



Margus Liik Priit Pihlakas

**TÖÖSTUSROBOTI
JUURUTAMINE
SUUREGABARIIDILISTE
METALLKONSTRUKTSIOONIDE
KEEVITAMISEL**

LÕPUTÖÖ

**Mehaanikateaduskond
Masinaehitus**

Tallinn 2014

SISUKORD

Sissejuhatus	5
1. AS E-Profiil	8
2. Tooted.....	9
2.1. Toodete sobivus robotkeevituseks	9
2.2. Robotkeevituseks valitud tooted	10
2.2.1. Toode „Front sheave house”	11
2.2.2. Toode „Dual idler sheave house”	12
2.2.3. Toode „Idler sheave house”	13
2.2.4. Toode „Korpus”	14
2.2.5. Tootegrupp „Flants”	15
3. Robotlahenduse valik	16
3.1. Keevitusprotsesside automatiseerimine	16
3.2. Keevitusroboti juurutamise töökäik	20
3.3. SWOT-analüüs	21
3.3.1. Personaliküsimus.....	22
3.4. Pakutud robotlahenduste võrdlus	23
3.4.1. Pakkumiste analüüs	25
3.4.2. Kvaliteedi analüüs	27
3.4.3. Keevituskatsete läbiviimine ja analüüs	29
3.4.4. Robotlahenduse valik	30
4. Asendiplaani väljatöötamine	32
4.1. Tootmise planeerimist puudutav lähteinfo roboti kasutusele võtmisel	32
4.2. Tootmisvoogude ja asendiplaani kujundamine	33
5. Rakise väljatöötamine	35
5.1. Nõuded rakisele.....	35
5.1.1. Roboti manipulaatori parameetrid.....	36
5.1.2. Tootegrupp „Flants”	36
5.2. Projekteeritud rakise iseloomustus.....	38

5.2.1. Kasutamine.....	38
5.2.2. Kinnitusjõudude arvutused.....	39
5.2.3. Konstruktsioon	42
6. Majanduslikud arvutused	43
6.1 Arvutusmetoodika ja valemid	43
6.2 Tsükliagade arvutustulemused	47
6.2.1 Toode „Front sheave house”	47
6.2.2 Toode „Dual idler sheave house”	48
6.2.3 Toode „Idler sheave house”	49
6.2.4 Toode „Flants”	50
6.2.5 Toode „Korpus”	50
6.2.6 Keevitusajad kokku	51
6.3 Tootmisüksuse arvutused	52
6.3.1 Seadmete arvutused.....	52
6.3.2 Personali arvutused	53
6.3.3 Kaitsegaasi kulu arvutused.....	54
6.4 Investeeringu tasuvusaja ja tootepartii omahinna arvutused.....	55
Kokkuvõte	56
Summary	57
Viidatud allikad	58
Lisa 1. Graafiline osa	59
Roboti asendiplaan	60
Tootegrupp „Flantsid“	61
Manipulaatori paigaldusraam keevitusjoonis	62
Manipulaatori paigaldusraami montaažijoonis	63
„Flantside“ kinnitamine paigaldusraamile	64
„Flantsid“ paigaldusraamil	65
AS E-Profiili tootmise asendiplaan	66

SISSEJUHATUS

Tootmismahu hüppeline kasv AS E-Profiilis on tinginud vajaduse tootmise efektiivsuse tõstmiseks. Selleks on tehtud mitmeid investeeringuid ning rakendatud meetmeid tööviljakuse tõstmiseks ning tootmise paremaks planeerimiseks. Juba kasutusele võetud meetmetele lisaks on olemasoleva inimressursi ja tootmispindade efektiivsemaks ärakasutamiseks üks planeeritav lahendus keevitusprotsessi täiendav automatiseerimine.

Käesolevalt juba on kasutusel mõningad poolautomatiseeritud keevituslahendused, kuid nende kasutamine on vähese paindlikkuse tõttu piiratud vaid väga töömahukate ja ühesarnaste keevisõmbluste keevitamiseks. Planeeritav täisautomaatne robotlahendus võimaldab mehaniseeritult keevitada mitmeid tooteid, mille keevitamine tänasel päeval on võimalik vaid käsitsi. Et üha süvenevaks probleemiks on kvalifitseeritud tööjõu, siinkohal kõrge oskusteabega keevitajate, leidmine, leevendab automatiseeritud keevitusprotsessi kasutuselevõtt toodete puhul, millel see on võimalik, osaliselt seda probleemi, vabastades väärtuslikku inimressurssi teiste toodete keevitamiseks. Keevitusprotsessi automatiseerimise eesmärk ei ole tööjõult kokkuhoidmine ja töötajate arvu vähendamine, vaid täiendav tööviljakuse kasv. Vastupidi, automatiseerimine loob täiendavaid töökohti.

Laialt on levinud arusaam, et tööstusrobotitesse on mõtet investeerida ainult väga suurte tootepartiide korral suursaritootmise tingimustes. AS E-Profiili tooteportfell erineb selles osas klassikalise automatiseerimise ülesande omast. Seeriad on pigem väikesed, kuid tegemist on suuregabariidiliste toodetega ning osadel toodetel esineb geomeetrilisi kordusi, mis on heaks eelduseks roboti kasutusele võtmiseks. Samuti on selle poolt argumendiks mahukad keevisõmblused enamustel toodetel.

ASE-Profiili inseneribaas on suur, kuid keevitusrobotite vallas praktilised kogemused vähesed. Seetõttu algas käesoleva lõputöö kirjutamine mahukast uurimustööst keevitusrobotite kohta laiemalt nii inglise, saksa kui ka eesti keelsest kirjandusest. Iga tarnija leiab kümneid argumente, miks just tema pakkumine on parim, kuid ühe või teise pakkumise kasuks otsusamine eeldab teadmiste omandamist kolmandatest allikatest.

Iga kasumit taotleva ettevõtte investeering peab olema majanduslikult põhjendatud. Amortiseerunud seadme väljavahetamine või juba olemasoleval tehnoloogial põhineva, kuid suurema tootlikkusega või lihtsalt valmistatava toote gabariitidele paremini sobivama seadme või tööpingi hankimine on lihtsam ülesanne kui ettevõtte jaoks terve uuel tehnoloogial põhineva tootmissüsteemi majandusliku otstarbekkuse põhjendamine.

Käesolev lõputöö on tehtud grupitööna kahe autori, Margus Liigi ja Priit Pihlaka, poolt.

Margus Liik töötab AS E-Profiili partnerettevõttes OÜ Servtec Solutions kvaliteedispetsialistina ning on otseselt või kaudselt AS E-Profiili tootmisega seotud olnud viis aastat. Puutub igapäevaselt kokku keevituskvaliteedi küsimustega ning valdab spetsialisti tasemel mittepurustava kontrolli meetodeid.

Priit Pihlakas töötab alates 2014 aasta jaanuarist AS E-Profiilis konstruktori ametikohal. Õppis täiendavalt õppeaastal 2011/12 stipendiaadina Saksamaal Augsburg UAS-is, kus läbis teiste hulgas tööstusrobotite ja tootmise automatiseerimistehnika kursused.

Mõlemad autorid on Tallinna Tehnikakõrgkooli masinaehituse eriala kaugõppe tudengid.

Käesoleva lõputöö ülesanded on osad ettevõtte suurest projektist ning nende ulatus on piiritletud ja määratud ettevõtte juhtkonna poolt ning hõlmab järgnevaid keevitusroboti kasutusele võtmisega seotud punkte:

- 1) Valida parim saadaolev lahendus robotkeevituse kasutuselevõtmiseks;
- 2) Leida robotiraku optimaalseim paigutus tehases;
- 3) Töötada välja rakis täiendavate toodete robotiga keevitamiseks;
- 4) Veenduda investeeringu majanduslikus tasuvuses.

Seejuures on esimene ja neljas punkt Margus Liigile ja teine ning kolmas Priit Pihlakale määratud ülesanded.

Robotilahenduse valikul tuleb arvestada ettevõtte toodangu iseloomuga ning tootmismahitudega. Roboti tarnijatele on seatud ülesandeks pakkuda välja võimalikult nõ võtmed kätte lahendus. See tähendab, et pakkuja valmistab robotisõlme etteantud põhitoodete valmistamiseks täielikult ette ning annab AS E-Profiilile üle toimiva tootmismooduli.

AS E-Profiilile parima lahenduse leidmiseks tuleb analüüsida süvitsi konkreetseid pakkumisi ning nii pakutavate lahenduste kui ka laiemalt keevitusroboti kasutamise võimalusi ja puudusi ja seda, millistel tingimustel on keevitusprotsessi täisautomatiseerimine üldse mõistlik.

Planeeritav robotirakk hakkab paiknema AS E-Profiili olemasoleval tootmispinnal. Et see on juba praegu tugevasti koormatud, siis on optimaalseima paigutuse leidmine ja asendiplaani väljatöötamine koos materjalivoogude planeerimisega esitatud eraldi olulise lähteülesande punktina.

Kuna planeeritavad põhitooted ei taga roboti piisavat koormatust, tuleb robotiga keevitamisest suunata täiendavaid tooteid ning nendele täiendavatele toodetele projekteerida rakised ise. Üheks selliseks on tootegrupp „Flants“. Flantside robotiga keevitamise rakis on lõputöö kolmandaks ülesandeks.

Neljanda ülesandena on investeeringu tasuvuse tagamiseks valitud roboti kasutuselevõtmise majanduslik analüüs.

1. AS E-PROFIIL

AS E-Profiil on Eesti erakapitalil põhinev ettevõte, mis asutati 1997 aastal. Tänapäevaks on AS E-Profiilist kujunenud mitmeaastase kogemusega nafta- ja gaasitööstusele suuri ja tehnoloogiliselt keerulisi seadmeid ja metallkonstruktsioone valmistav ettevõte. Nimetatud valdkonnale on firma olnud spetsialiseerunud juba ligi kümme aastat.

AS E-Profiil peab väga oluliseks ettevõttesisesid teadmisi-oskusi-kogemusi, ning seetõttu suhtub soosivalt töötajate tehnikaalase kõrghariduse omandamisse ja võimaldab tudengitele praktikakohti.

Ettevõtet kirjeldab hästi selle missioon: AS E-Profiil missiooniks on olla usaldusväärseim *offshore*- ja energeetikasektori masinaehitusettevõte, mille edu põhineb pakutava teenuse kvaliteedil, töötajate kompetentsil ja kõrgel ettevõtluse kultuuril.

Tegevusalale iseloomulikult on ettevõtte tootmispind ja –sisseseade märkimisväärt. Tootmistegevustegevus toimub Tallinnas asuvas, Eesti ühes suurimas, tootmistsehhis tootmispinnaga 13 000 m². Tõstevõime maksimum 160 tonni / sildkraanade 5x 80/20t; 2 × 30/5t; 1x5t ja tsehhi kõrgus kraananooleni 25m võimaldab toota väga suuregabariidilisi metallkonstruktsioone.

Lisaks avati 2013. aasta novembris Paldiskis 1 200 m² montaažitööde tehas.

Eesmärgid, mille poole AS-E-Profiil kindlalt liigub on toodud välja ettevõtte visioonis: AS E-Profiili visiooniks on saada maailmas *offshore*- ja energeetika sektoris eelistatud kvaliteetset teenust pakkuvaks masinaehitusettevõtteks, mille konkurentsieeliseks on täpne tarne, paindlik hinnakujundus ja kaasaegne tootmisviis.

2. TOOTED

2.1. Toodete sobivus robotkeevituseks

Robotkeevituse kasuks otsustamisel tuleb analüüsida keevitavaid tooteid järgmistest aspektidest:

- 1) kaareaaja ja abiaegade suhe;
- 2) õmbluste maht ning üksikute õmbluste arv;
- 3) koostu gabariidid ja mass;
- 4) sõlmede keerukused.

Kaareaaja ja abiaegade suhe: ehkki ka keevitusroboti tootlikkus (ladestatud lisamaterjali mass tunnis e. pealesulatustegur, kg/h) on märkimisväärselt suurem käsikeevitusest, on võrreldes kästikeevitusega ajaliselt suurim erinevus liikumiskiirus. Robotkeevituseks seega sobivad kõige paremini koostud, millede keevitamise töömahukus seisneb enam keevisõmbluste hulgas ja vähem üksiku keevisõmbluse mahus [1]. Sellest tulenevalt sõltub võimalik kokkuhoid ka sammudest, mida juba on tehtud efektiivsuse tõstmiseks – keevitusrakised, väikemehaaniseerimine. Mitmete keevisliidete puhul on deformatsioonide vähendamiseks vajalik liite keevitamine vaheldumisi erinevatelt pooltelt, mis praegu eeldab koostu pööramist sild- või konsoolkraana abil. Robotkeevituse korral on see tänu positsioneerimisele ja roboti PLC juhtimisele automaatne ning toimub väga kiiresti.

Üksikute õmbluste maht: keevitusroboti tootlikkus on liitetüübist olenevalt võrreldes käsikeevitusega kuni kuus korda suurem kui AS E-profilis keevitatavate kõige mahukamate õmbluste keevitamine on võimalik SAW-protsessi rakendades, mille tootlikkus sobivates tingimustes on kaks kuni kolm korda suurem kui keevitusrobotil [2].

Koostu gabariitmõõtmed ja mass: põhinedes robotlahenduse tarnijate pakkumistele kasvabmeile huvipakkuvate suuregabariidiliste konstruktsioonide keevitamiseks sobivate robot-positsioneerimise koosluste hindhüppeliselt kuisuurenevad keevitatava koostu mõõtmed ja mass.

Sõlmede keerukus: toodete aga ka keevitusroboti valikul peab arvestama seda, millises ulatuses on koostu keevitamine robotil võimalik. See sõltub peamiselt roboti ligipääsetavusest õmblusele, mis võib olla piiratud või võimatu. Osaliselt sõltub see roboti käe konstruktsioonikeerukusest. Kuna roboti keerukusest sõltub otseselt ka roboti hind, siis, eriti väikeste tooteseeriade korral, on mõnede õmbluste keevitamine osaliselt või täielikult käsitsi kuluefektiivsem, kui investeerimine kallimasse robotisse. Alati on vajalik õmbluste mõningane töötlemine ja puhastamine käsitsi. Nendele toimingutele kuluv aeg sõltub peamiselt alustus- ja lõpetuskohtadest, st. katkestuste arvust õmbluse keevitamisel.

2.2. Robotkeevituseks valitud tooted

Neli robotkeevituseks valitud toodet viiestkuuluvad nn. „KIPS”tooteperekonda. Need tooted kannavad järgnevaid nimetusi:1) „Front sheave house”; 2) „Dual idler sheave house”; 3) „Idler sheave house”;4) „Korpus”.

„KIPS”-tooteperekond kujutab endast peamiselt tõsteoperatsioonideks ja süvapuurimiseks kasutatavate seadmete kaldekompensaatorite süsteemi komponente, mille ülesandeks on stabiliseerida tõste- või puurseadmeid laevadel või mobiilsetel naftapuurtornidel kompenseerides lainetuse põhjustatud õõtsumist.

Toode „Korpus” on hüdrauliliselt käitatava vintsi korpus, tooted „Front sheave house”, „Dual idler sheave house” ja „Idler sheave house” on tõstetroppidesuunajate korpused.

Viiendana plaanitakse automatiseeritult keevitada tootegrupp „Flants”, mis on merekraanade hüdrocilindrite kinnituskonstruktsioonid.

Järgnevates alapeatükkides on seledel kujutatud toode ning põkkõmbluse eskiis. Tabelis 1 on antud olemasolevate tellimustega garanteeritud tükiarvud.

Tabel 1

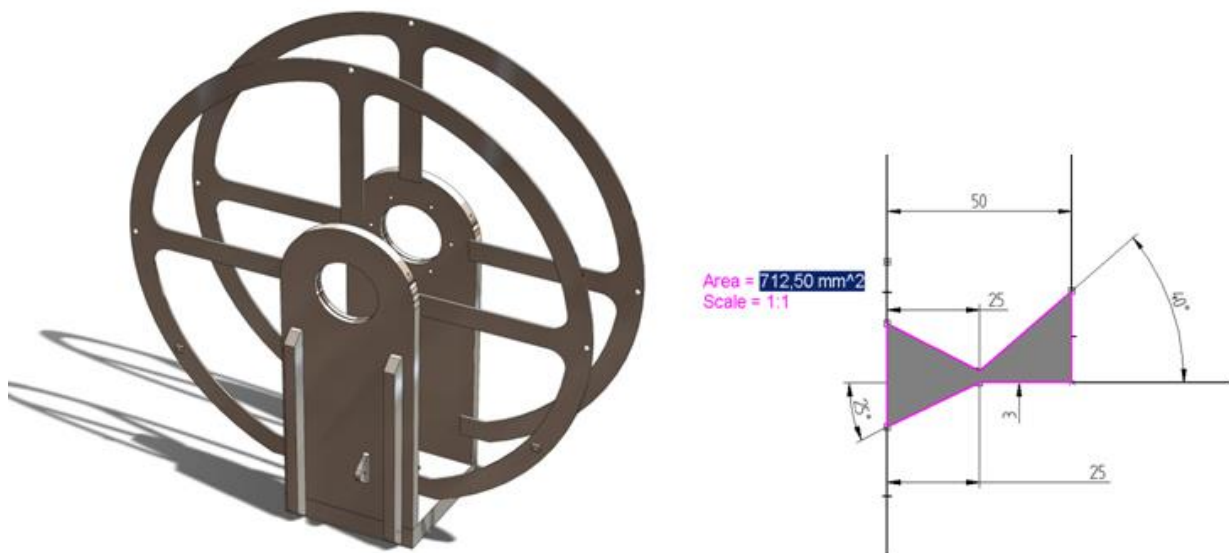
Toodete tükiarvud	
Toote nimetus	Tükiarv, tk/a
„Front sheave house”	400
„Dual idler sheave house”	200
„Idler sheave house”	400
„Korpus”	200
„Flants”	72

2.2.1. Toode „Front sheave house”

Toote „Front sheave house” keevisõmbluste maht jaotub üsna ühtlaselt pökkõmbluste ja nurkõmbluste vahel. Toode sobib gabariitmõõtmete ja keevisõmbluste mahu tõttu robotkeevituseks väga hästi. Antud hetkel toimub toote keevitamine käsitsi ning koostamine rakisteta.

Nurkõmblustel esineb sagedasti keevise ebapiisavat või liigset kõrgust, millede korral esimese parandamine, st. lisaläbimite keevitamine, on märkimisväärne lisakulu, teisel juhul väljendub kulu keevitamisele kulunud kuid selleks mitte ette nähtud ajas ja lisamaterjalide kasutamises.

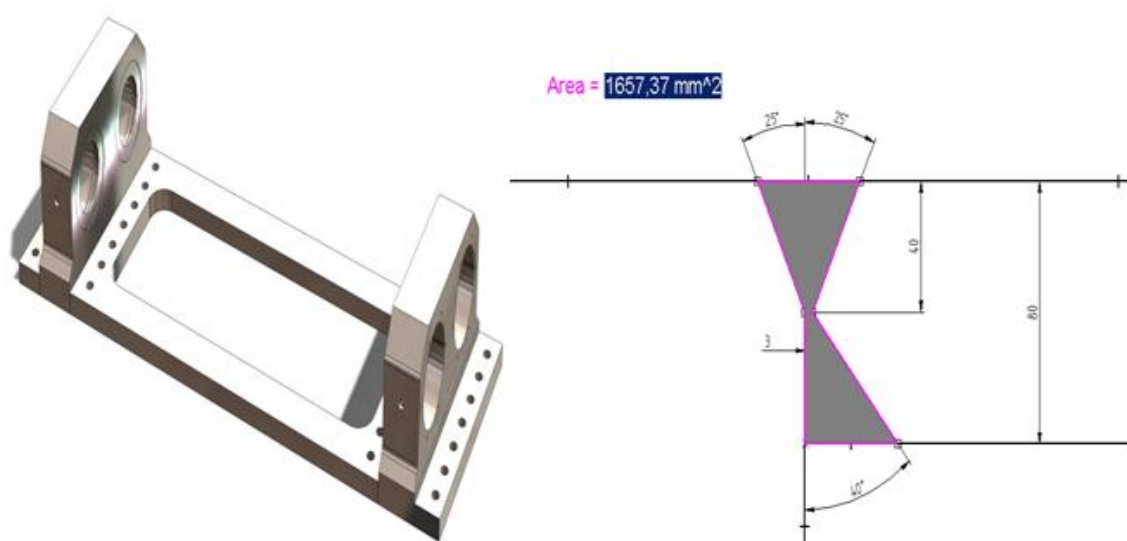
Pökkõmbluste keevitamisel tuleb toodet deformatsioonide vältimiseks mitu korda ringi keerata. Robotkeevitamisel toimub keeramine positsioneerimise abil.



Sele 1. Toode "Front sheave house"

2.2.2. Toode „Dual idler sheave house”

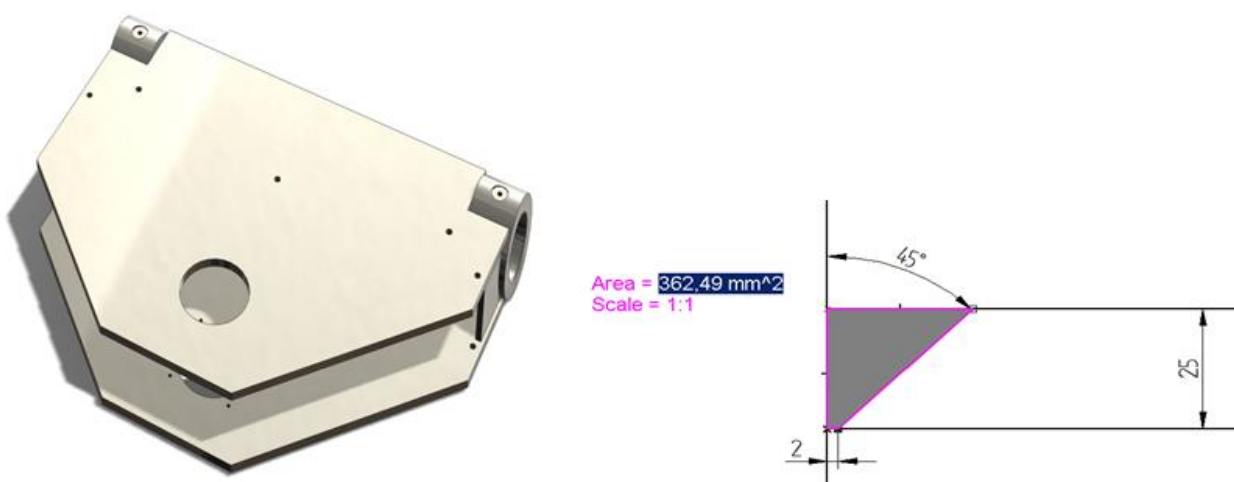
Toote „Dual idler sheave house” keevitamine on valitud toodetest kõige töömahukam. Keevitatav materjal on paksusega 80mm ning praegu toimub keevitamine käsitsi. Lisaks keevitajate kõrgele kvalifikatsioonile on oluline hoolikas puhastamine läbimite, eriti aga juurelâbimite vahel, kuna võimalike defektide parandamine on väga töömahukas. Nagu ka toote „front sheave house” puhul, on selle toote keevitamisel suurte deformatsioonide vältimiseks konstruktsiooni ajakulukas korduv keeramine kraana abil. Robotkeevitusega toimub selline keeramine positsioneerimise abil, mis vähendab ajakulu mitmekordselt.



Sele 2. Toode "Dual sheave house"

2.2.3. Toode „Idler sheave house”

Toote „Idler sheave house” kõikide keevisõmbuste keevitamine toimub praegu käsitsi. Põkkõmbuste ligipääsetavus vastaspoolelt ning nurkõmbuste ligipääsetavus konstruktsiooni sees on käsikeevitusel raskendatud ning seetõttu on seesmiste õmbuste keevitamine äärmiselt ebamugav ning ajamahukas. Ehkki põkkõmbused on keevitusprotseduuri järgi ühepoolsed (väljast keevitatud) $\frac{1}{2}$ V faasikonfiguratsiooniga, siis praktika on näidanud, et juure poolelt vastu keevitamine on olenevalt keevitaja oskustest vahel vajalik. Samuti kulub märkimisväärne aeg seesmiste nurkõmbuste defektide parandamiseks, mis on põhjustatud ebasoodsast keevitusasendist. Selle toote puhul on keevitusroboti ligipääsetavus õmblustele parem.

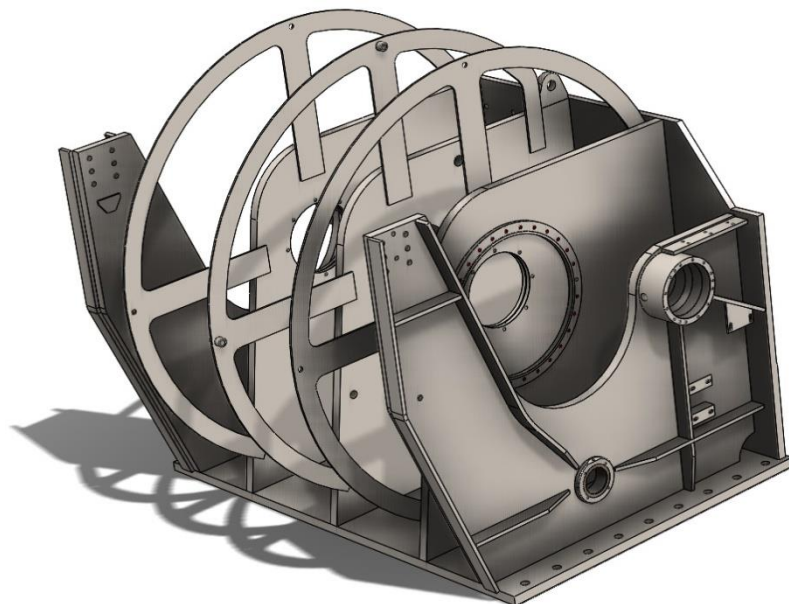


Sele 3. Toode "Idler sheave house"

2.2.4. Toode „Korpus”

Toote „Korpus” keevitamine on osaliselt juba automatiseeritud. Kõige töömahukamate õmbluste, nn. vaheseinte (materjalipaksus 50mm), keevitamine toimub käsitsi juhitalval positsioneeril. Keevitusprotsess SAW e. kaarkeevitus pulberräbusti all on lahendatud gantry-roboti abil. Et õmblused on suhteliselt pikad, sirgjoonelised ja ühetaolised, siis on sellise poolautomatiseeritud lahenduse kasutamine täielikult õigustatud.

Toote tugevdusribide, hüdroajami kinnituskonstruktsioonide ja muude konstruktsioonelementide keevitamine toimub käsitsi ning on ajamahukas. See on tingitud suurest õmbluste arvust, mis tähendab suurt ajakulu keevitaja liikumisel järgmisele õmblusele. Seetõttu saab selle toote puhul eriti hästi ära kasutada keevitusroboti suurt abiliikumiste kiirust ning eelmise toote puhul mainitud võimalust keevitada pikemaid või suurem arv õmblusi katkestusteta. Antud toote koostamine eeldaks keerulist ja kallist rakist, mistõttu on plaanitud toote „Korpus” koostamine ja eelkeevitus ka edaspidi käsitsi. Toote „Korpus” keevitamine ei ole gabariitide tõttu võimalik keevitusroboti positsioneeril ja suurema kandevõimega positsioneerihankimine ei oleks ühe toote keevitamiseks majanduslikult põhjendatud. Seetõttu on just selle toote keevitamisel eriti oluline robotlahenduse paindlikkus, mis võimaldaks keevitada ka suuremagabariidilisi tooteid. Antud juhul on valitud keevitusrobotiga võimalik toote „Korpus” keevitamine eraldi töökohal.



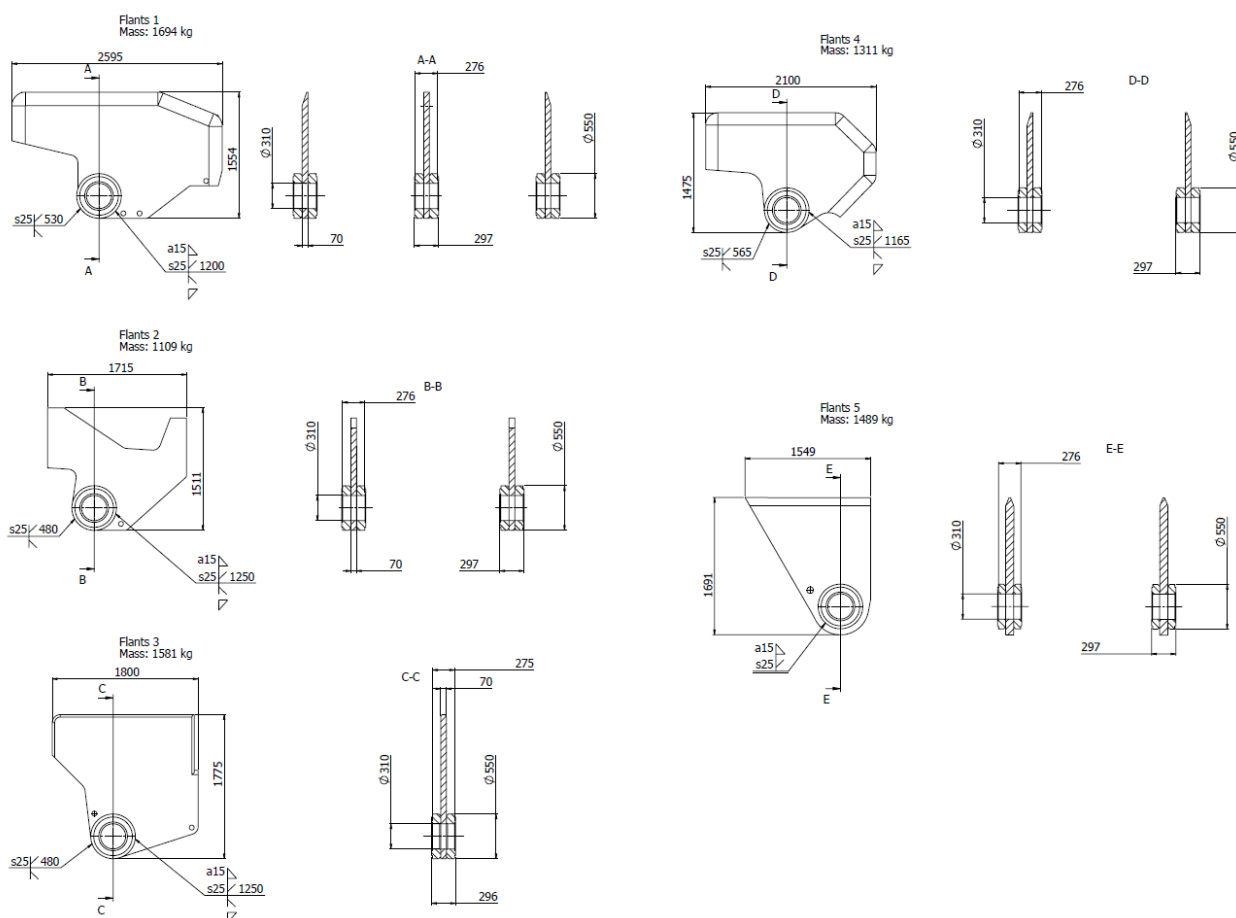
Sele 4. Toode "Korpus"

2.2.5. Tootegrupp „Flants”

Tootegrupp „Flants” keevisõmblused (osaline läbikeevitus ning lisatugevduseks nurkõmblus) on tooteti väga sarnased, kuid toote kuju ja gabariitmõõtmed on erinevad, olenevalt kraana tüübist, mille alamkoost flants on. Kuna kõik selle tootegrupi tooted võiksid olla keevitavad sama rakise abil, siis seavad muutuvad gabariidid kõrged nõudmised rakise paindlikkusele.



Sele 5. Toode "Flants"



Sele 6. Tootegrupp "Flantsid"

3. ROBOTLAHENDUSE VALIK

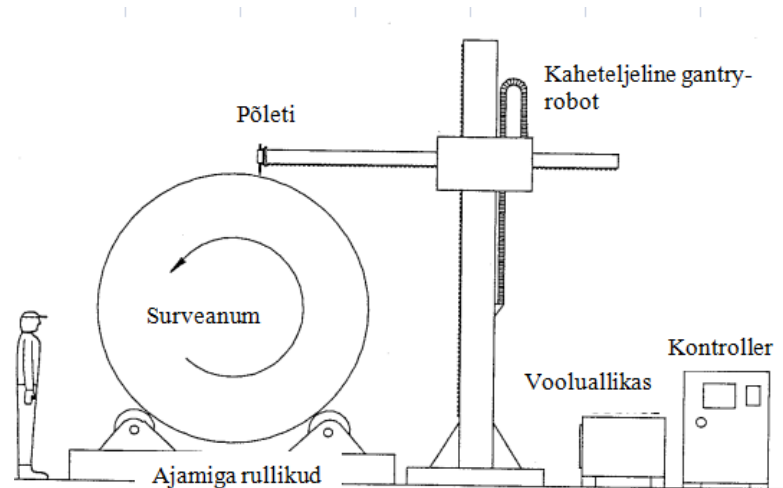
3.1. Keevitusprotsesside automatiseerimine

Keevitusprotsessi automatiseerimise võib lihtsustatult jaotada kaheks tasemeks: poolautomatiseerimine ehk jäik automatiseerimine ja täisautomatiseerimine ehk paindlik automatiseerimine [1]

Poolautomatiseerimise korral koosneb süsteem tavaliselt järgnevatest elementidest [1]:

- 1) Lihtne mehhanism koostu liigutamiseks - näiteks kaheteljeline positsioneer või pöörlevad rullikud torude või anumate pööramiseks. AS E-Profiilis on edukalt kasutusel kombinatsioon positsioneeril ümber oma telje pöörlevast detailist ja harilikust MIG/MAG-keevitusseadmest, mille põleti on fikseeritud reguleeritavale jalale (väikemehhaniseerimine);
- 2) Esimese asemel või lisaks sellele on laialt kasutusel erinevad mehhanismid põleti liigutamiseks. Laialt on kasutusel erinevad SAW-keevituse (räbustikeevitus) lahendused, näiteks kahe või kolme lineaarse teljega nn. Gantry-robot;
- 3) Keevitusseadmed, juhtseadmed – poolautomatiseerimine enamlevinud SAW-keevitusprotsessi puhul, kuid seda on võimalik rakendada ka tavalisi GMAW keevitusseadmeid kasutades. Mõlemal juhul võib tulemuseks olla väga hea kvaliteediga keevisõmblused, räbustikeevituse korral ka väga kõrge tootlikkus (kuni 20kg/h) [3].

Selel 7 on näidatud tüüpiline poolautomatiseeritud lahendus surveanuma keevitamiseks, mis koosneb ajamiga rullikutest ning kaheteljelisest Gantry-robotist.

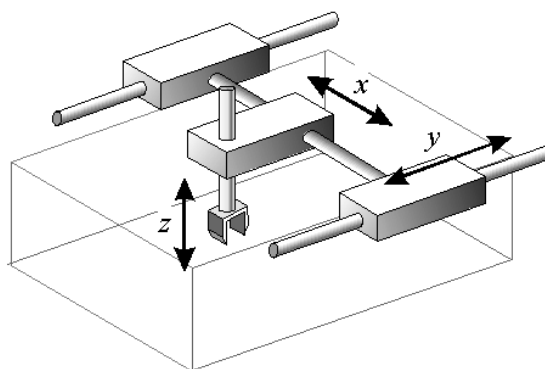


Sele 7. Levinud poolautomatiseeritud keevituslahendus [1]

Poolautomatiseerimise ehk jäiga automatiseerimise puuduseks, nagu nimetusestki järeldub, on süsteemi vähene paindlikkus, mis ei võimalda keerukama geomeetriaga sõlmede keevitamist.

Ehkki väga tootlik ning väga kvaliteetset keevist võimaldav, on sellised lahendused rakendatavad vaid ühetaoliste ja väga töömahukate (suured materjalipaksused ja/või tükiarvud) toodete korral, näiteks väga pikad pötkõmblused, paksuseinalised torud või flants-tüüpi tooted. Poolautomatiseerimine on oluliselt odavam täisautomatiseerimisest kuid sellest hoolimata õigustab see ennast vaid suurte tootmismahude puhul.

Ehkki keevitusroboti mõistet kasutatakse laialdaselt ka näiteks eelpool nimetatud kolme lineaarse teljega portaalsüsteemide kohta (vabadusastmed näidatud selel7), siis käesolevas töös keskendume vähemalt kuue pöörleva teljega (sele 8) robotitele (telgi numereeritakse kasvavalt tööriista e. randmetelje poole).



Sele 8. Kolmeteljelise karteesiaroboti vabadusastmed [4]

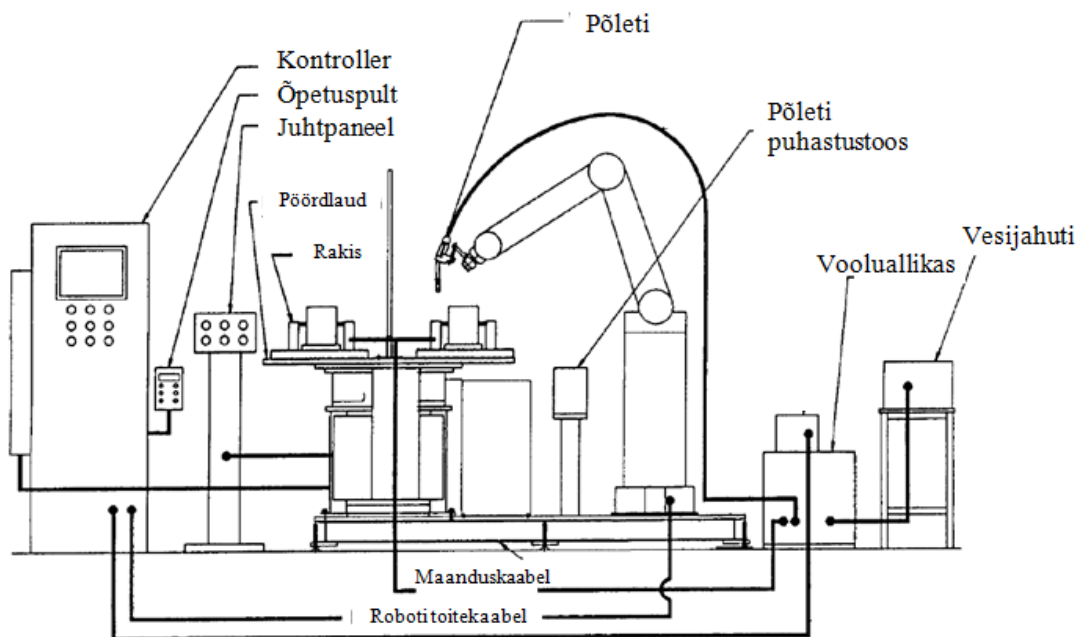


Sele 9. Liigendatud tööstusroboti vabadusastmed [4]

Täisautomatiseerimise keskmeks on robotirakk, mis koosneb harilikult järgnevatest komponentidest:

- 1) Tööstusrobot: tänapäeval on keevitusrobotite seas enimlevinud kuue- või seitsmeteljelised liigestatud robotid;
- 2) Positsioneer – harilikult kaheteljeline pöörd-kald või orbitaaltüüpi, kuid kasutusel on ka muid lahendusi. Positsioneeritüüp sõltub keevitatava koostu gabariitidest;
- 3) Digitaalsed juhtseadmed (kontroller);
- 4) Keevitusseade või seadmed – vooluallikas, etteandemehanismid;
- 5) Programmeerimisseadmed, nn õpetamispult ja tarkvara.

Tüüpilise robotiraku eskiis on esitatud seel 10.



Sele 10. Tüüpiline keevitusroboti lahendus [3]

Kaarkeevitusprotsessitäisautomatiseerimiseks on roboteid kasutatud laiemalt 1990ndate algusest, kuid sellise protsessi juurutamine on endiselt seotud mitmete probleemidega. Paradoksaalselt on mitmed probleemid seotud just robotitehnoloogia arengu ja sellega paindlikkuse suurenemisega, st. tekkinud võimalusega kasutada keevitusroboteid väikesaritootmise korral. Suursaritootmises on vajadus keevitusprotsessi automatiseerimise järele ilmne, sobiva lahenduse leidmine, mis seejuures ei pruugigi olla robot ja investeeringu õigustamine lihtsam, ning investeering on tihti väiksem.

Väikesaritootmise korral on tasuvaima automatiseerimise lahenduse leidmine seotud rohkemate nüanssidega ning eeldab sügavamat toodete analüüsi. Keevitusroboti korral on paratamatu, et ka efektiivsus (siinkohal on silmas peetud roboti kõikide võimaluste maksimaalset ära kasutamist) on abiaegade suurema osakaalu tõttu, võrreldes suursaritootmisega, väiksem. Abiaegu võib olla võimalik vähendada, kuid see võib kaasa tuua märkimisväärsed kulutused rakistele ja/või vajaduse keerukama ja seetõttu ka kallima positsioneerimise või roboti järele, mistõttu võib majanduslik otstarbekkus olla küsitav.

Paljudel juhtudel ilmnebki, et täisautomatiseerimine ei ole mõistlik ning otstarbekam on rakendada poolautomatiseerimist või optimeerida käsikeevitust läbi töökorralduse optimeerimise, kulutuste vähendamise praagile läbi kvaliteedi tõstmise jms. Mitmetes ettevõtetes tõstaksid ka ainult sellised üsna lihtsad tegevused tootlikkust oluliselt.

3.2. Keevitusroboti juurutamise töökäik

Keevituse täisautomatiseerimine peab toimuma läbimõeldult ja range töökäigu alusel. AS E-Profiilis on töökäik jagatud järgmisteks omavahel seotud punktideks:

- 1) Meeskonna loomine ja eesmärgi püstitus;
- 2) AS E-profiili toodete robotkeevituseks sobivuse analüüs, mis kätkeb endas robotkeevituse võimaluste selgitamist ja sellele vastavalt robotkeevituseks sobivate toodete valimint ettevõtte tootenomenklatuurist;
- 3) Lähteülesande püstitamine tarnijatele ja esialgse hinnapäringu esitamine tarnijatele;
- 4) Katsekeeviste läbiviimine ning nende kvaliteedile vastavuse analüüs;
- 5) Hinnapakkumiste, kvaliteedianalüüsi ja toodete sobivuse hindamise põhjal majandusliku tasuvuse arvutuste läbiviimine ja riskianalüüs;
- 6) Tootmispindade planeerimine;
- 7) Täiendavate toodete rakiste projekteerimine;
- 8) Täpsustatud päringu tegemine tõenäolisematele tarnijatele;
- 9) Robotlahenduse valik ja lepingu sõlmimine tarnijaga;
- 10) Tulevaste operaatorite koolitusprogrammi;
- 11) Robotiraku tarne, paigaldus ja FAT-test;
- 12) Tootmise alustamine keevitusrobotil vähendatud koormusega;
- 13) Tootmise alustamine keevitusrobotil täiskoormusega.

3.3. SWOT-analüüs

Tabel 2

SWOT-analüüs	
TUGEVUSED Keevitusaegade vähenemine Stabiilne kvaliteet Kulude kokkuvõid Täpsem tarneaegadest kinnipidamine	NÕRKUSED Vähese kogemuse robotiseerimise vallas Kvalifitseeritud robotioperaatorite puudumine Tootmispindade piiratus
VÕIMALUSED Tellimuste kasv olemasolevatelt klientidelt Uute klientide leidmine Sisenemine uutesse sektoritesse (nt. tuuleenergia) Tootmismahu kasvatamine ressurside vabanemise arvelt	OHUD Põhimahu sõltumine ühest tellijast Vähestest kogemustest tingitud ootamatud tõrked

Robotkeevituse eelised käsikeevituse ees on suurem tootlikkus (11kg/h)[2] ning kiirem liikumine õmbluste vahel (3m/s) [2]. Kui programmeerimine on tehtud oskulikult ning keskkonnatingimused vastavad nõuetele, siis on tagatud kõrgem ja stabiilsem kvaliteet. Inimfaktori vähendamisega kaasneb parem tootmise jälgitavus. Samatüübiliste toodete ühesugused tsükliajad ja praagi parandamisele kuluva aja vähendamine võimaldab kokkuvõttes pidada paremini kinni kliendile lubatud tarneaegadest, mis tõstab ettevõtte usaldusväärsust kliendi silmis.

Eelpool nimetatud punktid võimaldavad leida uusi kliente, kelle jaoks on eriti olulised kõrge kvaliteet ja täpne tarne. Samuti vabaneb märkimisväärne ressurss tootmismahu kasvatamiseks ka olemasolevate klientide tellimuste hulga suurenemise arvelt.

Robotkeevituse juurutamine AS E-Profiilis on seotud mitmete probleemidega, mille lahendamine on väljakutseks keevitusinseneridele, tootmise planeerijatele ning konstruktoritele. Olulist rolli mitmete probleemide tekkimisel mängib praktiliste kogemuste puudumine sellise mastaapsusega automatiseerimisprojekti elluviimisel. See tähendab ulatuslikku „kodutööd” keevitusrobotite võimaluste ja puuduste vallas, kuid ühena esimestest kerkib kohe esile ka personali küsimus. Keevitusroboti opereerimine erineb oluliselt praegu kasutusel olevatest poolautomatiseeritud süsteemide opereerimisest.

Et roboti juurutamine ja majanduslikud arvutused põhinevad peamiselt ühel tooteperekonna keevitamise automatiseerimisel, siis, ehkki tellimuste maht on paariks järgmiseks aastaks garanteeritud, siis sellest hoolimata on oluline juba robotlahenduse juurutamisel analüüsida muude toodete keevitamise võimalikkust ja otstarbekkust automatiseeritult.

3.3.1. Personaliküsimus

Et investering ennast esimesest võimalikust hetkest tagasi teenima hakkaks, vajab AS E-Profiil planeeritud tootmise alguse tähtjaks vähemalt kolme kvalifitseeritud robotioperaatorit. Kogemustega personali puudumine võib kujuneda keevitusroboti juurutamisel äärmiselt tõsiseks probleemiks, mistõttu on seda ka siin eraldi käsitletud.

Keevitusroboti käitamine erineb mitmeti suursaritootmises kasutatavate koostamis- ja transpordirobotite käitamisest, kuna eeldab lisaks põhiteadmiste automaatikast teadmisi keevitusprotsessidest.

Keevitusroboti operaatori tööülesanneteks on koostamine (võib olla ka lahendatud eraldi töökohal koostamisega koostaja poolt), koostatud konstruktsiooni paigaldamine positsioneerile, programmi valik, tsükli käivitamine ja jälgimine tsükli kestel ning keevitatud konstruktsiooni eemaldamine rakisest. Ohutuks käitamiseks peab robotioperaator olema lähedalt tuttav nii keevitusroboti elektrooniliste juhtseadmetega, kui ka mehaanikaga. Robotioperaator peab suutma ära tunda hälbeid roboti töös ning tõrke korral selle võimalikuks kiireks kõrvaldamiseks olema võimeline teenindavale personalile seda kirjeldada. Sama puudutab keevitusprotsessi puudutavaid hälbeid (ebakvaliteetne keevis) ja koostööd insener-tehnilise-personaliga. Et robotioperaator on robotiga kõige vahetumalt seotud inimene, siis koolituse tähtsust ei tohi alahinnata.

Tõenäoliselt kergemini lahendatav personaliküsimus on kvalifitseeritud programmeerijate puudumine. Roboti programmeerimine on võimalik nii keevitusrobotil, kui ka vastava tarkvara abil arvutiga. Keevitusrobotite tarkvara on tavaliselt tootjapõhine, see tähendab, et üldlevinud programmeerimiskeel puudub. Programmeerija väljaõpe, nagu ka robotioperaatori, toimub tarnija poolt.

Kolmandaks peab keevitusinsener ennast viima kurssi spetsiifiliste tehniliste nüanssidega, et koostada robotkeevituse jaoks sobivad protseduurid, kuna robotkeevituse parameetrid erinevad käsikeevituse omadest.

3.4. Pakutud robotlahenduste võrdlus

Keevitusroboti süsteemi iseloomustavad järgmised tehnilised põhinäitajad:

- 1) Roboti telgede arv ja tööulatus;
- 2) Roboti telgede liikumisulatus;
- 3) Roboti kandejõud viimasel, nõ. randmeteljel;
- 4) Paigaldusasend;
- 5) Positsioneeritüüp ja telgede arv;
- 6) Positsioneeritüüp ja kandejõud ja maksimaalsed gabariidid;
- 7) Keevitusseadmete parameetrid;
- 8) Juhtelektroonika ja tarkvara, sh programmeerimis- ja simulatsioonitarkvara;
- 9) Lisaseadmete valik.

Keevitusroboti telgede arv ja nende liikumisulatus ning paigaldusasend mõjutavad keerukamatele õmblustele ligipääsetavust. Enim kasutatakse kuueteljelisi keevitusroboteid, kuid levinud on ka seitsme ja kaheksateljelised robotid.

Paigaldus (siin pööranda- või rippasend) mängib lisaks roboti lülide pikkusele rolli tööulatuse määramisel. Paigaldus rippasendisse võimaldab tööulatust efektiivsemalt ära kasutada, kuna ei teki ligipääsmatut tsooni roboti ümber. Robot on võimalik paigaldada töölauda või positsioneeritüüp kohale, mis võimaldab pääseda ligi enamatele õmblustele vähema positsioneerimisega. Konstruktsiooni jäikus seab aga piirangud roboti massile.

Roboti kandejõud randmeteljel määrab tööriista maksimaalse massi. Et keevitusrobotil on tööriistaks tavaliselt suhteliselt kerge keevituspõlet, siis suurem kandejõud ei ole tingimata pooltargum, kuna sellega kaasneb roboti suurem mass.

Positsioneeritüüp kasutamine võimaldab kasutada võimalikult efektiivselt ära keevitusroboti tööulatust ning võimaldab keevitada suurimat tootlikkust ja parimat kvaliteeti soodustavates asendites. Enimlevinud on kahe pöördteeliga elektriliselt käitatavad kald/pöörd või orbitaalpositsioneerid. Eelistatud on orbitaalpositsioneerid, kuna võrreldes kald/pöörd-positsioneeriga muutub sellel keevitatava konstruktsiooni raskuskese pöörates vähem, mis vähendab roboti abiliikumisi ning ohtu,

et keevitav koht liigub roboti tööulatusest välja [1]. Positsioneeril valik sõltub keevitatava konstruktsiooni gabariitmõõtmetest ja massist, kuid peab arvestama, et positsioneeril hind kasvab kandejõu suurenedes hüppeliselt.

Robotilahenduste pakkujad kasutavad oma keevitusrobotitel tuntud keevitusseadmete tootjate seadmeid. Keevitusseadmete grupi moodustavad vooluallikad, traadi või traatide etteandemehhanism ning keevituspõleti. Üha enam kasutatakse traadi etteandmisel nõ. tandemmehhanismi, mis tähendab, et võimalik on keevitada samaaegselt kahe traadiga. See suurendab tootlikkust oluliselt, kuid praktikas sõltub selle kasutamise võimalus keevisliite tüübist ja keevitusasendist. Soodsama ja kiirema tehnilise toe tõttu hoolduse või tõrgete korral on eelistatud Eestis kõige paremini esindatud tootjate keevitusseadmed. Maksimaalne keevitusvool erinevatel koormustsüklitel on eriti oluline väga pikkade õmbluste ja suurte materjalipaksuste korral.

Juhtelektroonika abil toimub roboti juhtimine vastavalt programmile ning positsioneeril ja/või teiste abiseadmete juhtimine sünkroonis robotiga. Maksimaalne juhitavate telgede arv on parameeter, mis tähendab maksimaalset ühe seadmega robotrakus juhitavate roboti ja lisaseadmete telgede arvu. Roboti programmeerimise juures on tähtis, et see toimuks võimalikult intuitiivselt ja oleks teostatav ka siis, kui robot on töös (nõ. *offline*-õpetamine) ning, et tarkvara võimaldaks maksimaalselt täpselt simuleerida tegelikku töötsüklit.

Lisaseadmeteks võivad olla erinevad robotile kinnitatavad tööriistad, näiteks eelkuumutuspõleti, lasermõõtmise põhimõttel toimiv liite/faasi jälgimisseade või suue keevitusgaaside ärajuhtimiseks. Roboti paindlikkust ja tööulatust on võimalik suurendada rööbasraja abil, millel võib olla lisaks horisontaalteljele ka vertikaaltelg ning konsooltugi.

3.4.1. Pakkumiste analüüs

Tabelis 3 on välja toodud kahe pakkuja robotsüsteemide mõningad tehnilised andmed. Tehnilised andmed põhinevad tootjate tehnilistel spetsifikatsioonidel.

Tabel 3

Robotisüsteemi tehnilised parameetrid			
Robotitootja		IGM (Austria)	Motoman (USA/Jaapan)
Telgede arv, tk		7	6
Kandevõime „randmel”, kg		10	20
Paigaldusasend		Rippasend	Püstasend (põrand)
Horisontaalne tööraadius tööriistata, mm		4400	3100
Vertikaalne tööraadius, mm			
Telgede liikumisulatus, kraadi			
	1	+/-270	+/-180
	2	+86/-156	+135/-90
	3	+145/-135	+251/-160
	4	+185/-185	+/-190
	5	+126/-126	+230/-50
	6	-370/+370	+/-360
Keevitusroboti mass, kg		275	495
Positsioneeritootja		IGM (Austria)	Motoman (USA/Jaapan)
Tüüp		Orbitaal	Orbitaal
Telgede arv		3	3
Kandevõime, N		30000	30000
Maksimaalne tooriku läbimõõt, mm		3500	3800
Keevitusseadmete tootja		Fronius (Austria)	Lincoln Electric (USA)
Maksimaalne keevitusvool koormustsüklil 100%, A		740	700
Tandem-etteande võimalus		Jah	Jah
Kontrolleri juhitud maksimaalne telgede arv		Robot + 10 lisatelge	kokku 72
Off-line programmeerimine ja simulatsioon		Jah	Jah

Pakkumise analüüsil selgub, et mõlema tarnija pakkumised on üsna sarnased. See muudab otsuse langetamise keerulisemaks, kuid annab samas põhjuse nõuda tarnijalt lisateenuseid (sh. teadmiste-oskuste-kogemuste jagamist) ja –garantiisid parima lahenduse saamiseks väiksema investeringuga.

Pakkuja IGM roboti tööulatus on tänu rippasendile ja konsooltoele suurem ning esimese pöördtelje suurem liikumisulatus võimaldab keevitusrobotit kuluka rööbasrajata kasutada kahel töökohal, mis on esialgu oluline toote „korpus” keevitamisel, kuid pikemas perspektiivis ka muude suuremate

gabariitmõõtmetega toodete keevitamisel. Nii IGM kui Motoman, mida kasutab PEMA, robotid on olnud laialdaselt kasutusel aastakümneid, mistõttu ei ole põhjust kahelda kummagi töökindluses. Motoman'i robot on kaks korda suurema kandevõimega, kuid keevitusrobotile ei anna see eelist. Suurem kandevõime tuleneb sellest, et Motoman'i robot on projekteeritud universaalseks tööstusrobotiks, mida saab kasutada ka keevitamisel, IGM'i robot, seevastu, spetsiaalselt kaarkeevituseks. Suurema kandevõimega kaasneb roboti suurem mass, mis tähendab tänu massiivsemale konstruktsioonile mõnevõrra väiksemat ligipääsetavust keerulistele kohtadele. Samuti seab suurem mass jäikuse tagamisel piirangud paigaldusele konsooltoele, mis vähendab roboti tööulatust.

Nii IGM, kui PEMA pakuvad orbitaal-tüüpi positsioneer, nominaalse kandevõimega 30000 N. Põhimõttelist erinevust kummagi positsioneer vahel ei ole ning PEMA pakutav Motoman'i seadme 150mm võrra suurem raadius on marginaalne.

E-Profiilis on praegusel hetkel kasutusel tootja Fronius käsikeevitusseadmed ning tootja Lincoln Electric poolautomaatsed räbukeevitusseadmed. Mõlemad tootjad on Eestis hästi esindatud ning seetõttu hooldus ja remont garanteeritud ning heal tasemel. Fronius vooluallika suuremad maksimaalsed voolutugevused suurematel koormustsüklitel ei anna IGM pakkumisele praegu planeeritavate toodete keevitamisel eelist, kuid võivad olla eeliseks võimaliku tootmise ümberkorraldamise korral kui soovitakse olemasolevaid seadmeid kasutada näiteks massiivsete flants-tüüpi toodete keevitamisel.

Mõlemad tootjad võimaldavad tandem-tehnoloogia kasutamist, st keevitamist samaaegselt kahe traadi etteandega. Tandemsüsteem suurendab tootlikkust kuni 14 kilogrammini tunnis, kuid on kasutatav ainult soodsates keevitusasendites võimalikult sirgjooneliselt ning ei ole mõistlik õmbluste korral, mille pikkus on alla 500mm, kuna iga õmbluse esimesed 100mm vajavad hiljem käsitsi parandamist.

PEMA juhtelektroonika on orienteeritud laialdamisele tootmise automatiseerimisele ning võimaldab kuni 72 telje juhtimist. See võib hõlmata mitut robotit (nii keevitus- kui ka näiteks koostamisrobotid) ühel või mitmel töökohal, toorikute etteandmist, valmistoodangu ärajuhtimist jne. IGM rõhub konkreetsemalt keevituse automatiseerimisele ja pakub roboti (kuni 9 telge) ning kümne lisatelje (abiseadmed) sükroonset juhtimist.

Praegu planeeritav automatiseerimisprojekt näeb ette lisaks kuueteljelisele keevitusrobotile ette kaheteljelise positsioneer kasutamist ning lühikest rööbasrada paindlikkuse suurendamiseks teisel töökohal. Lisainvesteeringuna on tulevikus mõeldav ja isegi tõenäoline pika rööbasraja hankimine

suuremate konstruktsioonide, näiteks merekraanad, keevitamiseks või töökohtade lisamiseks. Telgede arv kümme on tulevikuperspektiive silmas pidades piisav, sellest suurem hulk ei anna suuregabariidiliste konstruktsioonide keevitamisel eelist.

Nii IGM kui PEMA võimaldavad roboti programmeerimist roboti töotsükli peatamata kuid võimaldavad ka juba positsioneeritud paigaldatud keevisliidete keevitamise programmeerimist mobiilse, kiirustundliku juhtkangiga seadme abil või olemasolevate programmide korrigeerimist. *Off-line* programmeerimine toimub sarnastel põhimõtetel ning töotsüklid on arvuti abil simuleeritavad. Oluline erinevus seisneb selles, et PEMA programmeerimistarkvara põhineb täielikult harilikul lauarvutil ning selle tavalistel sisendseadmetel klaviatuur ja arvutihhiir. IGM roboti programmeerimine, teisalt, toimub identse lisaseadme abil, nagu kasutatakse roboti manipuleerimiseks või *on-line* programmeerimiseks.

See võib esialgu programmeerimisaegu pikendada, kuid loob võimaluse keevitusoperaatorite koolitamiseks robotitsükli peatamata.

3.4.2. Kvaliteedi analüüs

Valdav osa E-profiili toodangust moodustavad teraskonstruktsioonid *offshore* sektorisse, mistõttu liigituvad keevisõmblused enamjaolt vastutusrikasteks. Kvaliteedi tagamiseks viiakse igale keevisõmblusele läbi kvaliteedikontroll.

Põkkõmblustele rakendatakse lisaks täielikule visuaalsele kontrollile (VT) tavaliselt kahekümne või sajaprotsendilist ultrahelikontrolli (UT) ning üldise nõudena on kõikide keevisõmbluste vastavus harilikult standardi ISO5817 keevitusklassidele B või C (ultraheli kontrolli puhul standardi ISO 11666 tasemed 2 või 3). Kontroll viiakse esmalt läbi kolmanda osapoolena toimiva NDT-teenust (mittepurustav kontroll) pakkuva kontrolliorgani poolt, seejärel kvalifitseerimisühingu (harilikult DNV või Loyds) ning kliendi poolt. Regulaarselt auditeeritakse nii E-Profiili juhtkonda, kvaliteediosakonda kui ka NDT-kontrolli teostavat ettevõtet.

Sellise mitmekordse kontrollimehhanismi tulemusel viiakse nõuetele mittevastava toote eksploatatsiooni sattumise ja sellega ebakvaliteetse keevisõmbluse tõttu ulatusliku materiaalse kahju tekkimise või inimelusid nõudva õnnetuse juhtumise tõenäosus miinimumini.

Mitteaktsepteeritavate defektide kõrvaldamisega kaasneb alati kulu, mis tõstab toote omahinda ja vähendab kasumimarginaali. Kui tegemist ei ole suuremahulise süstemaatilise veaga, siis on otsesest parandamisest õmbluse avamisele ja paranduskeevitamisele kaotatud ajast ja rahalisest kulust suuremgi kogu tootepartiid või ka hoopis teiste toodete tootmisprotsessi häirimisest tekkiv

kulu – töötluspingi tühiseis, tellijatele lubatud tarneaegadest mitte kinni pidamine, halvimal juhul trahvid jne.

Statistiliselt peetakse käsikeevitusel aktsepteeritavaks keskmiseks praagiprotsendiks umbes 2%[2].

Illustreerimaks praagi kulu keeviskonstruktsioone võib konkreetselt AS E-Profiili põhjal tuua näite: võttes aluseks hinnangulise aastas kulutatava traadi koguse 100 tonni ning arvutustes kasutatava käsikeevituse tootlikkuse 2 kg/h, kujuneb 2% praagiprotsendi korral praakõmbluste uuesti keevitamiseks kuluvaks ajaks 1000 tundi aastas. Arvesse peab võtma, et tegelikult sõltub praagi parandamisele kuluv aeg keevisõmbluse tüübist – nurkõmbluste defektide parandamine ei ole tavaliselt nii töömahukas, kuid visuaalse või magnetkontrolli käigus avastatud defektide protsent nurkõmblustes ei ole dokumenteeritud.

Teisalt kulub põkkõmbluste defektide parandamisele koos avamisega söeelektroodiga, liite uuesti ettevalmistamise ja puhastamise ning uuesti keevitamisele vähemalt kaks korda sama palju aega kui esialgsele sama pika lõigu keevitamisele.

Peamised defektide tekkepõhjused on puudulik keevitajate kvalifikatsioon (üle veerandi) ja keevitustingimused (sh. keevitusasend ja ligipääsetavus) ning ebatäpne koostamine või ettevalmistus (kumbki umbes 20%) [5].

E-Profiili praktikale tuginedes võib öelda, et tootmismahu kasv, kui sellega kaasneb uute keevitajate värbamine, toob tavaliselt kaasa olulise hüppe praagiprotsendis pikemaks või lühemaks ajaperioodiks.

Robotkeevitus vähendab või välistab keevitajate kvalifikatsiooni puudulikkusest või inimlikust hooletusest tingitud vigu ja võimaldab keevitamist kvaliteetset keevist soodustavates asendites, kuid seab kõrgemad nõudmised koostamistäpsusele ning vastutuse keevitusinseneridele ja robotioperaatoritele, kuna oskamatu programmeerimine või ebasobiv keevitusprotseduur võivad põhjustada ulatuslikke süstemaatilisi vigu.

Eriti kriitiline on koostamistäpsus ja korrektne keevitusprotseduur põkkõmbluste juurelábimi(te) keevitamisel nii käsikeevitusel kui ka robotkeevitusel. Kui käsikeevitusel suudab kogemustega keevitaja mõningaid puudusi korrigeerida, defektidele koheselt reageerida ning tõsise kõrvalkalde korral koheselt insener-tehnilist personali teavitada, siis robotkeevitusel võib halvimal juhul vea avastamise hetkeks olla terve partii defektseid liiteid valmis keevitatud.

3.4.3. Keevituskatsete läbiviimine ja analüüs

Ühena esimestest sammudest keevitusroboti juurutamisel AS E-Profiilis on võimalikele robotlahenduse tarnijatele seatud ülesandeks robotil keevitatud õmbluste kvaliteedinõutele vastavuse tõestamine. Selleks valmistati kahele tõsiseltvõetavamale pakkujale ette toorikud katsekeeviste tegemiseks.

Katsekeeviste tegemine toimus robotitarnijate asukohas, tarniti seejärel Eestisse ning kontrolliti ultrahelimeetodil, järgides samu protseduure ning kvaliteedinõudeid nagu hariliku tootmise korral.

PEMA ei soovinud garanteerida juurelābimi keevitamise võimalikkust robotil, mistõttu keevitati see käsitsi. Järgnevad läbimid on keevitatud robotil ühe traadiga, kuid ei ole põhjust arvata, et kahe traadiga keevitades oleks tulemus oluliselt teistsugune. Lābimitevahelist rānišlaki eemaldamist ei ole tehtud.

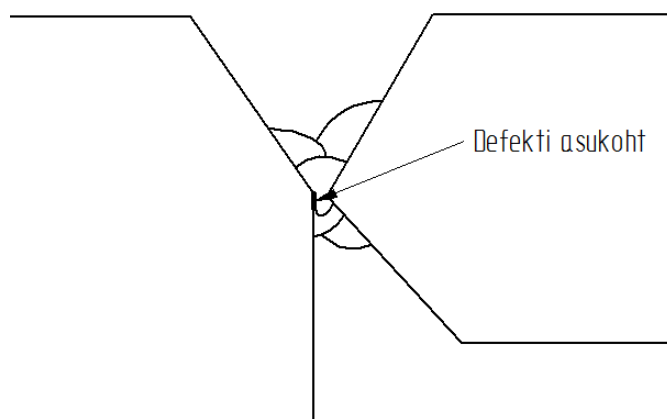
Kontrolli käigus tuvastati defektid mõlema katsekeevise juurelābimites. Vigade asukohast ning loomust võib järeldada, et need ei ole põhjustatud keevitusroboti poolt, vaid on tekkinud juure käsikeevitusel või juurelābimi puudulikkust puhastamisest enne järgnevate lābimite keevitamist robotil. JārgEVates lābimites defekte ei esinenud. Sellest võib järeldada, et esialgsetel kahtlustel, et mitte puhastamine lābimite vahel põhjustab defekte, ei ole alust.

Vajadus keevitada juur käsitsi muudab PEMA pakkumise vähem atraktiivseks, kuna pikendab keevitusaega.

IGM sooritas juurelābimite keevitamise robotil. Samuti nagu PEMA, ei tehtud järgnevate lābimite vahel mehaanilist puhastamist. Lisaks valmistas IGM osad keeviskatsed juure vastaspoole puhastamiseta, st õmblused keevitati robotil katkematu tsükлина. Juurelābimid keevitati ühe traadiga, järgnevad lābimid kahe traadiga (nn. tandemtehnikа).

Katsekeeviste analüüsi käigus leiti süstemaatilised defektid terves pikkuses nende õmbluste juurelābimitest, mida ei olnud mehaaniliselt puhastatud. Täpsemaks analüüsiks teostati purustav katsetamine, mille käigus lõigati keeviskatses lintsaega lõik ning keevisala poleeriti. See võimaldas visuaalsel vaatlusel veenduda, et tegemist on liiteveaga (sulamatus) juurelābimis. Selle põhjuseks on juure lābivalgumine, mis takistab faasimata pinnal järgnevate lābimite keevitamisel korralikku sulamist.

Õmblustest, millel mehaaniline puhastamine oli teostatud, leiti küll mõningaid veaindikatsioone, kuid õmblused vastavad standardites toodud kvaliteedinõuetele.



Sele 11. Tõenäoline defekti tekkekoht

Katsekeeviste analüüsist võib teha järgnevad järeldused:

- 1) Juurelābimi keevitamine robotil on võimalik, kuid X ja K faasikujude korral on juure vastaspoole mehaaniline puhastamine vältimatu;
- 2) Teiste lābimite vahel ei ole puhastamine vajalik, rānišlakk defekte ei põhjusta.

Tabel 4

Ultrahelikontrolli tulemused

Tarnija			Vastab nõuetele ISO 11666/2	
	Juurelābim	Vahelābimid	Juurelābim	Vahelābimid
PEMA	Kāsi keevitus puhastamisega	Robotkeevitus puhastamiseta	Ei	Jah
IGM	Robotkeevitus puhastamiseta	Robotkeevitus puhastamiseta	Ei	Jah
IGM	Robotkeevitus puhastamisega	Robotkeevitus puhastamiseta	Jah	Jah

Kuna rānišlakk defekte ei põhjusta, siis ühepoolse keevise puhul ei oleks mehaanilist lābimitevahelist puhastamist vaja, paraku suuremate materjalipaksuste keevitamine toimub pea alati kahelt poolt.

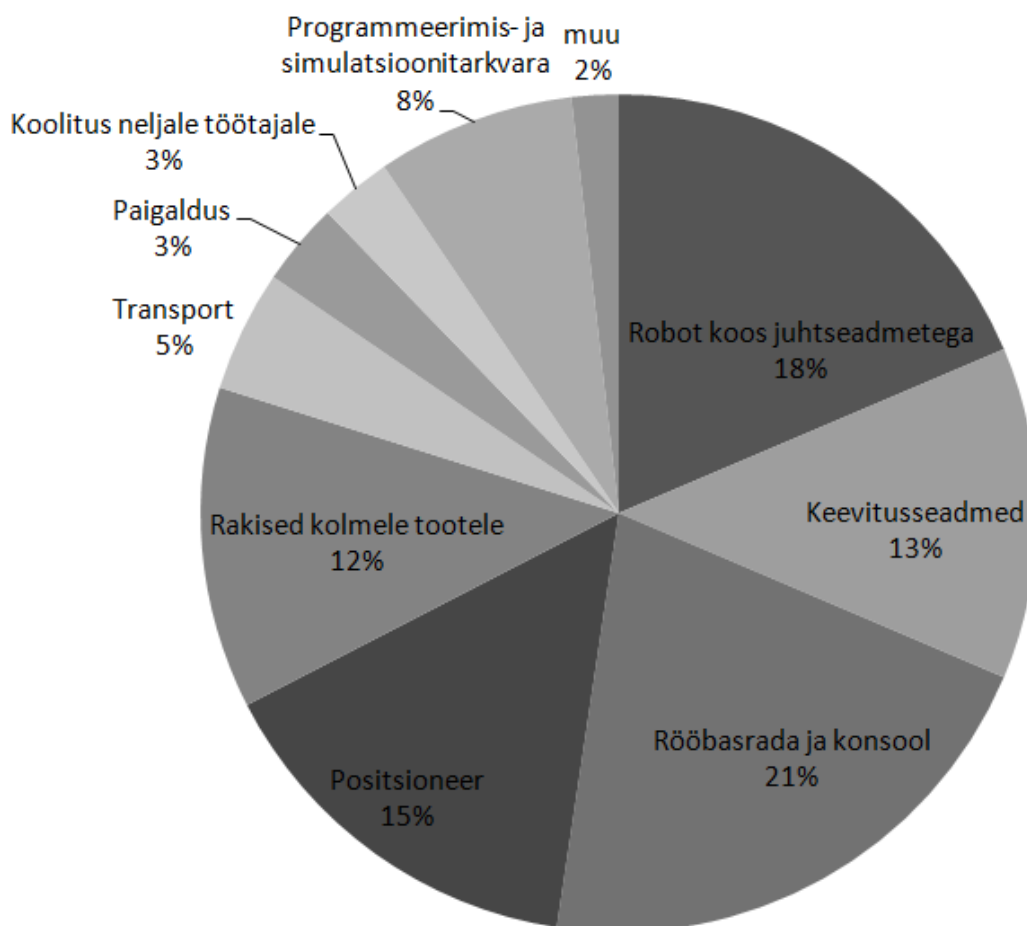
3.4.4. Robotlahenduse valik

Kahe väga sarnase pakkumise seast on välja valitud pakkuja IGM lahendus. Põhjuseks on eelkõige veidi suurem paindlikkus just AS E-Profiili oludes töötamisel. PEMA tööstusrobotil on eeliseid laiemal tootmise automatiseerimise, st suuremate ühesarnaste toodete tükiarvude korral, kuid AS E-Profiili väikesaritootmise ja muutuvate toodete keevitamise automatiseerimiseks on IGM'i

spetsiaalselt keevitusrobotiks projekteeritud kergem, parema ligipääsetavusega ja mobiilsem robot ning pakutud kompleksne lahendus sobivam.

Peab rõhutama väljendi „lahendus” kohasust, sest robot moodustab kogu süsteemist vaid ühe osa ning sama olulised, nagu on robotlahenduse valikul kõik robotraku komponendid, on olulised ka tugiteenused ja oskusteave.

Valitud robotlahenduse maksumus on 426 288eurot. Selel 11 on robotlahenduse juurutamisega kaasnevad olulisemad komponendid protsentuaalselt maksumusest välja toodud, mis veelkord kinnitab, et keevitus- või tööstusrobot on ka rahaliselt mõõtes vaid osa süsteemist.



Sele 12 Robotsüsteemi maksumuse jagunemine

4. ASENDIPLAANI VÄLJATÖÖTAMINE

4.1. Tootmise planeerimist puudutav lähteinfo roboti kasutusele võtmisel

Robotisõlme kasutuselevõtmine tähendab ettevõtte jaoks täiesti uue tehnoloogia kasutuselevõtmist keskkonnas, kus teadmisi selle kohta napib nii ettevõtte kui ka riigi, kus ettevõtte tegutseb, tasandil.

Sellega tuleb kindlasti arvestada ja valmis olla ettenägematusteks.

Roboti kasutuselevõtmisel tekib tootmise planeerimise valdkonnas kaks peamist probleemi:

- 1) piisava põrandapinna leidmine tootmise ümberkorraldamiseks;
- 2) tööde planeerimine tagamaks robotioptimaalset koormatust.

Põrandapinna planeerimisel tuleb arvestada, et roboti kasutuselevõtmisega tekib suur hulk tootmisressurssi, mille rakendamisega lisandub täiendavaid tooteid. Lisaks täiendavatele toodele muutub ka allhankekorraldus ning praegu majast välja minevatest toodetest saab paljusid taas oma ettevõttes valmistada. See aga tähendab arvestatavat koormuse kasvu tootmispinnale.

Üheks aspektiks on asjaolu, et roboti keevitusajad on kaks kuni neli korda lühemad kui käsikeevitusel. See tähendab, et ühe projekti need osad, mis keevitatakse robotiga, valmivad ligikaudu kolm korda kiiremini, kui need, mis keevitatakse käsitsi. Samuti mehaaniline töötlemine ja muud protsessid, mille tsükliäeg samaks jääb, ei kulge enam samas rütmis keevitamisega. Robot jõuab küll töödega kiirelt lõpule, kuid jääb siis uusi töid ootama.

Nagu töös eelpool olevates peatükkides juba mainitud, on robotil keevitamiseks mõeldud põhitootegrupp, kuhu kuuluvad järgmised tooted: „Front sheave house”; 2) „Dual idler sheave house”; 3) „Idler sheave house”; 4) „Korpus.”

Need on kõik ühe, KIPS, tootegrupi tooted ning nende valmistamine kuulub ühte tellimusse.

Reeglina läbivad kõik keevisõmblused NDT kontrolli. See omakorda tähendab, et tooted peavad vähemalt 48 tundi peale keevitamist seisma. Hetkeseisuga tuleb tootmine sellega toime, kuid koormatud on kõik puhverruumid ning kohati juba ka vahekäigud.

Üheks võimaluseks oleks luua täiendav kütmata puhverruum, kuid sellega kaasneks logistiliselt otstarbetu koormus tsehhi liikumisteedel ning transpordivahendite hõivamine tundideks.

Roboti maksimaalseks koormamiseks optimaalseima tootmise planeerimise juures, tuleks robot rakendada kõikide paralleelselt valmistatavate projektide valmistamisse. Sellisel juhul saaks täita robotiraku koormatuse nõude; hoida KIPSide valmistamise tsükli ühe tervikuna; vähendada ka teiste projektide keevitusmeeskondadekoormustja lühendada sellega tähttaegu; ning piirata tootmise põrandapinna hõivatuse kasvu.

Selle saavutamiseks tuleb analüüsida kogu ettevõtte tooteportfelli kuuluvaid standardseid projekte ning määrata võimalikud sobivad tooted või ka nende osad ning luua ka register, mis aitaks tootmist jooksvalt planeerida.

Tööstusroboti kasutamine võimaldab tootmise paindlikkust, kuid selle paindlikkuse tagamine sõltub selle riistvara kasutamise oskusest ehk intellektuaalsest resursist. See on ka üheks punktiks, millega tuleb arvestada.

Veel on üheks punktiks, mida tuleb arvestada, et allhankest keevitamisest tagasi tulevad tooted toovad kaasa ka koormuse kasvu toorikute ettevalmistamise, mehaanilise ja pinna töötlemise osakondadele ning nende puhverpindadele.

4.2. Tootmisvoogude ja asendiplaani kujundamine

Robotisüsteemi juurutamisfaasiks on planeeritud juba varem mainitud tooted KIPSi projektidest ning täiendava tootegrupina „Flantsid“ kraana projektidest.

Selles töös on materjalivoogude planeerimine käsitletud toodete „Front sheave house,” „Dual idler sheave house” ja „Idler sheave house” koostude põhjal. Teadlikult on jäetud välja toorikute ettevalmistamine ja lõppmontaaž. Materjalivoo planeerimisel ei arvestatud ka Korpuste ja Flantside protsessidega.

Löputööga väljatöötatud asendiplaan robotimooduli paigutamiseks AS E-Profiili tootmistsehhi on lisas 7.

Tabel 5

Toote „Idler sheave house“ marsruuttabel

Operatsioon	Töökoht	h/koost	h/tellimus	h/ LUK,RKV
LUK	K16	4	64	80
RKV	RK1	1	16	
KEV	K17	1	16	
NDT	L31	48+1	48+16	
LUK	K30	3	48	
MEH	F3	2	32	
LUK	K16	1,6	25,6	
HAP	H19	3	48	
VRV	V20	2	32	
MON	M9	3,2	51,2	

Tabel 6

Toote „Front sheave house“ marsruuttabel

Operatsioon	Töökoht	h/koost	h/tellimus	Märkus
LUK	K15	5	80	I etapp
RKV	RK1	1,4	22,4	
NDT	L6	48+0,3	48+4,8	
LUK	L6	3	48	
MEH	F3	4	64	
LUK	K15	2,65	42,4	II etapp
RKV	RK1	1,3	20,8	
NDT	L6	48+0,3	48+4,8	
LUK	L6	2	32	
LUK	K16	3	48	III etapp
KEV	K16	4,4	70,4	
LUK	K16	1	16	
TER	K16	2	32	
HAP	H19	3,5	56	
VRV	V20	2,5	40	
MON	M9	3	48	

Tabel 7

Toote „Dual sheave house“ marsruuttabel

Operatsioon	Töökoht	h/koost	h/tellimus	Märkus
LUK	K17	8,5	68	
RKV	RK1	5,5	44	
NDT	L31	48+1	48+8	
LUK	K30	10,5	84	
SIT001	F3	12	96	
LUK	K30	1	8	
HAP	H19	4	32	
VRV	V20	3	24	
MON	M9	4,6	36,8	

5. RAKISE VÄLJATÖÖTAMINE

Kasutuselevõetav robotisüsteem hakkab pakkujalt vastu võttes koheselt valmistama antud lõputöös põhitootegrupi toodetena käistletavaid tooteid. Samal ajal alustatakse ka ettevõttepoolset iseseisvalt täiendavate toodete keevitamise juurutamisega. Selleks ettevalmistamiseks projekteeritakse rakis tootegrupi Flants keevitamiseks, mis on selle lõputöö üheks osaks. Ülesanne ei sisalda rakise valmistamise tehnoloogiat ega töötlemisaegade arvutusi.

5.1. Nõuded rakisele

Ettevõtte poolt on määratud, et rakis peab võimaldama Flants tootegruppi kuuluva viie erineva toote keevitamist ühe paigaldusega koos juurekeevitusega. Selle saavutamiseks tuleb tagada roboti ligipääsetavus keevisõmblusele ehk 360° ümber ääriku välisdiameetri.

Kuna rakise projekteerimise ajal ei ole veel teada, kuidas ettevõttel õnnestub roboti rakendamine keevitamiseks nii programmeerimise, kvaliteedi, kui ka manipulaatori võimekuse poolest, tuleb rakis projekteerida selliselt, et see võimaldaks koostu nii all- kui ka rõht-/ alumises nurkasendis keevitada.

Ettevõttes on küllalt pikaajaline kogemus Flantside valmistamisel. Seniselt tehakse seda käsitsi keevitades ning äärikute paigaldamine vaheplaadile toimub lukksepa visuaalse hinnangu alusel. Empiirilisel loetakse see täpsus piisavaks ning täiendavat tsentreerimist ei ole rakiselt nõutud. Töötlemisvaru sisediameetri lõppmõõtu treimiseks on 20 mm diameetri kohta.

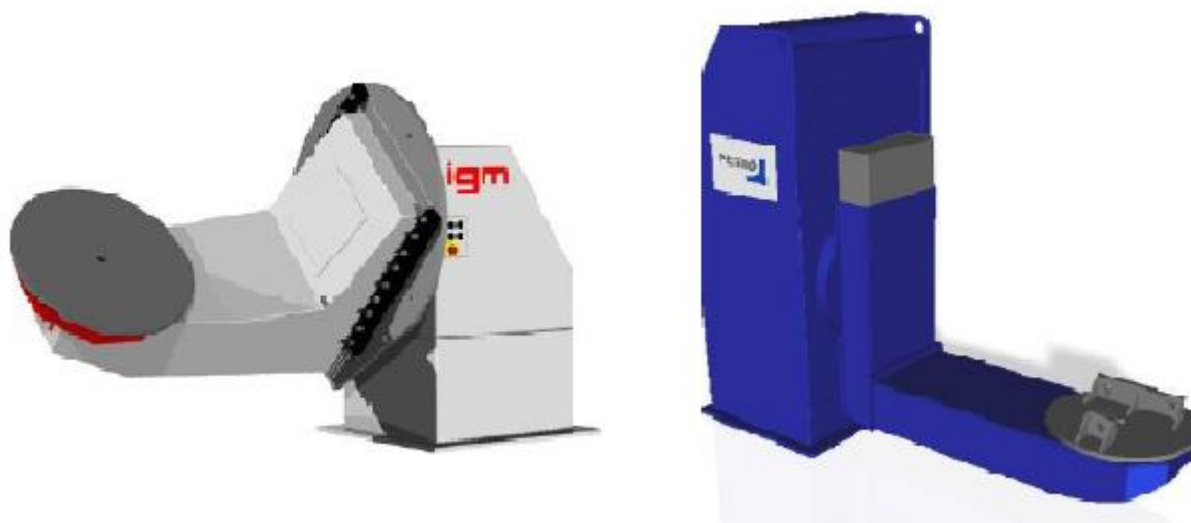
Koostu paigaldamisel robotirakku peab olema tagatud kordustäpsus +/- 5 mm nii koostu ääriku välimispinna kui ka vaheplaadi horisontaalse pinna järgi. Selline täpsus on piisav, kuna robot mõõdab enne igat keevitamise algust tooriku pinnad üle ning teeb automaatselt vastavad korrektuurid tooriku koordinaatsüsteemis.

5.1.1. Roboti manipulaatori parameetrid

Tabel 8

Robotilahenduse pakkujate manipulaatorite võrdlustabel

	IGM RWM2	PEMA Skyhook SH3R 3000R
Maksimaalne kandevõime, N	30 000	30 000
Maks. töölaua pöördemoment, Nm	6 600	5 000
Maks. positsioneerimise käe pöördemoment, Nm	15 600	8 000



Sele. Pakkujate positsioneerid

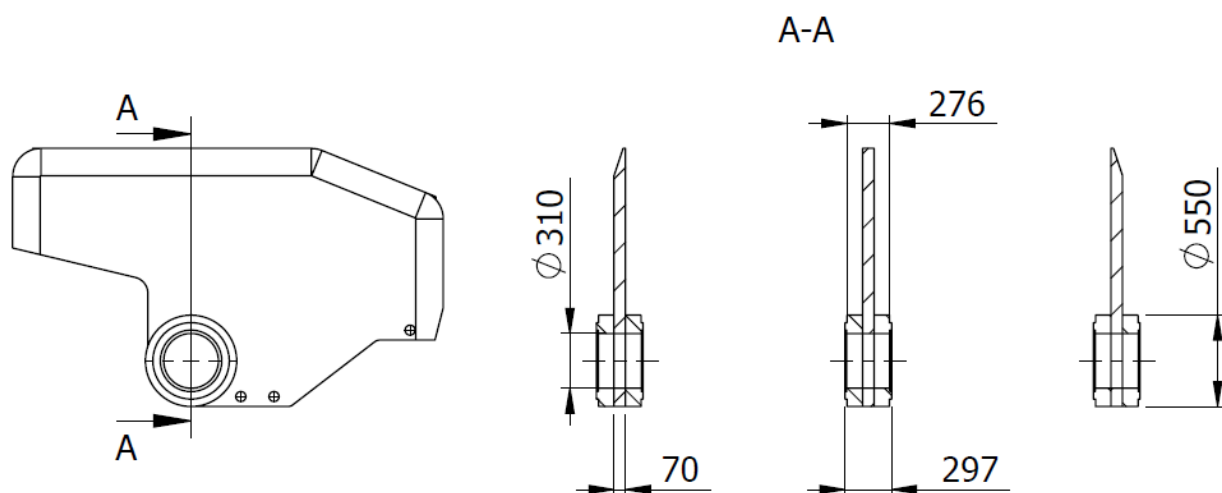
5.1.2. Tootegrupp „Flants”

Koostud koosnevad kahest vaheplaadist ja selle ava teljel, mõlemal plaadi poolel, asuvast äärikust. Kõikides koostudes kasutatakse samu äärikuid ning plaatide ava diameeter on võrdne. Samas on kõik vaheplaadid erineva kuju ning gabariidiga. Ühe koostu puhul kasutatakse ka erineva paksusega vaheplaati. Vaata ka joonist lisas 5.

Kõik vaheplaadid lõigatakse gaasilõikusega (täpsus +/- 1 mm) ning äärikud treitakse (täpsus siseava töötlemisel 0...1 mm).

Tabel 9

Tootegrupi „Flants” parameetrid						
Nimetus	Gabariit x – y – z, mm	Koostu mass, kg	Siseava (äärikutel ja vaheplaadil), mm	Äärikute välimine läbimõõt, mm	Äärikute süvendite vahekaugus koostus, mm	Vaheplaadi paksus, mm
Flants 1	2 600 x 1 555 x 297	1 694	310	550	296	70
Flants 2	1 715 x 1 515 x 297	1 109	310	550	296	70
Flants 3	1 810 x 1 775 x 281	1 581	310	550	296	70
Flants 4	2 100 x 1 475 x 297	1 311	310	550	296	70
Flants 5	1 550 x 1 690 x 297	1 489	310	550	296	100



Sele 13. Toode "Flants 1"

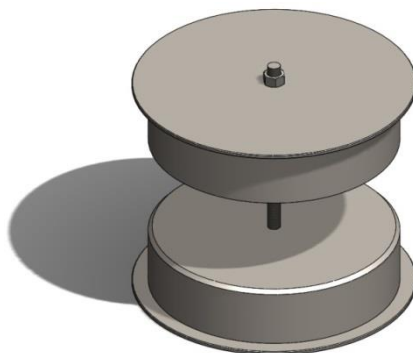
Nagu jooniselt lisas 2 näeme on ka keevisõmblused sarnased.

Rakise projekteerimisel tuleb veel arvestada sellega, et osade Flantside vaheplaadid on küll sarnase kontuuriga, kuid faasitud erinevalt poolelt.

5.2. Projekteeritud rakise iseloomustus

5.2.1. Kasutamine

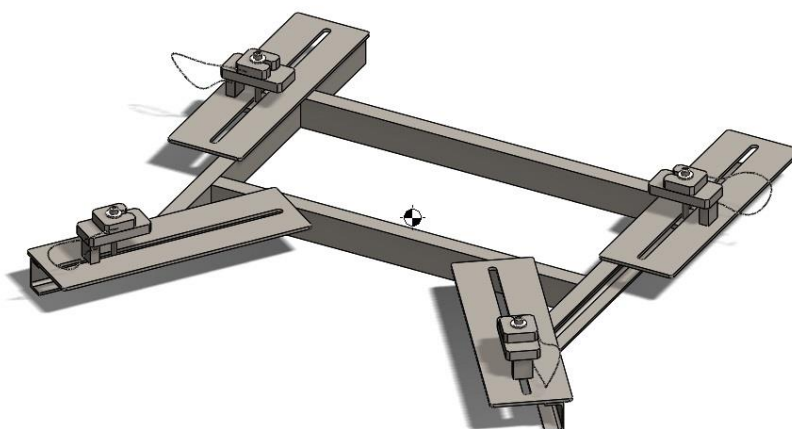
Projekteeritav rakis võimaldab toote äärikute kinnitamist toote vaheplaadile kahe omavahel läbi ava $d = 310 \text{ mm}$ mineva võlliga ühendatud rakise kettaga. Käesolevas töös nimetatakse seda koostu äärikute rakiseks.



Sele 14. Äärikute rakis

Detailid koostatakse äärikute rakisega lukksepa töökohal. Seejärel tõstetakse kraana abil robotirakku ja paigaldatakse seal asuva manipulaatori töölauale kinnitatud raami külge. Nimetatud raam on projekteeritava rakise teine osa ning seda käsitletakse antud töös manipulaatori paigaldusraamina.

Koostu paigaldamine manipulaatori paigaldusraamile peab toimuma kiirelt ning ümberseadistamine Flants tootegrupi erinevate toodete vahel ei tohi kesta oluliselt kauem, kui sarnaste toodete paigaldamine.



Sele 15. Manipulaatori paigaldusraam

5.2.2. Kinnitusjõudude arvutused

Rakise projekteerimisel on tehtud vajalikud kinnitusjõu arvutused määramaks rakise kettaid ühendava keerme ja koostude manipulaatori paigaldusraamile kinnitamiseks vajalike nelja kinnitusklambri keerme suurused.

Hõõrdekoefitsient töötlemata pindadel: $\mu=0,2...0,25$ ning töödeldud pindadel $\mu=0,08...0,15$ [6]

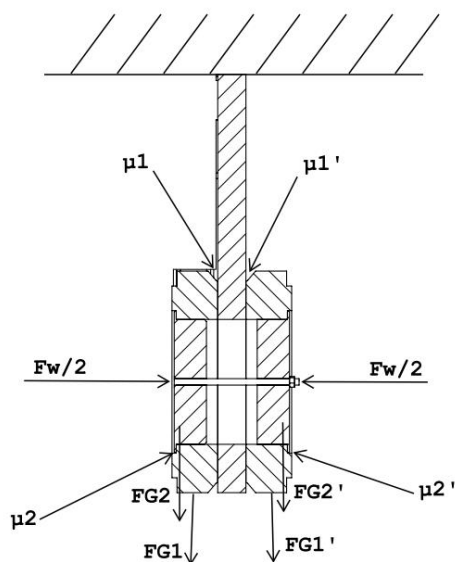
Kuna tegemist on rippuvate detailidega, on riskiteguriks määratud $K_x=3$.

Koostu äärikute vaheplaadi külge kinnitamisel kehtib järgminetasakaaluvõrrand:

$$2 * (K_X * F_{G1} + K_X * F_{G2}) - 2 * (\mu_1 * F_W + \mu_2 * F_W) = 0. \quad (1)$$

Sellest tuletatult kehtib järgmine kinnitusjõu valem:

$$F_W = \frac{2 * (K_X * F_{G1} + K_X * F_{G2})}{2 * \mu_1 + 2 * \mu_2} = \frac{2 * (3 * 1130 + 3 * 500)}{2 * 0,15 + 2 * 0,08} = 21261 \text{ N} = 21,3 \text{ kN}.$$



Hõõrdeegur töödeldud ja töötlemata pinna vahel, $\mu_1=0,15$

Hõõrdeegur töödeldud pindade vahel, $\mu_2=0,08$

Koostu ääriku raskusjõud, $FG_1=1130 \text{ N}$

Rakise ääriku raskusjõud, $FG_2=500 \text{ N}$

Kinnitusjõud, $F_w=21,3 \text{ kN}$

Sele 16. Äärikute rakise kinnitusjõu skeem

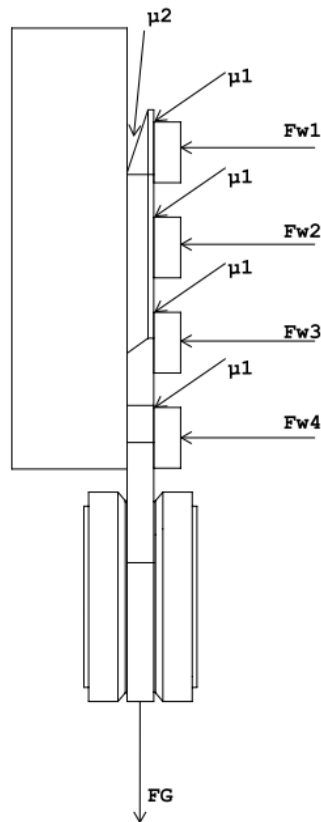
Koostu paigaldusraamile kinnitamiselkehtib järgmine tasakaaluvõrrand:

$$K_X * F_G - 4 * (2 * \mu * F_W) = 0.$$

(2)

Sellest tuletatult kehtib järgmine kinnitusjõu valem:

$$F_W = \frac{K_X * F_G}{8 * \mu} = \frac{3 * 30\,000}{8 * 0,2} = 56\,250\,N = 56,25\,kN.$$



Hõõrdetegur töötlemata pindade vahel, $\mu_1=\mu_2=0,2$

Kinnitusjõud, $F_w=56,25\,kN$

Koostu raskusjõud, $F_G=30\,kN$

Sele 17. Manipulaatori paigaldusraami kinnitusjõu skeem

Sobivaks keermeks on keermesliite algkoormuse järgi keere M16; tugevusklassiga 8.8; keskmise hõõrdeteguriga $\mu'=0,125$ ja algkoormusega 75,3 kN.

Valitud keermesliitega arendatav pingutusjõud on leitud järgmise arvutuskäiguga: [7]

Keermeniidi tõusunurk:

$$\tan \alpha_G = \frac{p}{\pi * d_2} = \tan \frac{2}{\pi * 0,0147} = 2,479^\circ;$$
(3)

Keskmine hõõrdenurga väärtus:

$$\rho' = \arctan \mu' = \arctan 0,125 = 7,125^\circ;$$

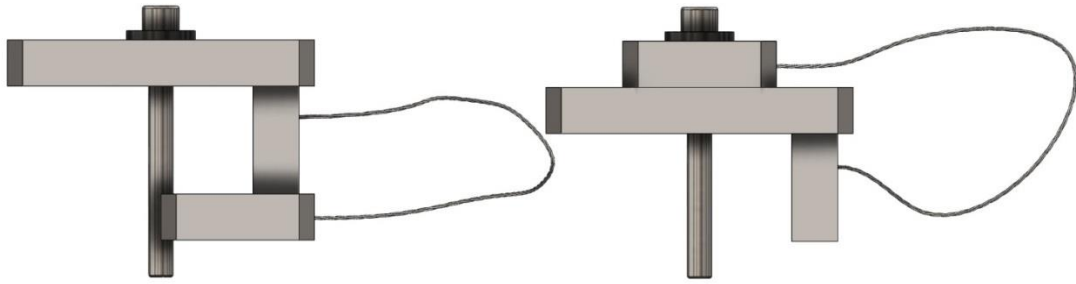
Keermesliitepoolt avaldatav pingutusjõud:

$$F_{sp} = \frac{M_A}{d_2 * \tan(\alpha_G + \rho')} = \frac{195}{0,0147 * \tan(2,479^\circ + 7,125^\circ)} = 72\,888\,N = 72,9\,kN,$$

kus p [mm] - keermesamm;

d_2 [mm] - keeme keskläbimõõt;

M_A [Nm] - pingutusmoment.



Sele 18. Manipulaatori paigaldusraami kinnitusklambrid: vasakul vaheplaadi paksuega $H=100$ ja paremal $H=70$ kinnitamisel.

Kinnitusklambri kinnitusjõu arvutamiseks kehtib järgmine valem: [7]

$$F_{sp} \frac{F_{erz}}{1 + l_1/l_2} = \frac{72900}{1 + 0,013/0,09} = 63\,689\,N = 63,7\,kN \quad (4)$$

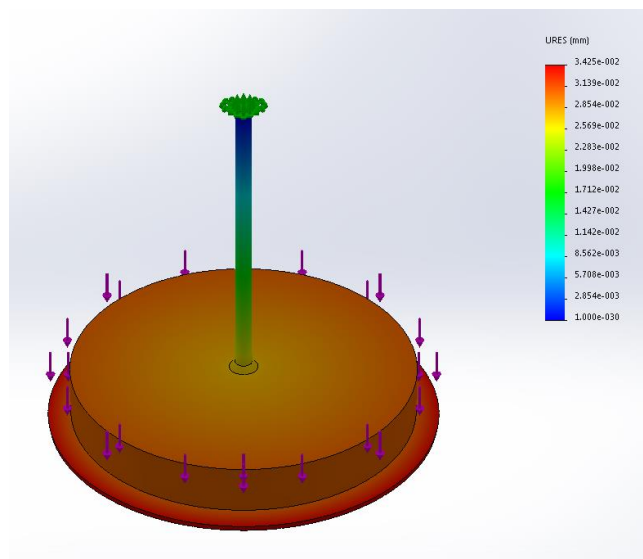
$$63,7 \geq 56,25$$

Rakise kasutamise lihtsustamiseks on äärikute rakise võlli keermeks samuti M16 määratud.

5.2.3. Konstruksioon

Flants tootegrupi toodete robotirakus keevitamiseks projekteeritud rakis jaguneb äärikute rakiseks ning manipulaatori paigaldusraamiks.

Rakise ketaste mõõtmed määrati konstruktiivselt ning nende sobivust korrigeeriti CAD programmi SolidWorks FEA (*finite element analysis*) tulemustele tuginedes.



Sele 19. Rakise ketaste FEA simulatiooni tulemus

6. MAJANDUSLIKUD ARVUTUSED

6.1 Arvutusmetoodika ja valemid

Käesolevas peatükis on välja toodud valemid, mida on kasutatud tsükliagade ning majandusliku tasuvuse arvutamisel. Kuna arvutuste maht on küllaltki suur, siis on peatükis „Tsükliagade arvutustulemused” arvutuskäik toodud välja vaid osaliselt ja on mõeldud näitena. Tegelikud arvutused on tehtud tabelarvutuse põhimõttel ning arvutustulemused siin on esitatud tabeli kujul. Et eesmärgiks ei ole tootmisüksuse projekteerimine, vaid investearvutuse tasuvuse analüüs, siis arvutustes kajastuvad eelkõige sellised tegurid, mis tööstusroboti juurutamisel ühes või teises suunas muutuvad. Samuti on võrdsustatud keevitusaja ja roboti tsükli-aeg ehkki mõningatel juhtudel toimub näiteks koostamine paralleelselt keevitamisega. Lisaks on abiaegadest välja jäetud keevitusjärgne puhastamine.

Toote keevitamiseks kuluv aeg koosneb kahest komponendist – kaareaeg ja abiajad. Kaareaega mõjutavad tegurid on keevisõmbluse mass, keevitusprotsessi efektiivsus ja keevitusprotsessi tootlikkus. Abiaegade suurus sõltub koostamisest, eelkeevitamisest, üksikute keevisõmbluste arvust ning ligipääsetavusest neile.

Kaareaja leidmiseks on leitud iga toote erinevate õmblusetüüpide mass $m_{1..5}$ [kg].

$$m_{1..5} = \frac{s \cdot l}{10^9} \cdot \rho,$$

(5)

kus s [mm²] – keevisõmbluse ristlõikepindala;

l [mm] – keevisõmbluse kogupikkus;

ρ [kg/m³] – keevitustraadi tihedus.

Parema ülevaate saamiseks keevitusprotsessist on kaareajad igale õmblusetüübile arvutatud eraldi. Kaareajad $t_{k1..k5}$ [min] on leitud järgneva valemiga [2]:

$$t_{k1..k5} = \frac{m_{1..5} * E}{D * 60 * 100}, \quad (6)$$

kus D [kg/h] - keevitusprotsessi tootlikkus;

E (%) - keevitusprotsessi efektiivsus.

Tootlikkus, eriti käsikeevitusel, sõltub oluliselt keevisliite tüübist, keevitusasendist ning keevitaja kvalifikatsioonist. Arvutustes on kasutatud alljärgnevaid väärtusi [3]:

1) käsikeevituse tootlikkus: 2 kg/h,

2) robotkeevituse tootlikkus: 11 kg/h.

GMAW keevitusprotsessi efektiivsuseks loetakse 90...95%[3], käesolevas töös on kasutatud nii käsikeevituse, kui ka robotkeevituse korral väärtust 90%.

Keevitusae (tsükli) $t_{1..5}$ [min] leitakse abiaegade liitmisega kaareajale

$$t_{1..5} = t_{k1..k5} + t_{a1..a5}, \quad (7)$$

kus $t_{a1..a5}$ [min] - abiajad

Abiajana ei ole arvesse võetud ettesoojendamisele kuluvat aega, kuna selle pikkus ei olene keevitusprotsessist.

Korrutades toodete tükiarvud leitud aegadega on saadud vastavad ajad aastas kokku t_{kokkuk} ja t_{kokkua} [h].

$$t_{kokkuk} = \frac{t_{k1..k5} * p_{1..5}}{60}$$

(8)

Ja

$$t_{kokkua} = \frac{t_{a1..a5} * p_{1..5}}{60}$$

(9)

kus $p_{1..5}$ [tk] - Toodete tükiarvud

Tasuvusaja arvutamiseks on leitud mõlemale keevitusprotsessile kõikide toodete summaarne keevitusaeg tootepartii kohta tundides t_{kokku} [h]

$$t_{kokku} = t_{kokkuk} + t_{kokkua}$$

(10)

Käsi- ja robotkeevituse summaarsete keevitusaegade vahe väljendab robotkeevituse kasutuselevõttuga saavutatavat kokkuhoidu töötundides aastas t_s [h].

Kaitsegaasi kulu v_{gaas} [m³] kummagile keevitusprotsessile on arvutatud alljärgneva valemiga[2]:

$$v_{gaas} = \frac{t_{kokkuk} * F}{10^3} * 60,$$

(11)

kus F [l/min] - kaitsegaasi voolukiirus

Kaitsegaasi voolukiirused kummalegi protsessile on järgnevad [2]:

- 1) Käsikeevitus – 14 l/min;
- 2) Robotkeevitus – 20 l/min.

Käsi- ja robotkeevituse aastaste gaasikoguste vahe korrutamisel kaitsegaasi hinnaga 2,5 €/m³ on saadud aastane rahaline kokkuhoid kaitsegaasilt.

Tootmisüksuse arvutuslik vajalik seadmete arv n_a [tk] leitakse võttes aluseks arvutatud summaarne ajanorm viie toote keevitamiseks:

$$n_a = \frac{t_{kokk}}{F_{ef}},$$

(12)

kus F_{ef_s} [h] - Seadme efektiivne ajanorm aastas (6048)

Saadud väärtuse ülesse täisarvuks ümardamisel saadakse vajalik seadmete arv n_v , mille põhjal leitakse seadmete koormustegur K_k :

$$K_k = \frac{n_a}{n_v}$$

(13)

Sarnasel põhimõttel on leitud ka töötajate arv

$$n_t = \frac{t_{kokku}}{F_{ef_t}},$$

(14)

kus F_{ef_t} [h] - Töötaja efektiivne ajanorm aastas (1680)

Olles leidnud jaoskonna otsekulud (töötajate palgafond), muutuvkulud (töökaitse ja -vahendid, seadmete ekspluatatsioon jakaitsegaasi kulu) ning püsikulud (seadmete amortisatsioon) saab arvutadaaastase tootepartii keevitamise omahinna.

Investeeringu kasumlikkus K [€/a] on omahindade vahe käsikeevitusel ja robotkeevitusel

$$K = K_k - K_r,$$

(15)

kus K_k [€] - Aastapartii keevitamise omahind käsikeevitusel

K_r [€] - Aastapartii keevitamise omahind robotkeevitusel

Selle põhjal on leitud investeeringu tasuvusaeg.

6.2 Tsükliagade arvutustulemused

6.2.1 Toode „Front sheave house”

Keevisõmbluste mass kilogrammides erinevatele õmblustüüpidele on leitud vastava valemiga (5):

$$m_{1_1} = \frac{712,5 * 1600}{10^9} * 7850 = 8,8$$

$$m_{1_2} = \frac{36,8 * 2900}{10^9} * 7850 = 0,9$$

$$m_{1_3} = \frac{102,2 * 9700}{10^9} * 7850 = 7,8$$

Seejärel on samuti õmblustüübiti leitud kaareajadrobotkeevitusel valemiga (6):

$$t_{kr1_1} = \frac{8,8 * 90}{11 * 60 * 100} = 54$$

$$t_{kr1_2} = \frac{0,9 * 90}{11 * 60 * 100} = 5$$

$$t_{kr1_3} = \frac{7,8 * 90}{11 * 60 * 100} = 47$$

Analoogselt on arvutatud teoreetilised kaareajad käsikeevitusele (esitatud tabelis).

Tabel 10

„Front sheave house“ kaareagade võrdlus

	Keevisõmbluste pikkus, m	Keevisõmbluste mass, kg	Kaareag käsikeevitusel, min	Kaareag robotkeevitusel, min
Põkkõmblus	1,58	8,8	294	54
Nurkõmblus a6	2,9	0,9	28	5
Nurkõmblus a10	9,7	7,8	260	47
Kokku	14,2	17,5	582	106

Abiajad põhinevad AS E-Profiil kogemuslikel andmetel ning robotitarnija hinnangutel. Koostamiskiirus kasvab tänu rakiste kasutamisele. Positsioneerimiskiiruse erinevus tuleneb peamiselt vajadusest koostu käsikeevituse korral korduvalt keerata, automatiseeritult keevitades toimub see sekundite jooksul.

Tabel 11

„Front sheave house“ abiaegade võrdlus

	Käsi keevitus, min	Robot keevitus, min
Koostamine, eelkeevitamine, juuretoe paigaldamine	40	20
Paigaldus positsioneerile ja eemaldamine sellelt	-	10
Positsioneerimine, keeramine, liikumised	120	5
Juure mehaaniline puhastamine, läbimite vaheline puhastamine (käsi keevituse korral)	60	20
Kokku	220	65

Seega robotkeevituse tsükli aeg tootele minutites on:

$$t_{r1} = 106 + 65 = 171$$

Tabel 12

„Front sheave house“ tsükli ajad

	Käsi keevitus	Robot keevitus
Kaareaeg, min	582	106
Abiajad, min	220	65
Kokku ühele tootele, min	802	171
Kokku tootepartiile, h	5347	1140

6.2.2 Toode „Dual idler sheave house“

Tabel 13

„Dual idler sheave house“ kaareaegade võrdlus

	Keevisõmbluste pikkus, m	Keevisõmbluste mass, kg	Kaareaeg käsi keevitusel, min	Kaareaeg robotkeevitusel, min
Pökkõmblus	3,7	48,1	1605	292
Kokku	3,7	48,1	1605	292

Tabel 14

„Dual idler sheave house“ abiaegade võrdlus

	Käsi keevitus, min	Robot keevitus, min
Koostamine, eelkeevitamine, juuretoe paigaldamine	40	30
Paigaldus positsioneerile ja eemaldamine sellelt	-	10
Positsioneerimine, keeramine, liikumised	120	10
Juure mehaaniline puhastamine, läbimite vaheline puhastamine (käsi keevituse korral)	60	30
Kokku	220	80

Tabel 15

„Dual idler sheave house“ tsükliajad

	Käsi keevitus	Robot keevitus
Kaareaeg, min	1605	292
Abiajad, min	220	80
Kokku ühele tootele, min	1805	372
Kokku tootepartiile, h	6017	1240

6.2.3 Toode „Idler sheave house“

Tabel 16

„Idler sheave house“ kaareaegade võrdlus

	Keevisõmbluste pikkus, m	Keevisõmbluste mass, kg	Kaareaeg käsi keevitusel, min	Kaareaeg robot keevitusel, min
Pökkõmblus	3,8	10,8	361	66
Nurkõmblused, a6	5	1,4	48	9
Kokku	8,8	12,2	409	75

Tabel 17

„Idler sheave house“ abiaegade võrdlus

	Käsi keevitus, min	Robot keevitus, min
Koostamine, eelkeevitamine, juuretoe paigaldamine	20	10
Paigaldus positsioneerile ja eemaldamine sellelt	-	10
Positsioneerimine, keeramine, liikumised	40	5
Juure mehaaniline puhastamine, läbimite vaheline puhastamine (käsi keevituse korral)	40	10
Kokku	100	35

Tabel 18

„Idler sheave house“ tsükliajad

	Käsi keevitus	Robot keevitus
Kaareaeg, min	409	75
Abiajad, min	100	35
Kokku ühele tootele, min	509	110
Kokku tootepartiile, h	3393	733

6.2.4 Toode „Flants”

Tabel 19

„Flants“ kaareaegade võrdlus

	Keevisõmbluste pikkus, m	Keevisõmbluste mass, kg	Kaareaeg käsikeevitusel, min	Kaareaeg robotkeevitusel, min
Põkkõmblus	3,4	9,6	319	58
Nurkõmbused, a12	3,4	3,9	132	24
Kokku	6,8	13,5	451	82

Tabel 20

„Flants“ abiaegade võrdlus

	Käsikeevitus, min	Robotkeevitus, min
Koostamine, eelkeevitamine, juuretoe paigaldamine	20	10
Paigaldus positsioneerile ja eemaldamine sellelt	-	10
Positsioneerimine, keeramine, liikumised	30	5
Juure mehaaniline puhastamine, läbimite vaheline puhastamine (käsikeevituse korral)	20	-
Kokku	70	35

Tabel 21

„Flants“ tsükliajad

	Käsikeevitus	Robotkeevitus
Kaareaeg, min	451	82
Abiajad, min	70	35
Kokku ühele tootele, min	521	107
Kokku tootepartiile, h	625	128

6.2.5 Toode „Korpus”

Tabel 22

„Korpus“ kaareaegade võrdlus

	Keevisõmbluste pikkus, m	Keevisõmbluste mass, kg	Kaareaeg käsikeevitusel, min	Kaareaeg robotkeevitusel, min
Põkkõmblus	6,6	4,7	154	28
Nurkõmbused, a6	51,0	14,8	493	90
Nurkõmbused, a8	12,2	6,3	211	38
Kokku	69,8	25,8	858	156

Tabel 23

„Korpus“ abiaegade võrdlus

	Käsi keevitus, min	Robot keevitus, min
Koostamine, eelkeevitamine, juuretoe paigaldamine	60	60
Paigaldus positsioneerile ja eemaldamine sellelt	-	-
Positsioneerimine, keeramine, liikumised	180	60
Juure mehaaniline puhastamine, läbimite vaheline puhastamine (käsi keevituse korral)	60	20
Kokku	300	140

Märkus. keevitamine ei toimu positsioneeril.

Tabel 24

„Korpus tsükliajad“

	Käsi keevitus, h	Robot keevitus, h
Kaareaeg, min	858	156
Abiajad, min	300	140
Kokku ühele tootele, min	1158	296
Kokku tootepartiile, h	3860	987

6.2.6 Keevitusajad kokku

Tabelis 25 on veelkord välja toodud tsükliajad toodete kaupa ning võrdlus käsi keevituse ja robot keevituse töötundidest aastas kokku.

Tabel 25

Tootepartii summarsed keevitusajad

	Käsi keevitus, h	Robot keevitus, h
Front sheave house	5347	1140
Dual idler sheave house	6017	1240
Idler sheave house	3393	733
Kirves	521	128
KIPS outfitting	3860	987
Kokku aastas	19138	4228

Keevitusaegade võrdlusest selgub, et planeeritava viie toote koostamise ja keevitamise tehnoloogilise protsessi muutmisel on eeldatav ajaline kokkuhoid

$$t_s = 19138 - 4228 = 14909 \text{ h}$$

6.3 Tootmisüksuse arvutused

6.3.1 Seadmete arvutused

Keevituse käsiseadmetel toimub kahes vahetuses, robotkeevitust rakendatakse maksimaalse tootlikkuse saavutamiseks, sarnaselt teiste E-Profiilis kasutatavate suurema investeeringumahuga tööpinkide ja –seadmetega kolmes vahetuses.

Vajalik seadmete arv käsikeevitusel

$$n_{a_k} = \frac{19138}{3360} = 5,7$$

Vajalik seadmete arv robotkeevitusel

$$n_{a_r} = \frac{4228}{6048} = 0,7$$

Käsikeevituseks vajalik keevitusseadmete arv on 6 koormusteguriga 0,94. Keevitusroboti koormustegur on 0,7.

Tabel 26

Tootmisüksuse kulud seadmetele

	Käsikeevitus	Robotkeevitus
Seadmete efektiivne tööajafond, h/a	3360	6048
Aastapartii summaarne ajanorm viie toote peale kokku, h	19138	4228
Vajalik seadmete arv, tk	6	1
Seadme koormustegur	0,95	0,70
Ühe seadme maksumus, €/tk	3140	342597
Seadmete maksumus kokku, €	18480	426288
Ekspluatatsioonikulud (hooldus ja remont), €/a	1318	23982
Amortisatsioon, €/a	1884	53286
Kulud seadmetele kokku, €/a	3203	77268

Hooldus- ja remondikuludeks on arvestatud 7%

Robotiraku ekspluatatsioonikulude arvutamisel on algmaksumuseks võetud keevitusseadmete, roboti ja positsioneerimise kogumaksumus, st koguinvesteeringust on lahutatud transpordi- ja paigalduskulud, personali koolituskulud ja rakiste maksumus 83691 eurot.

Keevitusroboti amortisatsiooninormiks on võetud 12,5%, käsikeevitusseadmetele 10%.

6.3.2 Personali arvutused

Vajalik töötajate arv käsikeevitusel:

$$n_{t_k} = \frac{19138}{1680} = 11,4$$

Vajalik töötajate arv robotkeevitusel:

$$n_{t_r} = \frac{4228}{1680} = 2,51$$

Lisandub insenertehniline personal ning täiendavalt kolm koostajat-lukseppa. Arvutustulemused on koondatud tabelisse.

Tabel 27

Tootmisüksuse personalikulud

		Käsikeevitus	Robotkeevitus
Töölise efektiivne tööajafond, h/a		1680	1680
Aastapartii summaarne ajanorm viie toote peale kokku, h		19138	4228
Vajalik tööliste arv, tk,		16	7
Kellest			
	Luksepp	3	3
	Robotioperaator	-	3
	Keevitaja	12	-
	ITP	1	1
Töötajate palgafond, €		413280	171360
Kulutused tööohutusele, riietusele ja väikevahenditele		15310	3383
Kokku		428590	174742

Insenertehniline personal käsikeevituse korral on keevitustehnoloog või keevituskoordinaator, robotkeevituse korral programmeerija-keevitusinsener.

Palgafondi arvutustel on palgakuludeks koos maksudega arvestatud luksepp-abitöötajale 12 €/h, keevitaja ja robotioperaator 16 €/h ning insener-tehniline personal 18 €/h ning põhinevad AS E-Profiil andmetel.

Kulutused tööohutusele, riietusele ja väikevahenditele on arvestatud vastavalt AS E-Profiil lähteandmetele 0,8 €/h.

6.3.3 Kaitsegaasi kulu arvutused

Kuna kulud kaitsegaasile on otseselt seotud kaareajaga, siis, kuna kaareaeg väheneb oluliselt, on põhjendatud selle kulu eraldi välja toomine.

Kaitsegaasi kulu käsikeevitusel kuupmeetrites:

$$v_{gaas_k} = \frac{15358 * 14}{10^3} * 60 = 12900$$

Ning sarnaselt kulu robotkeevitusel:

$$v_{gaas_r} = \frac{2798 * 20}{10^3} * 60 = 3358$$

Kaitsegaasi hind ballooni kohta on 30 eurot. See teeb kuupmeetrihinnaks 2,52 eurot.

Tabel 28

Kaitsegaasi kulu võrdlus

	Käsikeevitus	Robotkeevitus
Kaareaeg kokku, h	15358	2798
Gaasi vooluhulk, l/min	14	20
Gaasi kogus, m ³	12900	3358
(Balloonide hulk, tk)	1084	282
Kulud kaitsegaasile, €/a	32522	8466

Robotkeevituse korral on kaitsegaasi aastane kulu 9543 m³ võrra väiksem.

Arvutustest selgub aga, et kasutades standartseid 11,9 m³ gaasiballoone tuleks robotkeevituse korral vähendada gaasiballooni keskmiselt korra kolmevahetuselise töötsükli jooksul. Selliste töökatkestuste vähendamiseks on vajalik keevitusgaasi etteandmine lahendada teisiti, näiteks ühendada gaasiballoonid gruppi, nii, et balloonide vahetamine ei toimuks tihemini kui ühe korra nädalas.

6.4 Investeeringu tasuvusaja ja tootepartii omahinna arvutused

Arvutustulemused on koondatudliigiti tabelisse 29.

Tabel 29

Käsikeevituse ja robotkeevituse kulude võrdlus		
Kulu liik	Käsikeevitus, €/a	Robotkeevitus, €/a
Otsekulud		
Tööliste palgafond	413280	171360
Muutuvkulud		
Seadmete eksploatatsioonikulud	1318	23982
Töökaitsevahendid/tööriided	15310	3383
Keevitusgaas	32522	8466
Püsikulud		
Seadmete amortisatsioon	1884	53286
Omahind kokku	464316	260476

Saadud tulemuste põhjal on leitud robotkeevituse juurutamise kasumlikkus

$$K = 464316 - 260476 = 203839$$

Tasuvusaeg, seega, on

$$t_{tas} = \frac{426288}{203839} = 2,09$$

Investeeringu suuruses ei kajastu väikese osatähtsusega lisanduvad kulud nagu tootegrupi „Flants” rakise valmistamise maksumus või vundamendi rajamine robotisüsteemile.

Investeeringu tasuvusaeg, arvutuste kohaselt on umbes 2,1 aastat, mis jääb aktsepteeritavatesse piiridesse.

Eraldi peab tähelepanu juhtima madalale koormustegurile, mis juurutamise käigus on mõistlik, kuid tähendab, et täiendavate toodete robotkeevitamiseks kohandamine on vajalik.

KOKKUVÕTE

Käesoleva tööga on jõutud tõdemuseni, et juhul kui keevitusroboti juurutamine on tehtud läbimõeldult, siis on selline investeering AS'is E-Profiil põhjendatud nii majanduslikult kui ka tehnoloogiliselt. Ehkki töö käigus on käsitletud vaid viite toodet, siis AS E-Profiil valmistatavate toodete hulgas on neile lisaks mitmeid tooteid või suuremate toodete alamkoostusid, mille keevitamine täisautomatiseeritult on võimalik ja mõistlik, kuid iga sellise toote keevitamise automatiseerimine eeldab omaette analüüsi.

Keevitusprotsesside automatiseerimise võimaluste uurimise ja robotisüsteemide pakkumiste võrdlusel on valitud välja sobivam lahendus.

Tugevasti koormatud tootmispindade parimaks ärakasutamiseks on lõputöö käigus leitud lahendus robotiraku paigutuseks.

Projekteeritud rakis võimaldab sarnaste keevisõmblustega kuid muutuvate gabariitidega tootegrupi „Flants” keevitamist. Siinkohal tootegrupina käsitletud „Flants” kujutab tegelikult mitmete eri tellijate erinevate toodete alamkoostusid ning väljendab seetõttu eriti hästi tööstusroboti paindlikkust kuid võrdselt rõhutab läbimõeldud rakiste vajalikkust.

Suuregabariidiliste metallkonstruktsioonide keevitamisel AS-is E-Profiil jääb kõige laialdasemalt kasutusele käsikeevitus ja kõige olulisemateks töötajateks lisaks insener-tehnilisele personalile kõrge kvalifikatsiooniga keevitajad. Üks keevitusrobot teeb ära mitme keevitaja töö ja kokkuvõttes väiksemate kuludega ettevõttele, kuid ei asenda keevitajaid, vaid pelgalt annab võimaluse neid rakendada paremini selliste konstruktsioonide keevitamisel, mille automatiseerimine võimalik ei ole.

SUMMARY

A major increase in turnover and production output that has been planned for the coming years have brought up a serious question of how to maximize the efficiency of already available resources. Amongst other methods based on lean manufacturing ideology and automation, automation of welding process in the industry of large welded structures is a subject that can not be overestimated. However as large structures usually mean lower part volumes per year, the analysis of the feasibility of implementing a robot welding system is rather difficult.

The first of the scopes of this thesis is to pick the best robotic welding system for the unique requirements of E-Profiil. This is done by mainly by research about the possibilities and flexibility of automated welding system and secondly by analysing the offers from the vendors and comparing them to the needs of E-Profiil.

As arc-on times decrease with the increase of deposit rate, non-arc times proportionally play an increasingly larger role in getting the most out of the automation investment. This means that fixtures play a large role in maximizing the efficiency and reducing time of return of investment. In this thesis, a fixture is designed for a product group with similar welds but changing dimensions to increase the flexibility of the robot welding system.

One of the limits of increasing production output in E-Profiil is the already high load of the production facilities. This issue is also addressed in this thesis by finding the best location for the robot cell to free the most resources possible in facilities available for increasing output.

Lastly cycle times have been calculated and an economical feasibility analysis carried out to find the return on investment.

It can be concluded that automating the welding process is feasible in E-Profiil, however every automation project needs to be analysed separately. Products and production rates have to be addressed as well as all new labour needs and a new way of thinking amongst welding engineers.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] J. M. Berge, Automating the Welding Process, USA: Industrial Press Inc, 1994.
- [2] J. R. Barkhoff, K. M. Kerluke ja D. L. Lynn, Certified Welding Supervisor Manual for Quality and Productivity Improvement, USA: American Welding Society, 2005.
- [3] H. R. Castner, Welding Science and Technology, USA: American Welding Society, 2001.
- [4] „Difference between SCARA, Six-Axis and Cartesian Robots,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.westfloridacomponents.com/blog/difference-scara-six-axis-cartesian-robots/>. [Kasutatud 28 03 2014].
- [5] C. F. W. M. Consonni, „The Welding Institute,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.twi-global.com/news-events/case-studies/repair-statistics-of-manufacturing-and-fabrication-welding-503/>. [Kasutatud 19 04 2014].
- [6] H. Buschmann, Rakiste projekteerimine, Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool, 2008.
- [7] B. Perovic, Werkzeugmaschinen und Vorrichtungen, Nördlingen: Druckerei Wagner GmbH, 1999.
- [8] A. Laansoo, Keevitustehnoloogia, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [9] E. Kalle, Tootlikkuse kasvu juhtimine ettevõttes, Tallinn: Külim, 2007.
- [10] E. Pettai, Tootmise automatiseerimine, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2005.
- [11] J. Kukkonen, Tootmise juhtimise käsiraamat, Tallinna: Äripäeva käsiraamat, 2013.
- [12] K. R. GmbH, Roboterauswahl und -integration, Augsburg: KUKA College GmbH, 2011.

LISA 1. GRAAFILINE OSA

Roboti asendiplaan

Tootegrupp „Flantsid“

Manipulaatori paigaldusraam keevitusjoonis

Manipulaatori paigaldusraami montaažijoonis

„Flantside“ kinnitamine paigaldusraamile

„Flantsid“ paigaldusraamil

AS E-Profiili tootmise asendiplaan