtmed on arvestatud jalajäljes	Võib otseselt töötada inimesega koos	Võib otseselt töötada inimesega koos
Süsteemi hind	55000 EUR, süsteem koos kontrolleriiga *5	95000 EUR, terve süsteem koos etteandmis konveieriga *5	65000 EUR, süsteem koos kontrolleriiga *5	120000 EUR, süsteem ilma manipulaatorita *5
<p>*1 liigendkäega tööstusrobot KUKA KR 70 R2100 [18] *2 Ristkoordinaat-ladumissüsteem 2 liigendiga ja sisendkonveieriga ühele kaubaalusele [23] *3 UR30 koostöörobot suurema töstejõuga kuni 30kg [20] *4 MiR1350 mobiilne robot kaubaaluste liigutamiseks [21] [22] *5 Soovitavad hinnad seisuga 03.04.2024</p>				

2. LADUMISROBOTI JA HAARATSI VALIMINE

2.1 Ladumisrobotite ülevaade ja võrdlus

Ladumissüsteemiks valiti liigendkäega tööstusroboti, kuna selle hind ja omadused vastasid ettevõtte vajadustele ja oskustele kõige paremini. KUKA süsteem KR 70 R 2100 (Joonis 1.3 b), mida käsitletakse ladumissüsteemi valiku peatükkis on 6 liigendiga robot, mille hooldus kuue liigendiga süsteemi tõttu läheb kindlasti kallimaks, kui mõnel teisel 4- või 5 liigendiga robotil.

Tabel 2.1 Ladumisrobotite võrdlus

	KUKA KR 70 R2100	ABB IRB 460	Yaskawa MOTOMAN PL80	FANUC M-410iC-110
Ladumis roboti pilt	 *1	 *2	 *3	 *4
Liikuvusastmete arv (DOF)	6 DOF	4 DOF	5 DOF	4 DOF
Roboti kontrolleri	KUKA KR C5 / KR C4	ABB IRC5 Single Cabinet	Yaskawa YRC1000	FANUC R-30/iB Plus
Tõstejõud	70 kg	110 kg	80 kg	110 kg
Tööriista ulatus	2101 mm	2278 mm	2061 mm	2403 mm
Positsiooni korratavus	0,05 mm	0,2 mm	0,03 mm	0,05 mm
Robotile vajalik põrandapind	603 x 480 mm	1007 x 720 mm	460 x 425 mm	761 x 610 mm
Ettevõtte teadlikkus	Varem käsitlesid selle firma robotit	Ei ole teadlik.	Ei ole teadlik.	Ei ole teadlik.
Roboti kaal	535 kg	925 kg	565 kg	1030 kg
Simulatsioon tarkvara	KUKA Sim / RoboDK	RobotStudio / RoboDK	Motosim / RoboDK	RoboDK
Hind	55200 EUR, hinna sisse kuulub ka kontrolleri ja juhtpult *5	36000 EUR, hinna sisse kuulub ka kontrolleri ja juhtpult *5	37000EUR, hinna sisse kuulub kontrolleri ja juhtpult *5	47500 EUR, hinna sisse kuulub kontrolleri ja juhtpult *5
*1 liigendkäega ladumisrobot KUKA KR 70 R2100 [16] *2 liigendkäega 4 liikuvusastmega ladumisrobot ABB IRB 460 [24] *3 liigendkäega 5 liikuvusastmega ladumisrobot Yaskawa MOTOMAN PL80 [25] *4 liigendkäega 4 liikuvusastmega ladumisrobot FANUC robot M-410 seeriast [26] *5 Soovitavad hinnad seisuga 03.04.2024				

2.1.1 Liigendkäega ladumisrobot KUKA KR70 R2100

KUKA Robotics ei pakku kahjuks vähemate liikuvusastmetega ladumisroboteid, seega võetakse arvesse esimest robotit, mida KUKA ladumiseks pakub ning mis sobib konkreetse ülesande lahendamiseks KR 70 R 2100 (Tabel 2.1, Joonis 1). See on 6 liigendiga robot, mis suudab tõsta kuni 70 kg koormused. Selle omaenda kaal on 535 kg ja tööriista ulatus kuni 2101 mm. Positsiooni korratavus on $\pm 0,05$ mm. Robotile vajalik põrandapind on 603 x 480 mm. [18] Selle firma robotitest on ettevõtte teadlik, kuna on seda kasutanud juba eelnevalt ladumiskendustes, aga see ei sobi mitmel põhjusel, see on mõõtmete poolt üsna suur ja kuue liigendiga, mis teeb selle hoolduse kallimaks [18]. Selle simuleerimiseks võib kasutada KUKA.Sim [27] ja RoboDK tarkvara [4]. Ettevõtte sooviks oli valida vähemate liikuvusastetega robot.

2.1.2 Liigendkäega ladumisrobot ABB IRB460

Ettevõtte ABB Robotics pakub ladumiseks robotit ABB IRB 460 (Tabel 2.1, Joonis 2). See on nelja liigendiga robot kuni 110kg koormuste tõstmiseks. IRB 460 kaal on 925 kg ja tööriista ulatus kuni 2278 mm. Selle positsiooni korratavus on kõige madalam vaadeldud robotite seas, milleks on $\pm 0,2$ mm, kuid see väga ei mõjuta ladumisprotsessi, sest koti mõõtmed on suured ja seda on lihtne haarata ja paigutada. Robotile vajalik põrandapind on 1007 x 720 mm [24]. Ettevõtte ei ole teadlik ABB robotitest ning pole neid kunagi kasutanud. Selle simuleerimiseks on otstarbekas kasutada ABB enda tarkvara ABB RobotStudio [2] või RoboDK [4].

2.1.3 Liigendkäega ladumisrobot Yaskawa MOTOMAN PL80

Yaskawa robotics pakub ladumiseks robotit Yaskawa MOTOMAN PL80 (Tabel 2.1, Joonis 3), mis on viie liigendiga robot, mis suudab laduda kuni 80 kg. Seda robotit juhitakse Yaskawa YRC1000 kontrolleriaga. Yaskawa roboti enda kaal on 565 kg ja tööriista ulatus kuni 2061 mm. Selle positsiooni korratavus on kõige täpsem, milleks on $\pm 0,03$ mm ja robotile vajalik põrandapind on 460 x 425 mm. [25] Selle roboti tootjaga ettevõtte pole koostööd teinud. Robotit saab simuleerida läbi Yaskawa MotoSim EG-VRC tarkvara [28] või RoboDKs [4].

2.1.4 Liigendkäega ladumisrobot FANUC M410iC-110

Fanuc robotitest kõige lihtsam ja kõige paremini sobivam ladumisülesande lahendamiseks robot on FANUC M410iC-110 (Tabel 2.1, Joonis 4), mis on nelja liigendiga robot kuni 110kg koormuste tõstmiseks. Seda juhitakse kontrolleriaga FANUC R-30/iB Plus. Roboti omaenda kaal on kõige suurem vaadeldavatest robotitest, milleks on 1030 kg ja tööriista ulatus 2403 mm. M410iC-110 positsiooni korratavus on ± 0.05 mm ning vajalik pörandapind on 761 x 610 mm [26]. Sellest roboti tootjast ettevõtte pole teadlik. Robotit saab simuleerida läbi RoboDK tarkvara [4].




2.1.5 Ladumisrobotite võrdlus ja valik

ABB lahenduse valimine oleks kõige mõistlik variant eelnevalt mainitud robotitest, kuna selle integreerimine on suhteliselt lihtne ja ABB pakub RobotStudiole head rakendust nagu ABB RobotStudio Palletizing Powerpac [6], millega saab visualiseerida ladumisprotsessi. ABB robot on samuti kõige odavam ja see on 4 liigendiga. FANUC robot on ka 4 liigendiga ja sama tõstejõuga, kuid veidi täpsem. Konkreetse ülesande juures ei ole vaja ülitäpset robotit ja IRB460 0,2 mm korratavus sobib ladumisülesande teostamiseks. Tööriista ulatus on ka piisav, et teostada vajalikud liikumised, arvestades et horisontaalselt on ruum 3,5 m pikk seinast konveierini.

2.2 Haaratsite ülevaade ja võrdlus

Lähtuvalt koti mõõtmetest ja massist on vaja leida sobilik tööriist, et koti tõsta ja paigutada alusele. Koti mõõtmed on 900x450x120 mm ja mass 25 kg, aga kuna kott pressitakse veidi kokku konveieritel, siis peaks alusele mahtuma kolm koti vertikaalselt ja kaks horisontaalselt. Seega võib eeldada, et koti mõõtmed on ligikaudu 600x400x120 mm.

Tabel 2.2 EOAT-de võrdlustabel

	AppliedRobotics ARPG30	ABB Flexgripper Claw	Gizelis Robotics Fork Gripper FP50
Tööriista pilt	 *1	 *2	 *3
Tööriista tõstejõud	30 kg	66 kg	50 kg
Max. koti pikkus	750 mm	750 mm	800 mm
Max. koti laius	300-500 mm	250-500 mm	500 mm
Max. koti kõrgus	75-150 mm	90-200 mm	250 mm
Tööriista kaal	26 kg	66 kg	42 kg
Tööriista hind	10000 EUR *4	6000 EUR *4	-
*1 ARPG30 kahveltüüpi kottide haarats [29] *2 ABB IRB 460 Flexgripper Claw haaratsiga [30] *3 GR Fork Gripper FP50 haarats [31] *4 Soovitavad hinnad seisuga 03.04.2024			

2.2.1 Kahveltüüpi haarats Applied Robotics ARPG30

Helbekujulise aine kottide tõstmiseks tavaliselt kasutatakse kahveltüüpi haaratseid nagu näiteks Applied Robotics ARPG30 haarats, mis võimaldab mahutada endasse terve koti, et see välja ei kukkuks (vt. Tabel 2.2, Joonis 1).

Haaratsi süsteemis on andur, mis tuvastab koti haaratsis olemasolu. Selle võimekus ulatub üle 20 tsükli minutis, sõltuvalt roboti mudelist ja läbitavast vahemaast. Haaratsil on ISO 125 kinnitusmustriga flants tööriista kinnitamiseks robotile. Paremaks haaratsi integreerimiseks on tagatud ka kõik elektrilised ühendused andurite ja ühenduskarbiga. Samuti võib haaratsile juurde tellida kaubaaluse tõstmis funktsionaalsust ja vahelehe panemise funktsionaalsust. [29]

2.2.2 Kahveltüüpi haarats Gizelis Robotics FP50

Kottide tõstmiseks kasutatakse veel teist tüüpi haaratseid nagu GR Fork Gripper FP50. Selle põhimõtte on veidi teine, kuna kahvlid, millega robot tõstab toodet on ainult ühel pool (vt. Tabel 2.2, Joonis 3).

See on sümmeetriliselt avatav haarats, mis on mõeldud kottide käsitlemiseks. Haarats sobib tootmisliinidele, kus kasutatakse 20-50 kg kotte. Toode tõstetakse rullkonveierilt, mis on disainitud vastavalt haaratsi kahvlitele. Koti paigutamine toimub koti vertikaalselt vabastades. Transpordi ajal kohandatakse koti asukoht automaatsete vertikaal- ja külgsuunaliste patjadega. [31]

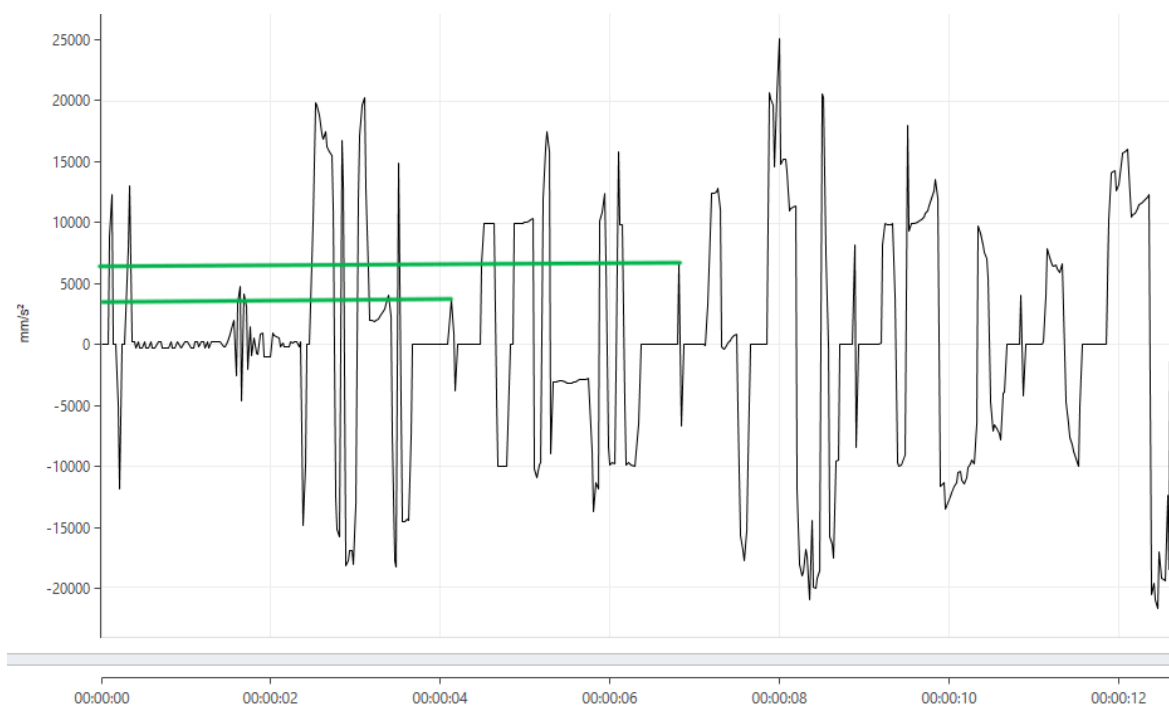
2.2.3 Kahveltüüpi haarats ABB Flexgripper Claw

Arvestades roboti valikut uuriti ka ettevõtte ABB poolt pakutavaid ladumistöörüistu. Üheks nendest oli ABB Flexgripper Claw haarats (vt. Tabel 2.2, Joonis 2).

ABB FlexGripper Claw on *plug-and-play* haarats ABB IRB 460 robotile, mis teeb kuni 50 kg kottide ladumise kiireks ja täpseks. Seda on lihtne paigaldada ja programmeerida, millega on võimalik säästa aega. Seda haaratsi on võimalik kasutada ka ABB Palletizing PowerPac tarkvaraga, mis võimaldab teha programme ka neile, kellel pole robotiprogrammeerimis kogemust. [30]

2.2.4 Haaratsi maksimaalne kiirendus koti tõstmisel

Koti tõstmine vertikaalselt (z-telje sihis) üles on kõige raskem operatsioon roboti jaoks. Peale koti massi peab haarats taluma ka dünaamilist koormust. Koti mass m_k on 25 kg ning roboti maksimaalne kiirendus kontrollitud liikumise puhul nominaalse koormusega on 28 m/s^2 [32]. Jooniselt 2.1 on näha, et kiirendust ja pidurdust piiratakse 5-7 m/s^2 -le, et koti tõstmisel ei tekiks ülekoormusviga.



Joonis 2.1 Kiirenduse graafik RobotStudio simulatsioonist

Nende andmete põhjal saab arvutada kottide tõstmiseks vajalik jõud Z-teljes (F_z) maksimaalse kiirendusega:

$$F_z = m_k \cdot a_{h,max} + m_k \cdot g = 25 \cdot 28 + 25 \cdot 9,81 = 945,25 \text{ N} \quad (2.1)$$

Kus m_k – koti mass

$a_{h,max}$ – roboti maksimaalne kiirendus kontrollitud liikumise puhul nominaal koormusega

g – raskuskiirendus (9,81 m/s²)

Roboti maksimaalne tõstejõud on 110 kg ja haaratsid keskmiselt kaaluvad 45 kg (vt. tabel 2.2), mida peab ka koormusena arvestama. Seega tegelikult oleks vaja piirata roboti kiirendust niipalju, et see ei ületaks maksimaalse tõstejõu $F_{r,max}$:

$$F_{r,max} = m_{max} \cdot g = 110 \cdot 9,81 = 1079,1 \text{ N} \quad (2.2)$$

Kus m_{max} – maksimaalne koormus robotil

Terve koormus ($m_{koormus}$) robotile on summa haaratsi kaalust ja koti kaalust:

$$m_{koormus} = m_k + m_h = 25 + 45 = 70 \text{ kg} \quad (2.3)$$

Kus m_h – keskmine haaratsi mass

Soovitud kiirenduse arvutamiseks ladumisprotsessis koti ülestõstmisel ilma lubatud maksimaalkoormust ületamata rakendatakse järgmist valemit:

$$a_{max} = \frac{F_{r,max} - m_{koormus} \cdot g}{m_{koormus}} = \frac{1079,1 - 70 \cdot 9,81}{70} = 5,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \quad (2.4)$$

2.2.5 Haaratsite võrdlus ja valik

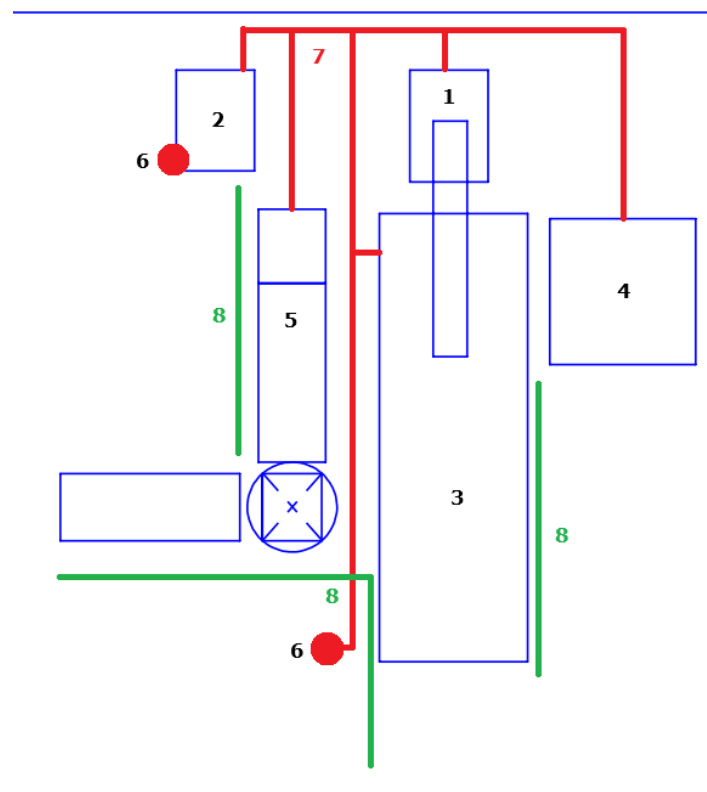
Suurem osa saadaolevatest kahveltüüpi (*fork*) haaratsitest ei ole mõeldud pikkade kottide ladumiseks. Nende maksimaalselt lubatud koti pikkus ei ületanud 600 mm, mis oli ebapiisav konkreetse probleemi lahendamiseks ja ARPG30 analoogsete haaratsite väljatöötamine Eestis maksaks umbes 5000-6000 EUR. Edaspidi kasutati simulatsioonides ABB Flexgripper Claw haaratsi ning tasuvusarvutustes kajastab ligikaudse hinda 6000 EUR. Samuti peab meeles pidama, et koti tõstmisel ülesse, kiirendus ei ületaks maksimumi, muidu võib tekkida ülekoormus olukord, mis annab veateate.

3. ROBOTISEERITUD TÖÖKOHA KAVANDAMINE

Järgmiseks etappiks peale seadmete valikut on kavandada robotiseeritud töökoht. Selles töö etapis on oluline täpselt paika panna tööülesanne, mis konkreetse töö puhul on koti ladumine kaubaalusele EPAL3. Samuti teostatakse seadmete asendiplaan, uuritakse elektrilisi- ja ohutusahelaid ning osaliselt kaardistatakse tootmissüsteemi, mis on Eastman Specialties OÜ tootmistsehhis juba olemas.

3.1 Seadmete paigutusplaan

Esiialgu koostati eskiis, kuidas võiks välja näha ladumisala koos kõikidega vajalike seadmetega nagu sisendkonveier, kaubaaluse etteandja, väljundkonveier, ladumisrobot, roboti kontrollerkapp, hädastoppnupud, kaabliteed ja turvaaed.



Joonis 3.1 Seadmete asetusplaani eskiis, 1 – Robot ABB IRB460, 2 – Roboti kontrollerkapp IRC5 ja elektrikilp, 3 – väljundkonveier, 4 – kaubaaluse etteandja, 5 – koti pakkimis- ja sisendkonveier, 6 – hädastoppnupud, 7 – kaabeldus, 8 - turvaaed

Asetusplaani eskiisi koostamisel lähtuti olemasolevatest seadmetest ja konveierliinidest. Selleks, et haarata koti oleks vaja lintkonveieri lõppu tekitada rullkonveier, et oleks võimalik kahveltüpi haaratsiga kotid haarata. Vastavalt asetusele on vaja seadistada väljundkonveier (Joonis 3.1, 3) ja kaubaaluse etteandja (Joonis 3.1, 4). Eskiisi koostamisel lähtuti maksimaalse paindlikkuse, ligipääsetavuse ja minimaalsete paigalduste põhimõttest, et säästa võimalikult palju ruumi, kuna tegemist on suhteliselt tiheda asetusega ruumipuuduse tõttu. Mõõtmetega eskiisi saab vaadata L1 alt.

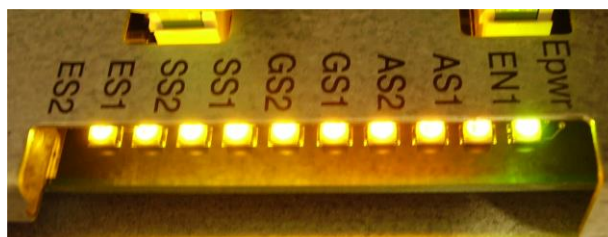
3.2 Ohutus- ja ühendusahelate ülevaade

3.2.1 Ohutusahelate ülevaade

Juhtseadmel IRC5 on juba integreeritud ohutusahel (vt. Joonis 3.2). Sellega saab integreerida lisa seadmeid, mida ühendatakse spetsiaalsete diskreetsete ohutus sisendite või ohutusprotokollide kaudu ning sisendite funktsioonid on lahti kirjeldatud tabelis 3.1 (IRC5 tootejuhend, lk.29). [33]

Tabel 3.1 Ohutusahela funktsioonide kirjeldus

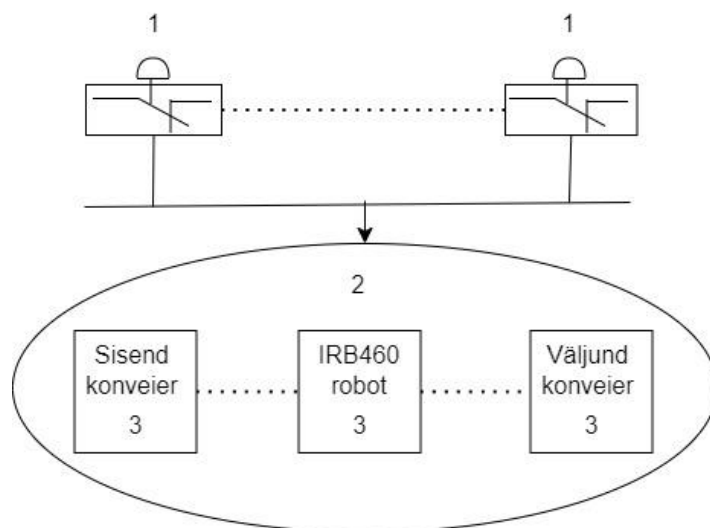
Sisendid stop funktsiooni aktiveerimiseks	Sisendite kirjeldus
Emergency Stop (ES)	Sisend hädaolukorra peatumisfunktsiooni käivitamiseks. Funktsioon käivitub nii manuaalses kui ka automaat režiimis.
Automatic Stop (AS)	Sisend peatumisfunktsioonile automaatseks seiskamiseks, mis käivitub ainult automaatrežiimis.
General Stop (GS)	Sisend üldise peatumisfunktsiooni käivitamiseks, mis käivitub nii manuaal- kui ka automaatrežiimis
Superior Stop (SS)	Sisend ülima peatumisfunktsiooni käitumiseks. Peatumisfunktsioon käivitub manuaal- ja automaatrežiimis.



Joonis 3.2 IRC5 Kontrolleri ohutusahela indikaatorid

Vastavalt standardile EVS-EN ISO 13850:2015 (Masinate ohutus. Hädaseiskamisfunktsioon. Kavandamise põhimõtted) peab igas süsteemis olema hädaseiskamise funktsioon, mis peab olema kogu aeg kättesaadav ja kasutamiskvalifitseeritud. Sellised seadmed peavad olema hõlpsasti tuvastatavad ning aktiveeritavad operaatori poolt, kellel on vajadus nende aktiveerimiseks. [34]

Seega on vaja lisada asetusplaanile miinimum kaks kohta, kust võiks teostada võimalik hädaseiskamine. Vastavate nuppude asetust saab näha eskiisilt (Joonis 3.1, 6). Üks võimalikest skeemidest hädaseiskamiseks on järgmine (vt. Joonis 3.3), vastavalt kategooriale 0 (seiskamine masina ajamite energiavarustuse viivitamatu eemaldamisega) [34]:



Joonis 3.3 Süsteemi hädaseiskamine kahest positsioonist vastavalt kategooriale 0, 1 – hädaseiskamise seade, 2 – juhtimisulatus, 3 – masin või masinate sektsioon

Üks kohtadest on kontrolleri kapp, kuhu on tootja poolt juba paigaldatud hädaseiskamise funktsioon, teiseks kohaks valiti koht kaubaaluse väljastamise juures. See selleks, et kui operaatoriga juhtub midagi kappi juures, siis saab süsteemi seisata ka teistelt poolt. IRC5-ga saab osta juurde teise operaatoripaneeli (3HAC040644-003, 733-4) ja selleks 15m (3HAC038768-001) toitekaabli (IRC5 tootejuhend, lk 134) [33].

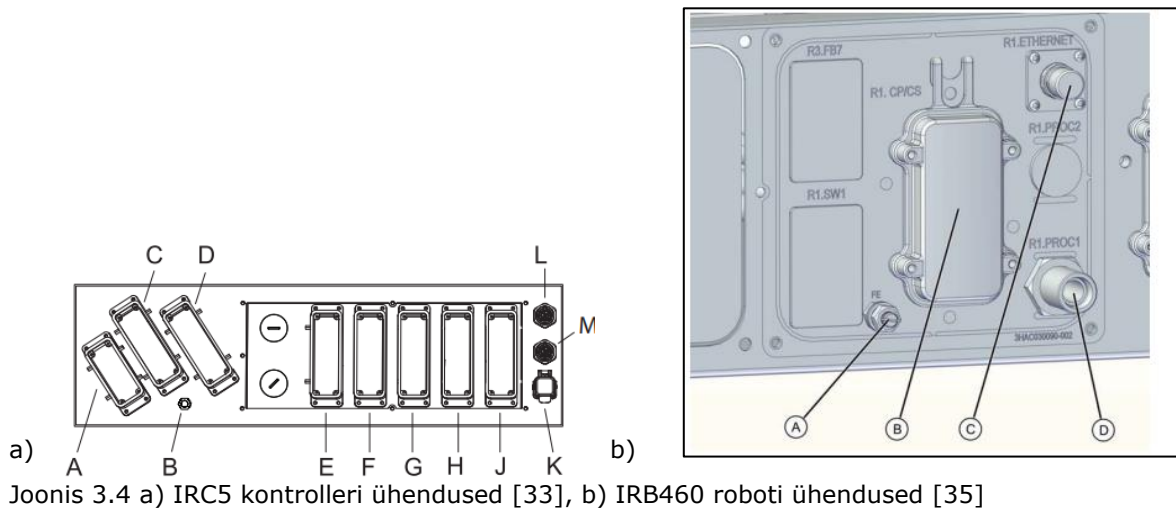
3.2.2 Ühendusahelate ülevaade

Samuti on robotsüsteemile vaja hea ja korralik elektriline paigaldus, et tagada parima jõudluse ning pikendada süsteemi eluiga. Kaablite paigaldus peab olema tehtud järgmiste põhimõtete põhjal (IRC5 tootejuhend, lk.64). [33]:

- Erineva klassiga kaablid (nagu toite- ja signaalikaabel) peavad olema eraldatud teineteisest, muidu võib signaalis tekkida müra
- Tuleb eraldada roboti ja kontrolleri toitekaabel
- Kui kaablid ristuvad, siis ristumiskohas peaks olema 90-kraadi lähedane nurk

Toite- ja signaalikaabliteed võiksid olla paigaldatud nagu Joonisel 3.1 (7) punaste joontega kujutatud. Kõik juhtmed, mis paigaldatakse juhtimiskappi, peavad olema võimelised taluma temperatuuri kuni 70 °C (vastavalt IRC5 tootejuhendile, lk.62). [33]

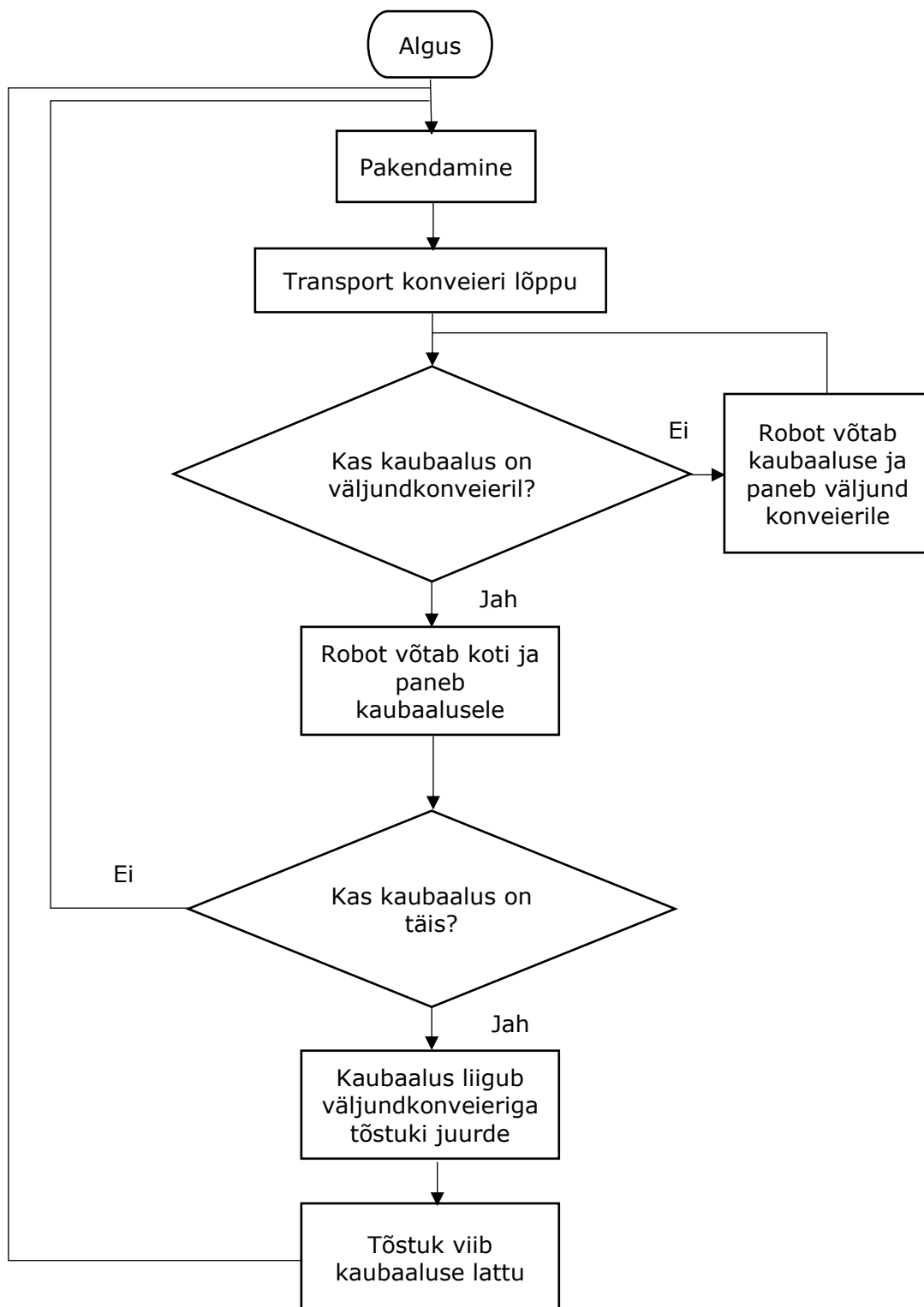
Kontroller peab olema ühendatud kolmefaasilise toitega 230–400V. Kõik toitekaablid tulevad koos kontrolleri ja robotiga vastavalt valitud kaabli pikkusele. Selleks on ettenähtud ühenduskoht A kontrollerial (vt. Joonis 3.4, a). Ühenduskohta C kontrollerial (vt. Joonis 3.4, a) ühendatakse roboti toitekaabel, mida omakorda ühendatakse robotisse ühenduskohta B (vt. Joonis 3.4, b).



Joonis 3.4 a) IRC5 kontrolleri ühendused [33], b) IRB460 roboti ühendused [35]

3.3 Ladumisprotsessi töötsükkel

Selleks, et paremini mõista, kuidas teostatakse robotiseeritud töökohas tootmisülesannet, oleks vaja koostada töötsükli toote kaubaalustele ladumiseks. Töötsükkel on aluseks kvaliteedi tagamisel ja tootlikkuse kujundamisel. Töötsükli optimeerimine on oluline ülesanne. Süsteemi jaoks koostati järgmine töötsükkel (vt. Joonis 3.5).



Joonis 3.5 Robotiseeritud töökoha töötsükkel

Töötsükkel algab koti pakendamisest sisendkonveieril. Seejärel liigub kott sisendkonveieri lõppu, kus seda saab roboti haaratsiga tõsta. Siis vajadusel tõstab robot kaubaaluse väljundkonveierile, et ladumist alustada. Peale seda robot võtab koti sisendkonveierilt ja paigutab vastavalt paigaldusmuustrile koti kaubaalusele. Eelnev

tsükkel korratakse kuni kaubaalus on täis. Seejärel liigub kaubaalus väljundkonveieri abil tõstuki juurde väljastuskohta ning tõstuk viib selle lattu.

3.4 Ladumisprotsessi tsükli aeg

Operatsiooni tsükli aeg kujuneb vastavalt töökoha töötsükli tootmisülesannetele. Tsükli aeg sõltub nii tööstusroboti kui ka teiste seadmete võimekusest. Tsükli ajaga saab määrata roboti töötamise määra tööülesande täitmiseks. Vastavalt eelnevalt koostatud töötsüklile kujuneb operatsiooni tsükli aeg, mida saab arvutada järgneva valemiga 3.1.

$$T_c = T_{kp} + T_{pae} + T_{phv} + T_{khv} + T_{plv} + T_{vl} \quad (3.1)$$

- kus T_c – operatsiooni tsükli aeg,
 T_{kp} – koti pakendamise aeg,
 T_{pae} – kaubaaluse asetamise etteandjasse aeg,
 T_{phv} – kaubaaluse haaramise ja paigaldamise aeg,
 T_{khv} – koti haaramise ja vabastamise aeg,
 T_{plv} – kaubaaluse liikumisaeg väljastuskohta,
 T_{vl} – tõstukiga kaubaaluse lattu transportimise aeg,

Tabel 3.1 Tsükli aja komponentide määramine

Tähis	Tsükliaja element	Väärtus, s
T_{kp}	Koti pakendamine	120
T_{pae}	Kaubaaluse asetamine etteandjasse	60
T_{phv}	Kaubaaluse haaramine ja vabastamine	20
T_{khv}	Koti haaramine ja vabastamine	15
T_{plv}	Kaubaaluse liikumine väljastuskohta	30
T_{vl}	Tõstukiga kaubaaluse viimine lattu	120

Järgnevalt leitakse süsteemi operatsiooni tsükli aeg, kui on vaja laduda kokku kuni 40 kotti ühele kaubaalusele valemiga 3.2 ning ligikaudsete väärtustega tabelist 3.1:

$$T_c = 40 \cdot 120 + 60 + 20 + 40 \cdot 15 + 30 + 120 = 5630 \text{ s} \quad (3.2)$$

Vastavalt arvutustele sai operatsiooni tsükliajaks 5630 sekundit, mis on ligikaudu 94 minutit, et laduda täis üks kaubaalus 40 kottiga. Võrreldes tehase inseneride saadud andmetega on ladumisprotsess sama kiire, sest kõik sõltub sellest kui kiiresti pakendatakse kott.

3.5 Süsteemi koostamine tarkvarapaketi ABB

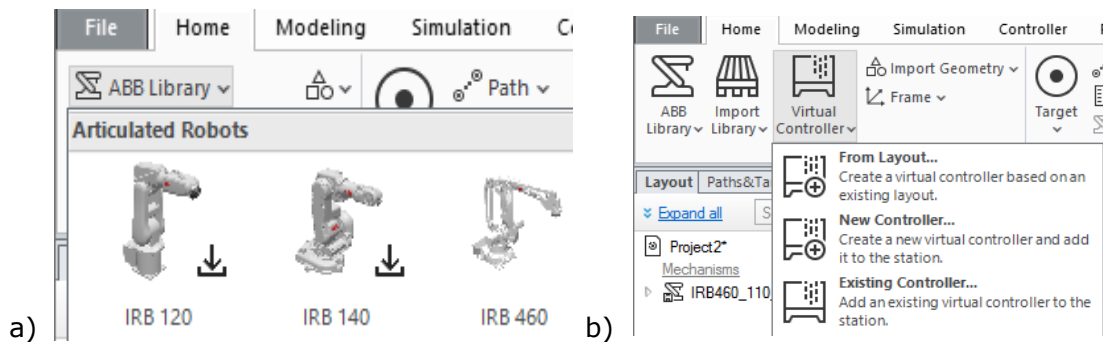
Palletizing PowerPac

Paigutusalgoritmi sünteesimiseks kasutatakse ABB RobotStudio paketi ABB Palletizing PowerPac. Pakett muudab robotladumise süsteemide programmeerimise lihtsaks, kuna koostaja ei vaja edasijõudnute programmeerimisoskusi. ABB RobotStudio Palletizing PowerPac vähendab programmeerimis aega märkimisväärselt ning sellega saab luua täielikult testitavaid simulatsioone ja tegelikke robotsüsteemi programme. [6]

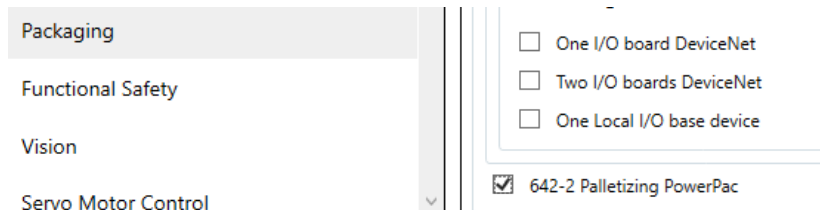
Järgnevas osas on näidatud kuidas saab ladumissüsteemi visualiseerida, kasutades ABB standardkomponente, mis tulevad ABB Palletizing PowerPac tarkvaraga [6] kaasa. Standardkomponentide alla kuuluvad robot, tööriist, konveierid, kaubaalused ise ja kaubaaluste etteandjad.

3.5.1 Tarkvara paketi ABB Robotstudio Palletizing PowerPac seadistused

Esiolgu imporditakse robot, milleks on IRB460 (vt. Joonis 3.6 a). Soovituseks on teha robotile *Modeling* menüü kaudu kasti, mis oleks roboti postamendiks, et tõsta seda veidi ülesse. Mõõtmeteks võiks olla 1200x1000x500 mm. Seejärel lisatakse robotile vastav kontrolleri funktsiooniga *From Layout* (vt. Joonis 3.6 b). Valitakse RobotWare kontrolleri vastav versioon, milleks on 6.15.05.00 ning kontrolleri seadistamise viimases aknas vajutatakse nupule *Options*, kus valitakse *Packaging* menüü alt 642-2 Palletizing PowerPac, mis annab vajaliku ladumisFunctionaalsuse (vt. Joonis 3.7). [6]

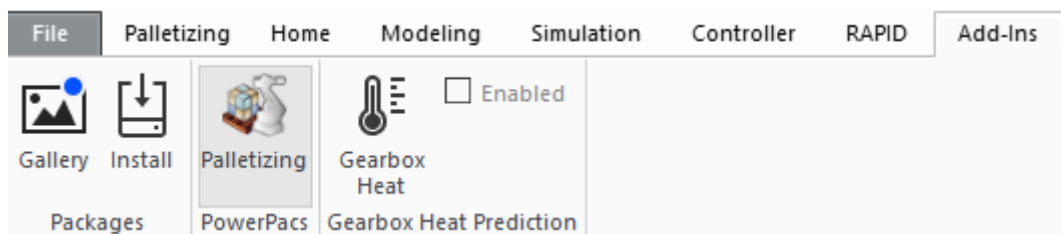


Joonis 3.6 a) Roboti valimine *Home* menüüst, b) kontrolleri valimine *From Layout* valikuga

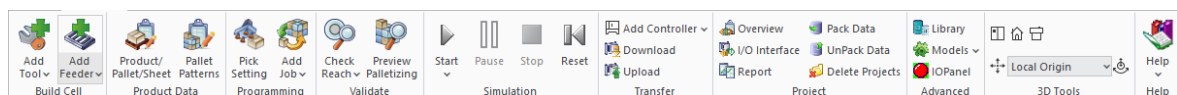


Joonis 3.7 Palletizing PowerPac aktiveerimine kontrolleriis [6]

Selleks, et aktiveerida pakett ABB RobotStudio ülemises ribamenüüs on vaja seda esialgu paigaldada arvutisse. Paketi aktiveerimiseks on vaja suunduda vastavasse menüüsse ning klõpsata Palletizing ikooni peale. Seejärel ilmub *Palletizing* menüü ülevale ribasse (vt. Joonis 3.8) ning *Palletizing* menüü näeb välja järgmiselt (vt. Joonis 3.9).



Joonis 3.8 *Palletizing* paketi lisamine ribamenüüsse

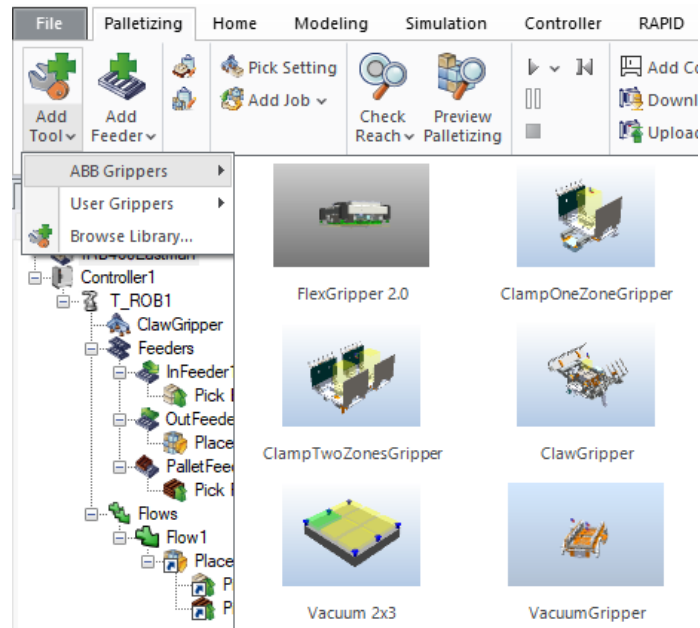


Joonis 3.9 *Palletizing* menüü funktsioonid

3.5.2 Tööriista ja konveierite lisamine

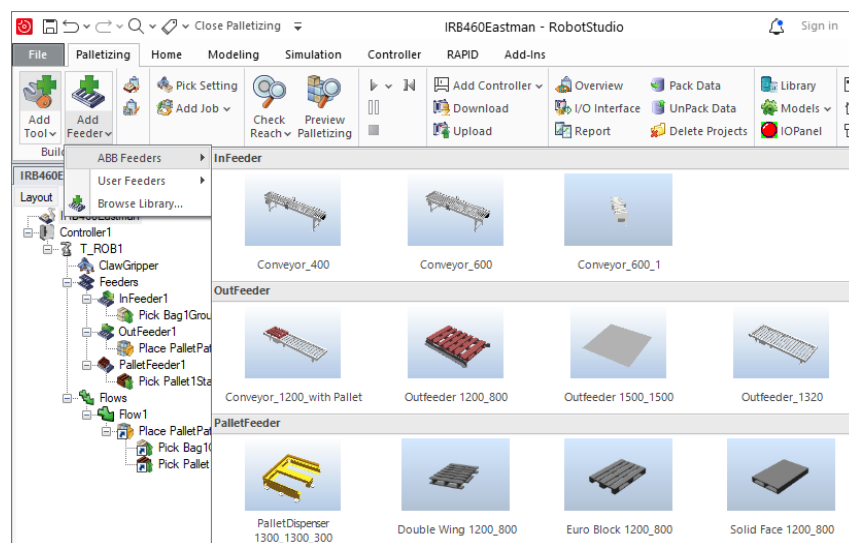
Kui kõik eelnevad sammud on tehtud, saab alustada tööriistade ja vajalikke komponentide sisestamist. Tööriista sisestamine käib vastava menüüga *Add Tool* ning süsteemi jaoks valisin *ClawGripper* tööriista (vt. Joonis 3.10), sest selle simuleerimine

ei andnud tundmatuid veateateid. Tööriist lisatakse automaatselt roboti kinnitusflantsi külge.



Joonis 3.10 Tööriista valimismenüü

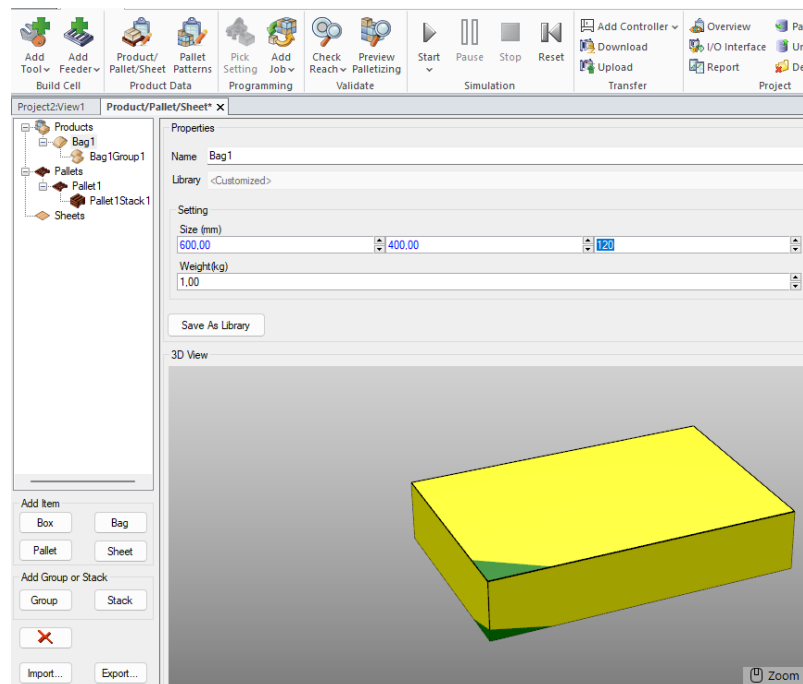
Järgnevas sammus on vaja valida sisendkonveier, väljundkonveier ja kaubaaluste etteandja. Seda valikut saab teha *Add Feeder* menüü alt (vt Joonis 3.11). Süsteemi koostamiseks olid valitud *Conveyor_600* sisendkonveieriks, *Outfeeder_1320* väljundkonveieriks ja *PalletDispenser 1300_1300_300*. Kõik komponendid olid valitud vastavalt eelnevate toote kirjeldustele ja paigutatud vastavalt peatükis 1.1 kirjeldatud tootmisruumi eripäradele.



Joonis 3.11 Konveierite valimisaken

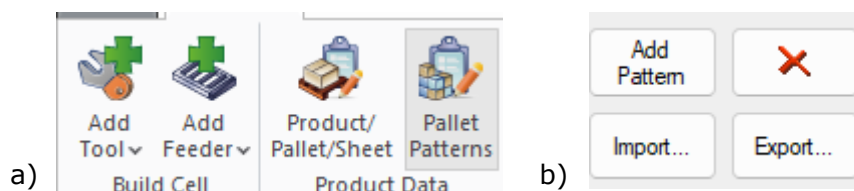
3.5.3 Toote suuruse seadistamine ja ladumismustri tekitamine

Järgnevalt oleks vaja defineerida toote ja kaubaaluse suurused. Seda saab teha valides *Product/Pallet/Sheet* menüü (vt. Joonis 3.12). Toote valikutest on kas kott või karp. Samuti saab lisada ka kaitselehe, mida pannakse toote kihtide vahele. Koti töötlemis suuruseks on 600x400x120 mm ning kaal 25kg ja kaubaalusel on 1000x1200x144mm ning kaal 20kg.



Joonis 3.12 Toote ja kaubaaluse suuruste seadistamise menüü

Ladumismustri tekitamiseks kasutatakse *Pallet Patterns* menüü (vt. Joonis 3.13 a). Kui kaubaalus ja toode on õigesti konfigureeritud, siis vajutades nuppu *Add Pattern* (vt. Joonis 3.13 b) ilmuvad esimeses lahtris automaatselt genereeritud ladumismustrid. Nendest saab valida vajaliku ladumismustri ning vajutades sinisele noolele lisada neid järgnevasse lahtri, kus neid saab muuta. (vt. Joonis 3.14).




Joonis 3.13 a) Kaubaaluse mustrite menüü, b) Mustri lisamise klahv

Name	Item	Count	Coverage
UniBlock0	Bag1	4	80
UniBlock1	Bag1	3	60
TwoBlock1	Bag1	3	60
TwoBlock2	Bag1	5	100
QuadBlock0	Bag1	4	80
Top UniBlock1	Bag1	1	20
Top UniBlock2	Bag1	1	20
UniBlock0	Pallet1	1	100

Joonis 3.14 Ladumismustrite valik ja klahv nende lisamiseks järgmisesse lahtrisse

Süsteemi jaoks valisin *Uniblock0*, kuna see on kaubaaluse paigaldusmuster, mis peabki olema esimene. Siis kasutasin kaks *TwoBlock2* mustri, sest nendega saab kõige rohkem kotte ühte kihti mahutada ehk siis Eastman Specialties OÜ kottide puhul 5 tükki kihis. Teises menüüs saab samuti need mustrid muuta vastavalt vajadusele menüüga *Edit Layout* (vt. Joonis 3.15). Seejärel vajutades sinist nool saadetakse kindlas järjekorras mustrid järgmisesse lahtri. Siinkohal on oluline paigutada kaubaaluse muster *Uniblock0* esimesena ning seejärel sisestada kihtide moodustamismustrid.

Name	Name	Count
UniBlock0	Pallet1	1
TwoBlock2	Bag1	5
TwoBlock2	Bag1	5

Edit Layout... 

Joonis 3.15 Ladumismustrite muutmise koht teises lahtris

Viimaseks osaks on ladumismustrite õige järjestuse tekitamine kolmandas lahtris ning seejärel vajutades nuppu *Apply* on mustrid salvestatud (vt. Joonis 3.16). Soovitus siinkohal on järgmine, esialgu teha ainult kolm kihti, et testida, kas animatsioon lõpus läheb tööle või mitte.

Layer	Name	Item	Height	Mirror	Count
3	TwoBlock2	Bag1	120	None	5
2	TwoBlock2	Bag1	120	None	5
1	UniBlock0	Pallet1	144	None	1

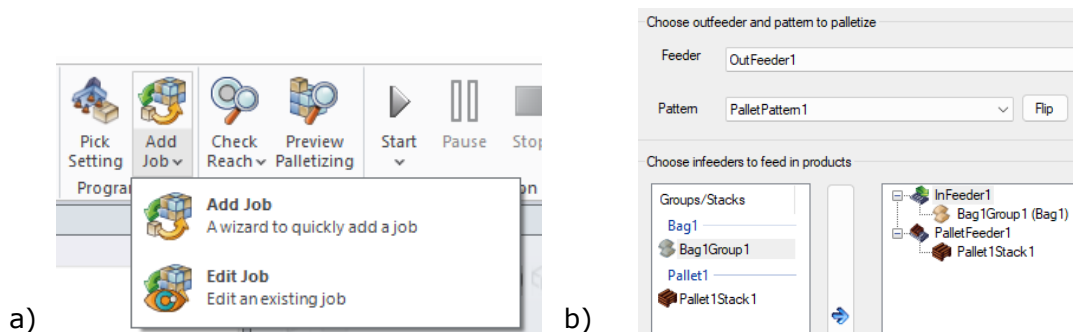
Mirror:

Apply

Joonis 3.16 Ladumismustrite kinnitamine ja kihtide järjestuse muutmine

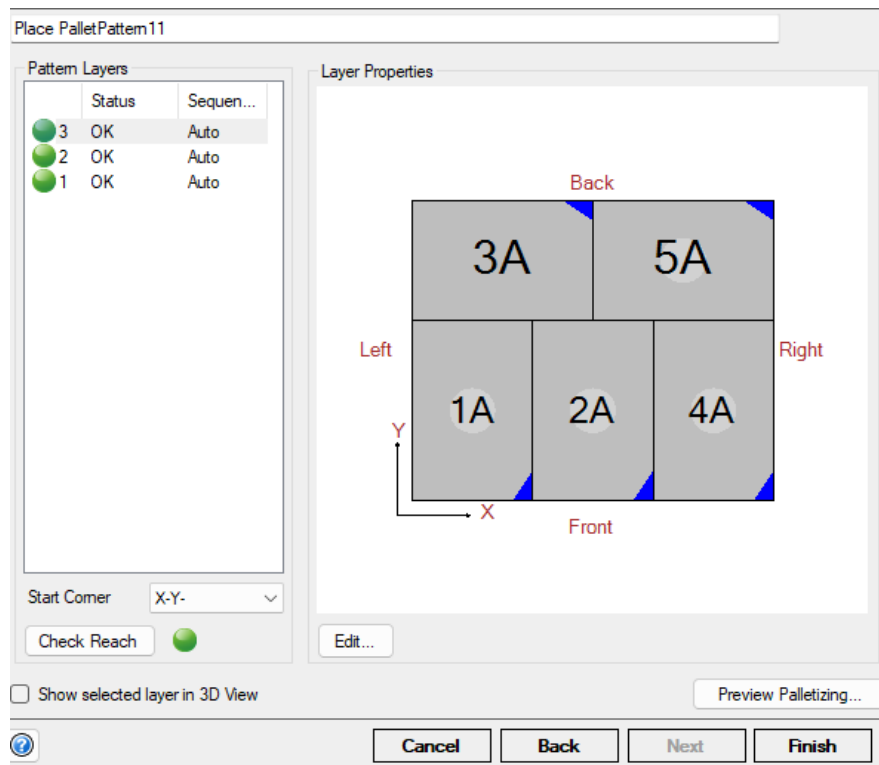
3.5.4 Robotile ülesande lisamine

Kui kõik tootega, kaubaalusega ja mustriiga seotud seadistused on tehtud, siis järgmiseks sammuks on roboti tööülesanne tekitamine ehk siis programmi süntees, mida saab teostada *Add Job* menüü kaudu (vt. Joonis 3.17.a). Esialgu valitakse väljundkonveier ja muster ning siis seostatakse vastavad elemendid sisendkonveieriga ja kaubaaluse etteandjaga (vt. Joonis 3.17.b).



Joonis 3.17 a) *Add Job* menüü, b) Konveierite sidumine vastavate elementidega

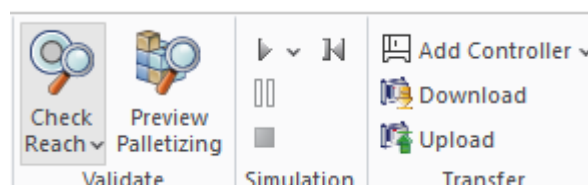
Viimases menüüs kontrollitakse, kas robot koos tööriistaga ulatuvad kõikide asukohtadeni. Seda saab teha menüüga *Check Reach*. Kui positsioonid on roboti tööruumis, siis hakkab põlema roheline tuluke, kui ei siis punane. Punase tule puhul peaks kas konveierid või roboti ümber paigutama nii, et robot ulatuks vastavasse positsiooni ning tuli põleks rohelisena. Korraliku koostamise puhul peab vajutama *finish* ning roboti tööülesanne on koostatud (vt. Joonis 3.18).



Joonis 3.18 Ladumisülesanne ja positsioonide ulatuse kontrollaken

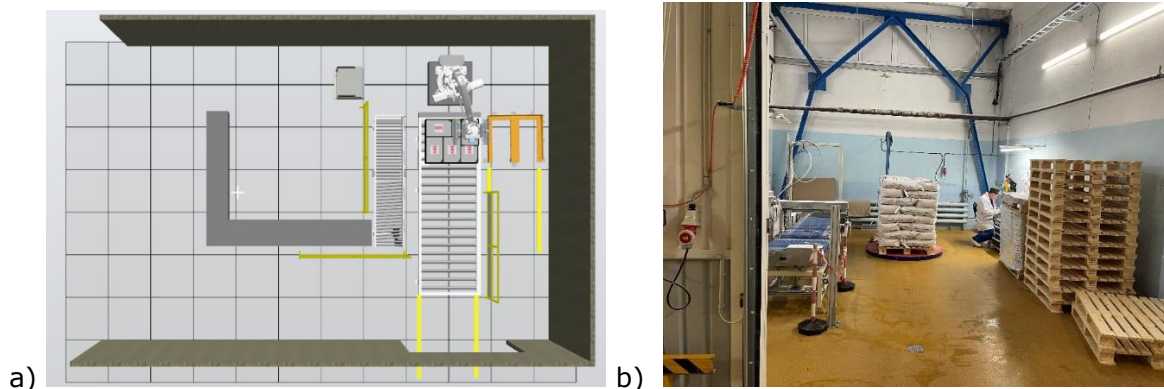
3.6 Süsteemi visualiseerimine ja ladumisalgoritmi süntees

Selles etappis peaksid kõik seadistused olema valmis. Igaks juhuks tasub veelkord vajutada *Check Reach* nuppu, et programm kontrolliks veelkord roboti ulatust igasse positsiooni. Samuti saab *Preview Palletizing* menüüga iga töö osa ladumist kontrollida. Edasi võib enda konfiguratsiooni üleslaadida kontrollerrisse nupuga *download* ja käivitada nupuga *Play* (vt. Joonis 3.19).



Joonis 3.19 Ulatuse testimise, ladumise eelvaade, kontrollerrisse üleslaadimine ja testimise menüüd

Vastavalt Eastman Specialties OÜ tehase tööruumi eripärale koostati visualiseerimine liigendkäega ladumisrobotiga ABB IRB460 [24] ja kahveltüüpi haaratsiga ABB ClawGripper [30], selleks et näidata missugune võiks olla potentsiaalne robotiseeritud töökoht. Töökeskkonda paketi ABB Robotstudio kirjeldab joonis 3.20a ja joonis 3.20b, mis näitab olemasoleva töökohta tootmistsehhi.



Joonis 3.20 a) Koostatud robotiseeritud töökohta pealt vaade RobotStudio tarkvaras b) Olemasolev töökoht tootmistsehhis

Koostatud ladumisalgoritmi sünteesitakse ABB RAPID keeles, millega tekitatakse kolm programmimoodulit ladumisprotsessi läbiviimiseks. Esimene koodimoodul *PmMain* käivitab projekti ning operatsioonide järjestuse. Samuti on selles moodulis kirjeldatud ka veakäsitlus. Teine moodul *PmProjMgr* laadib projekti ning käivitab selles peamooduli *PmMain*. Viimane moodul *PmUtility* liigutab roboti kodupositsiooni, salvestab andmeid vahepositsiooni arvutamiseks ning seejärel arvutab neid, et tagada roboti sujuv liikumine ladumise protsessis. Moodulite funktsioonide selgitused on kirjeldatud L2 all.

Koodi lihtsustamiseks võib kasutada AdaptPack Studio tõlkekogu, mis on võimeline genereerima robotitele lihtsama koodi peale selle *offline* programmeerimist. Uuringud ja praktilised testid näitasid paranemist uute robotitega süsteemide loomises peale tõlkekogu kasutamist. See kogu suudab eksportida käsk pärisrobotile, kui on eelnevalt kasutatud *offline* programmeerimise keskkondi. AdaptPack Studio tõlkekogu suudab genereerida koodi robotitele firmadest ABB, FANUC, KUKA ja Yaskawa. [36]

4. SÜSTEEMI MAJANDUSLIKUD KÜLJED

Eelnevates peatükkides sai valitud süsteemile robot koos tööriistaga ning teostatud asetusplaan koos visualiseerimisega. Samuti uuriti kui palju suudab robotiseeritud töökoht kotte päevas laduda. Süsteemi tulemuslikkuse tagamiseks on vaja uurida, kas süsteem suudab tooteid planeeritud kogustes tähtajaliselt ja kvaliteetselt laduda. Samuti oleks vaja arvestada igasuguseid riske, mis kaasnevad robotiseeritud töökoha tekitamisega.

4.1 Süsteemi maksumus ja tasuvus

Süsteemi maksumuse arvutuseks kasutati tabelit 4.1. Süsteemi komponentideks on robot, milleks sai valitud ABB IRB 460 [24] ja Haarats ABB Flexgripper Claw [30]. Siinkohal tuleb täpsustada, et analoogse haaratsi väljatöötamise hind võiks olla ligikaudu 6000 EUR. Üheks aastaks tarkvara roboti programmeerimiseks ning optimeerimiseks ABB RobotStudio Premium [2]. Samuti oleks vaja osta juurde ka rullkonveierid kottide ja kaubaaluste liigutamiseks ning kaubaaluse etteandja. Rullkonveierite ligikaudsed hinnad küsiti ettevõttelt Hoob [37] ning uuriti kaubaaluste konveiereid Hoob konveierkataloogist [38]. Kaubaaluse etteandja hinnet uuriti Palomati [39] esindajatelt, kuna sama etteandja on juba ettevõttes kasutusel.

Tabel 4.1 Süsteemi komponentide maksumus

Komponent	Mudel	Hind
Robot	ABB IRB460 [24]	36000 EUR *1
Haarats	ABB Flexgripper Claw [30]	6000 EUR *2
Tarkvara	ABB RobotStudio Premium [2]	3000 EUR / aastas *1
Sisendkonveier	Hoob konveier 700x600 mm [38]	3000 EUR *1
Väljundkonveier	Hoob konveier 1300x2500 mm [38]	7000 EUR *1
Kaubaaluse etteandja	Palomat Inline [39]	12500 EUR *1
Paigaldus ja seadistamine		12500 EUR *1
Kokku		80000 EUR *1
*1 Soovitatavad hinnad seisuga 03.04.2024 otse tootjatelt ilma käibemaksuta		
*2 Analoogse haaratsi väljatöötamise hind		
!NB Kõik töös loetletud hinnad on ilma KM-ta.		

Tasuvusaja leidmiseks oleks vaja uurida kui palju operaatoreid ettevõttes töötab, kui suured hoolduskulud on olemasoleval süsteemil ning ligikaudselt kui palju palka saavad operaatorid sellise töö eest. Need andmed on saadud lõputöö konsultandilt. Operaatori tasuks olemasolevas töökohas arvestati mediaanpalka Eestis statistikaameti andmetelt, milleks on ligikaudu 1600 eurot [40]. Operaatorite arv on vastavalt neli 12 tunnilist vahetust kahe operaatoriga ehk kokku kaheksa. Siin peab arvestama nüüd ka seda, et operaatorite arv võib kahe võrra suureneka kuna töö on füüsiliselt raske ning võib tekitada terviseprobleeme. Robotiseeritud süsteemi ligikaudseteks hoolduskuludeks võeti 10000 eurot aastas [41] ning operaatori palgaks eesti keskmise palga seisuga 28.03.2024, milleks on 1900 EUR [40]. Tasuvuseaja arvutamiseks koostati tabel 4.2.

Tabel 4.2 Tasuvusaja arvutustabel

KULUD / AASTAD	1.aasta	2.aasta	3.aasta	4.aasta
Olemasoleva töökoha näitajad				
10 operaatori töötasu *1	192000€	192000€	192000€	192000€
Töökoha hoolduse kulud *2	2500€	2500€	2500€	2500€
Kulud Kokku *3	194500€	194500€	194500€	194500€
Kulud kumulatiivselt *3	194500€	389000€	583500€	778000€
Robotiseeritud töökoha näitajad				
Roboti maksumus ja installatsioon	80000€	-	-	-
Operaatorite koolitus *3	40000€	-	-	-
4 operaatori töötasu *4	91200€	91200€	91200€	91200€
Hooldus ja abivahendid *5	10000€	10000€	10000€	10000€
Kulud kokku *3	221200€	101200€	101200€	101200€
Kulud kumulatiivselt *3	221200€	322400€	423600€	524800€
*1 Operaatori ühe kuu töötasuna on arvestatud mediaanpalk Eestis [40]				
*2 Töökoha ligikaudsed hoolduse kulud on saadud lõputöö konsultandi käest seisuga 03.04.2024				
*3 Arvutatud kogukulud on ligikaudsed seisuga 03.04.2024				
*4 Operaatori ühe kuu töötasuna on arvestatud keskmine palk Eestis seisuga 03.04.2024 [40]				
*5 Hoolduse ligikaudne väärtus on võetud 2021 aasta võrgumaterjalist [41]				

Tabelist 4.2 selgub, et süsteemi koostamisel on näha kulude vähenemist juba teisel aastal. Kolmandal aastal on vahe juba rohkem kui 20% ning aastatega hakkab vahe suurenema olles 50% neljandal aastal. Tasuvusaja arvutused ning seadmete hinnakiri ei ole lõplikud. Tasub arvestada sellega et, hinnad võivad aastatega kasvada või langeda ning süsteemi jaoks peaks juurde ostma ka teisi komponente, mis võivad maksta kuni 50% saadud robotiseeritud töökoha kasumist. Tasuvusarvutust tõestab ka robotsüsteemi põhine ROI kalkulaator, kui sisestada samad parameetrid. [42]

4.2 Riskianalüüs

Iga suure investeeringuga kaasnevad riskid, mida tuleb maksimaalselt maandada ning ennetada. Selles alapeatükis vaadeldakse erinevaid riske ning analüüsitakse süsteemi kitsaskohti. Samuti klassifitseeritakse riskid vähetähtsatest kriitilisteni. Selleks koostati tabel 4.3, mis kategoriseerib riske ning uurib nende olemust süsteemi tekitamiseks ettevõttes.

Riskide hinnang põhines standardil EVS-EN ISO 12100:2010 Masinate ohutus. Projekteerimise, riskide hindamise ja riskide vähendamise üldised põhimõtted. [43] Standardis oli lahti kirjeldatud, kuidas õigesti määrata riskid ja kuidas neid hinnata.

Tabel 4.3 Riskide kirjeldused ja hinnang

NR	Riski kirjeldus	Riski esinemise tõenäosus (0...1)	Riski olulisus (0...1)	Hinnang
1	Robotil ei ole piisavalt tööd	0.25	0.5	Madal
2	Puuduvad vajalikud kompetentsid	0.10	1.0	Madal
3	Nõrk eestvedamine	0.10	0.75	Madal
4	Kõrged algkulud	0.25	0.75	Keskmine
5	Töötajate koolitamine	0.9	0.5	Keskmine
6	Halvasti teostatud ohutusmeetmed	0.25	1	Keskmine
7	Tehnilised rikked	0.25	1	Keskmine
8	Suured hoolduskulud	0.25	1	Keskmine
9	Valesti valitud komponendid	0.5	0.75	Kõrge
10	Töökohtade kaotus	1	0.5	Kõrge

Kõige suuremateks riskideks on töökohtade kaotus töötajatele, kes on vähe kompetentsemad ning kelle koolitus võtab tõenäoliselt rohkem aega. Veel üheks suureks riskiks on valede komponentide valik, mida peab tuvastama juba projekteerimise etapis, muidu süsteem ei alustagi töötamist. Keskliste riskide juures on oluline paika panna ohutustehnika reeglid, jälgida seadmete seisukorda ja koolitada operaatoreid vastavalt tööülesannetele. Üheks oluliseks riskiks on ka kõrged algkulud, mis võivad ettevõtte investeeringust keelduda. Väheolulisemad on eestvedamis probleemid ning roboti seisak ebapiisava töö tõttu. Võimalikeks ohtudeks on ka elektrienergia kulu suurenemine võrreldes inimtööjõu kasutamisega. Erinevates uuringutes hinnatakse et ca 60% roboti rakendamise seotud kuludest on seotud elektrienergia. [44]

4.3 Tulemuslikkuse hindamine

Süsteemi tulemuslikkuse hindamiseks peab arvestama erinevaid faktoreid nagu seadmete üldist efektiivsust, käivet ja kasumit või automatiseerimise osakaalu. Järgnevalt analüüsitakse mõned süsteemi võtmetulemusnäitajad (KPI) ja prognoositakse nende käitumist lühiajaliseks ajaperioodiks. Seda selleks, et tooted oleksid kvaliteetsed ja kättesaadavad vajalikes kogustes. Samal ajal peaks ressursside kasutus olema ratsionaalne ning protsess tooma ettevõttele kasumit. [12]

Esimeseks KPI-ks vaadeldi süsteemi tootlikkust. Vastavalt peatükis 3.3 teostatud arvutustele suudab projekteeritud roboti süsteem väljastada vähemalt ühe kaubaaluse 100 minutiga. Ööpäevas suudab süsteem laduda järjest vähemalt 14 kaubaalust sellise kiirusega. Roboti väärtuslik tööaeg ühe kaubaaluse ladumisel on ligikaudu 15%, mis tähendab, et juhul kui tellimust pole, kaotatakse robotiseerimise tõttu vähe, sest selle osakaal pole suur protsessis ning seda saab asendada igal juhul inimtööjõuga, kui tekib suurem rike.

Teiseks KPI-ks on vaadeldud süsteemi paindlikkust. Toode on üks ja sama koguaeg (vt peatükk 1.2.1) ning ettevõttel ei ole plaanis seda ümber seadistada ega muuta. See näitab, et süsteem ei pea olema paindlik, selleks et tõsta kotte. Samas kui tahetakse näiteks koti suurust muuta väiksemaks, siis süsteemi ümberseadistamine ei võta palju ressursse, kuna muutmisele kuulub ainult ladumismuster. Sellega kaasneb ka roboti liikumiste vähenemine või suurenemine vastavalt uue koti mõõtudele.

Kolmanda KPI tootlikkuse osas vastavalt peatükis 4.1 arvutatud kasumlikkusele saab väita, et robotiseeritud töökohtade sisendite maksumuse puhul on süsteem majanduslikult soodne ning planeeritavat kasumit on võimalik ka realiseerida. Saadud kasumlikkus toob ettevõttele võimalusi süsteemi edasiarenduseks ning automatiseerimise tase tõstmiseks. Isegi suuremate rikete puhul on võimalik ülal pidada robotiseeritud töökoha nii, et see toodab klientidele vajaliku toote kogust.

4.4 Võimalikud edasiarendused

Üheks potentsiaalseks edasiarenduseks on olemasoleva konveieri sünkroniseerimine (CVT) robotiga ning tihedam integreerimine uue robot ladumissüsteemiga, mis säästab koti pakendamisaega ning teeb protsessi veelgi kiiremaks, kuna praegu peab operaator jälgima koti pakkimise protsessi ning vajadusel sekkuma.

Teiseks edasiarenduseks on haaratsi ning sellele vajalikku rullkonveieri väljatöötamine. Selleks kasutati visualiseerimiseks ABB Flexgripper Claw kahveltüüpi haaratsit, mis on suhteliselt raske ning esindajatelt saadud info puhul kättesaamatu. Analoog hinnaks haaratsi väljatöötamiseks pakuti 6000 EUR, mis on piisav, et ehitada kahvel tüüpi haarats, mis oleks kergem ja kiirem, mis võiks olla ka eraldi bakalaureusetöö teema.

Lõpuks ettevõtte nõusolekul ja finantseerimise olemasolul võiks edasiste tööde raames teostada ka reaalse süsteemi projekteerimise tootmistehhi jaoks ja uurida selle töökindlust tõestamaks töö tulemusi.

KOKKUVÕTE

Käesolevas bakalaureusetöös vaadeldi ja võrreldi erinevaid ladumissüsteeme eesmärgiga näidata võimalik lahendus Eastman Specialties OÜ tootmistsehhile. Vaadeldi nelja erinevat ladumise tehnoloogiat, nelja erinevat liigendkäega ladumissüsteemi ja kolme erinevat kahvel tüüpi haaratsi süsteemi. Kuna erinevused nii süsteemide kui ka liigendkäte vahel on suured, koostati iga valiku teostamiseks tabel, mis aitab visuaalselt informatsiooni kokku hoida ja lihtsamini neid võrrelda. Töös üritati valida nii soodsaid süsteemi komponente, kui see oli võimalik.

Töö käigus projekteeriti RobotStudio tarkvara pakettiga ABB Palletizing PowerPac [6] süsteemi ning koostati ladumisalgoritm ja süsteemi visualiseerimine, eesmärgiga analüüsida süsteemi tehnilisi ja majanduslikke külgi piiratud ruumis. Töö käigus koostati visualiseerimise juhend, et ABB Robotstudio tarkvara järgmistel kasutajatel Tallinna Tehnikaülikoolis oleks juhend ABB Palletizing PowerPac tarkvarapaketi õppimiseks ja kasutamiseks.

Töö vältel ja lõpus analüüsiti süsteemi tekitamise vajadust ning koostati ka töötsükli koos ligikaudse tsükliajaga ning arvutati kui kaua võtab ühe kaubaaluse ladumine 40 kotiga. Teostati süsteemi tasuvusarvutus, riskianalüüs ning seejärel hinnati süsteemi tulemuslikkust kolme kriteeriumi põhjal: tootlikkus, paindlikkus ja kasumlikkus.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgid ladumissüsteemi visualiseerimise koostamise, esmase kottide ladumisalgoritmi loomise ning süsteemi teostatavuse analüüsi osas said edukalt täidetud.

Töö käigus ilmnisid ka mõned probleemid, mis vajaksid detailsemat uurimist sealhulgas kogumaksumuse arvutamine. Ligikaudsete hindadega saab teha ka ainult ligikaudseid arvutusi. Tootjad ei kajasta enda toodete hindasid niisama, vaid neid peab esindajatelt otse küsima.

Teiseks probleemiks oli süsteemile konveierite leidmine. Siinkohal tasub uurida rohkem hindasid ning töö autori subjektiivsel hinnangul saab projekteerida ka odavama konveierliini kottide pakkimiseks. See oleks ka üks võimalikkest lõputöö edasiarendustest.

SUMMARY

The bachelor's thesis examined and compared various palletizing systems to find a potential solution for the workshop in Eastman Specialties OÜ. Thesis considered four different palletizing system technologies, four different articulated arm palletizing systems and three different fork-type gripper systems. Due to significant differences between the systems and robots, author created a table for each selection made to visually improve comparison of the information. The final selection of the system components was based on the author's knowledge in the virtual robot software and the overall cost of the system. The author tried to choose components that were as cost-effective as possible.

During the project author designed the system, made a bag palletizing algorithm and visualised the system through the ABB RobotStudio software package Palletizing PowerPac to analyse the technical and economic aspects of the system in a limited space. The author created the visualisation in a guide format to provide input material for future users at Tallinn University of Technology on how to use the ABB RobotStudio Palletizing PowerPac software package.

Throughout the project thesis author analysed the need for system deployment as well as a work cycle and a cycle time of the system with calculation of approximate time needed for palletizing one EPAL3 pallet with 40 bags. Author also conducted a profitability calculation, risk analysis and evaluated the effectiveness based on three criteria: productivity, flexibility and profitability.

The objectives of this bachelor's thesis, to create a visualization of the palletizing system, a palletizing algorithm for bags and to analyse the feasibility of the system, were successfully achieved.

There were several problematic areas that emerged during the project, one being the calculation of total cost. Since approximate prices were used, only approximate calculations can be made. Manufacturers do not list their product prices directly. The client must ask the prices from the manufacturer sales support. Secondly finding appropriate conveyor systems can be problematic. In this regard, it is worth designing a cheaper conveyor line, which is one of the possible further developments of the thesis.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

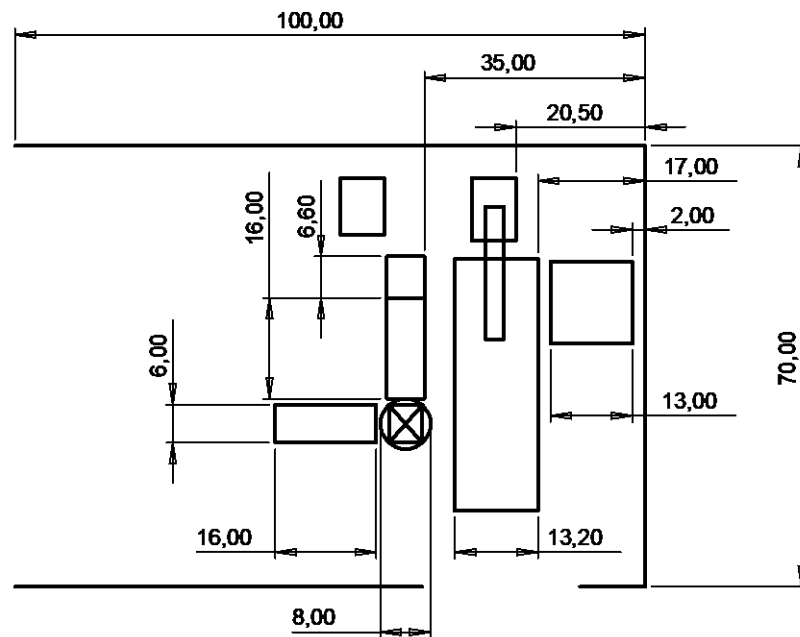
- [1] Eastman Chemical Company, „Eastman Specialties OÜ,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eastman.com/en/who-we-are/locations/kohtla-jarve-estonia>. [Kasutatud 14. 02. 2024].
- [2] „ABB RobotStudio,“ ABB, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>. [Kasutatud 23. 02. 2024].
- [3] „Festo CIROS 7,“ Festo Corporation, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.festo.com/us/en/p/ciros-7-universal-3d-simulation-system-id_PROD_DID_8140772/?page=0. [Kasutatud 08. 05. 2024].
- [4] RoboDK Inc., „RoboDK,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://robodk.com/>. [Kasutatud 14. 02. 2024].
- [5] „CoppeliaSim,“ Coppelia Robotics AG., [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.coppeliarobotics.com/>. [Kasutatud 08. 05. 2024].
- [6] „ABB Robot Studio Palletizing PowerPac,“ ABB, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/software-and-digital/application-software/palletizing>. [Kasutatud 14. 03. 2024].
- [7] D. Systems, „Solidworks,“ Dassault Systems, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.solidworks.com/>. [Kasutatud 14. 02. 2024].
- [8] D. Goodwin, „What is Automated Palletizing? A Look Into PLC and Robot Controlled Palletizing,“ 09. 04. 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://control.com/technical-articles/What-is-Automated-Palletizing-A-Look-Into-PLC-and-Robot-Controlled-Palletizing/>. [Kasutatud 15. 02. 2024].
- [9] P. Hegarty, „Automated Palletizing: How It Works and How To Do It,“ 16. 08. 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://formic.co/resources/articles/automated-palletizing>. [Kasutatud 15. 02. 2024].
- [10] „The Science of Palletizing,“ Columbia Machine, Inc., [Võrgumaterjal]. Available: <https://palletizing.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/11/Science-of-Palletizing.pdf>. [Kasutatud 15. 02. 2024].
- [11] „EVS-EN ISO 10218-2:2011 (Tööstusrobotid. Ohutusnõuded. Osa 2: Robotsüsteemid ja integreerimine),“ MTÜ, Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-10218-2-2011>. [Kasutatud 09. 04. 2024].
- [12] T. Kangru, J. Riives, K. Mahmood ja T. Otto, „Suitability analysis of using industrial robots in manufacturing,“ *PROCEEDINGS OF THE ESTONIAN ACADEMY OF SCIENCES*, kd. 4, nr 68, pp. 383-388, 2019.
- [13] „EVS-EN 415-4:1999 (Pakkemasinate ohutus. Osa 4: Kaubaaluste pakkimis- ja lahtipakkimismasinad),“ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-415-4-1999>. [Kasutatud 21. 03. 2024].
- [14] „EVS-EN 415-6:2013 (Pakkemasinate ohutus. Osa 6: Kaubaaluste pakkemasinad),“ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-415-6-2013>. [Kasutatud 21. 03. 2024].

- [15] „Robotic Palletizer,“ IQS Directory, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iqsdirectory.com/articles/palletizer/robotic-palletizer.html>. [Kasutatud 15. 02. 2024].
- [16] „KUKA KR 40 PA,“ KUKA AG, [Võrgumaterjal]. Available: https://my.kuka.com/s/product/kr-40-pa/01t58000002hnjEAAQ?language=en_US. [Kasutatud 16. 04. 2024].
- [17] „Robot systems from KUKA,“ KUKA AG, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kuka.com/en-se/products/robotics-systems>. [Kasutatud 15. 02. 2024].
- [18] „KUKA KR 70 R2100,“ KUKA AG, [Võrgumaterjal]. Available: https://my.kuka.com/s/product/kr-70-r2100/01t1i000000AQtSAAW?language=en_US. [Kasutatud 16. 04. 2024].
- [19] „4 Axis Cartesian palletizer with infeed single pallet,“ Vention, [Võrgumaterjal]. Available: <https://vention.io/designs/4-axis-cartesian-palletizer-with-infeed-single-pallet-297940>. [Kasutatud 16. 02. 2024].
- [20] „Universal Robots UR30,“ Universal Robots USA, Inc, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.universal-robots.com/products/ur30-robot/>. [Kasutatud 15. 02. 2024].
- [21] „MiR1350, The most powerful AMR from MiR to date,“ Mobile Industrial Robots A/S, [Võrgumaterjal]. Available: <https://mobile-industrial-robots.com/products/robots/mir1350>. [Kasutatud 19. 02. 2024].
- [22] „MiR1350 AMR Price,“ RG Group, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.rg-group.com/store/product/100028-standard/mir1350-autonomous-mobile-robot>. [Kasutatud 19. 02. 2024].
- [23] „Cartesian Palletiser, Automate heavy payload tasks,“ Vention, [Võrgumaterjal]. Available: <https://vention.io/cartesian-palletizer>. [Kasutatud 16. 02. 2024].
- [24] „ABB IRB 460,“ ABB Robotics, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-460>. [Kasutatud 15. 02. 2024].
- [25] „Yaskawa PL Series PL80,“ Yaskawa Europe GmbH, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.yaskawa.eu.com/products/robots/palletizing/productdetail/product/pl80_16733. [Kasutatud 22. 02. 2024].
- [26] „FANUC Robot M-410iC,“ FANUC Corporation, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.fanuc.co.jp/en/product/robot/f_r_palletizing.html#m410ic. [Kasutatud 22. 02. 2024].
- [27] „KUKA.Sim,“ KUKA Robotics Corporation, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/software/simulation-planning-optimization/kuka_sim. [Kasutatud 23. 02. 2024].
- [28] „Yaskawa MotoSim EG-VRC,“ Yaskawa America, Inc., [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.motoman.com/en-us/products/software/simulation>. [Kasutatud 23. 02. 2024].
- [29] „Pneumatic Palletizing Grippers,“ Applied Robotics Inc., [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.appliedrobotics.com/products/automation/palletizingpackaging/>. [Kasutatud 19. 02. 2024].
- [30] „ABB Flexgripper Claw,“ ABB Robotics, [Võrgumaterjal]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/applications/packaging-and-palletizing/flexgripper-claw>. [Kasutatud 12. 03. 2024].

- [31] „Fork Gripper Fork FP50,“ Gizelis Robotics, [Võrgumaterjal]. Available: <https://grobotics.eu/products/grippers/fork-gripper-fp50>. [Kasutatud 17. 03. 2024].
- [32] „Product specification - IRB 460, 3HAC039611-001, Rev: Q,“ ABB. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 24. 05. 2024].
- [33] „Product Manual - IRC5 3HAC047136-001, Rev: AD,“ ABB Robotics. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 09. 04. 2024].
- [34] „EVS-EN ISO 13850:2015 (Masinate ohutus. Hädaseiskamisfunktsioon. Kavandamise põhimõtted),“ Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus MTÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13850-2015>. [Kasutatud 09. 04. 2024].
- [35] „Product manual - IRB460, 3HAC039842-001, Rev: Y,“ ABB Robotics. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 09. 04. 2024].
- [36] J. P. Carvalho de Souza, A. L. Castro, M. F. Rocha ja M. F. Silva, „AdaptPack studio translator: translating offline programming to real palletizing robots,“ *Industrial Robot-the International Journal of Robotics Research and Application*, kd. 47, nr 5, pp. 713-721, 02. 07. 2020.
- [37] „HOOB,“ Hoob OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://hoob.ee/>. [Kasutatud 28. 03. 2024].
- [38] „Hoob Pallet Conveyor Catalogue,“ Hoob OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.hoob.ee/wp-content/uploads/2022/04/Hoob_Pallet_Conveyor_Catalogue_04_2022.pdf. [Kasutatud 28. 03. 2024].
- [39] „PALOMAT Inline,“ PALOMAT, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.palomat.com/media/unndoxke/palomat_inline_uk_web.pdf. [Kasutatud 02. 04. 2024].
- [40] „Palk ja tööjõukulu,“ Eesti Statistikaamet, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.stat.ee/et/avasta-statistikat/valdkonnad/tooelu/palk-ja-toojoukulu>. [Kasutatud 27. 03. 2024].
- [41] „Maintenance and Repair of Industrial Robots: What You Should Know,“ Robotic Simulation Services by FS Studio, 12. 09. 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://roboticsimulationservices.com/maintenance-and-repair-of-industrial-robots-what-you-should-know/>. [Kasutatud 27. 03. 2024].
- [42] „Total Robotic System Cost Vs. Current Operational Costs,“ Association for Advancing Automation, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.automate.org/robotics-roi-calculator-answer>. [Kasutatud 08. 05. 2024].
- [43] „EVS-EN ISO 12100:2010 (Masinate ohutus. Projekteerimise, riskide hindamise ja riskide vähendamise üldised põhimõtted),“ Eesti Standardimis- ja akrediteerimiskeskus MTÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-12100-2010>. [Kasutatud 03. 04. 2024].
- [44] H. Wyatt, A. Wu, R. Thomas ja Y. Yang, „Life Cycle Analysis of Double-Arm Type Robotic Tools for LCD Panel Handling,“ *Machines*, kd. 5, nr 1, p. 8, 04. 03. 2017.

LISAD / APPENDICES

Lisa 1: Seadmete paigutus koos mõõtmega



TALTECH INSENERITEADUSKOND		Bakalaureusetöö	Mõõtkava 1:100
Koostaja Vladislav Magilnitski	15.04.2024	Seadmete paigutus mõõtmega	
Juhendaja Madis Lehtla	15.04.2024		
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut		Süsteemi projekteerimine kottide ladumiseks kaubaalusele	

Lisa 2: Funktsioonide selgitused RAPID koodis

Funktsioon keeles RAPID	Selgitus
Koodimoodul: PmMain	
<i>OperateSequence</i>	See rutiin täidab toimingute jada. Siin tuuakse voost välja kaks tööala kirjeldust.
<i>Operate</i>	Enne operatsiooni iga esimese sihtmärgi poole liikumisel läheb robot vahepealsesse asendisse. See rutiin teostab ühe toimingu.
Koodimoodul: PmProjMgr	
<i>LoadAllModulesInTask</i>	See rutiin leiab selle ülesande jaoks ettenähtud moodulid. Kui moodulid tuleks laadida, peab projekti LoadRapid väärtuseks olema määratud TRUE. Seab lipu PM_ERR_NO_TASK, kui praeguse ülesande jaoks pole ühtegi ülesannet konfigureeritud.
<i>LoadAllModules</i>	See rutiin laadib ülesande jaoks moodulid. Juba laaditud mooduleid ei eemaldata.
<i>LoadModule</i>	See rutiin laadib mooduli, kui seda veel pole.
Koodimoodul: PmUtility	
<i>MoveHomePos</i>	See rutiin viib roboti eelmääratletud algasendisse ja salvestab andmed järgmise vahepositsiooni arvutamiseks.
<i>SetLastPos</i>	See rutiin salvestab andmed järgmise vahepositsiooni arvutamiseks. Argumendid: IN: pm_wadescr WorkArea, pm_targetdata Tgt, pm_actiondata
<i>MoveInterMid</i>	See rutiin arvutab viimase salvestatud positsiooni, sihtargumendi ja järgmise toimingu vahepealse positsiooni. Liikumine viiakse läbi ühise liigutusena. Argumendid: IN: pm_wadescr WorkArea, pm_targetdata Tgt, pm_actiondata Act, num SafetyOffsetZ, valikuline IN: num MaxToolAngle, num MinToolAngle