



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Toni Joensuu

# ROOTTORIROBOTTISOLUN KEHITTÄMINEN

Tekniikka  
2016

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Toni Joensuu
Opinnäytetyön nimi	Roottorirobottisolun kehittäminen
Vuosi	2016
Kieli	suomi
Sivumäärä	49 + 2 liitettä
Ohjaaja	Mika Billing

---

Vaasan ABB Oy Motors and Generators –yksikössä haluttiin parantaa synkronireluktanssi roottoreiden valmistukseen tarkoitetun robottisolun joustavuutta niin, että solulla voitaisiin aksiloida, sorvata sekä tasapainottaa 160-250 akselikorkuisten moottoreiden häkkikäämityt roottorit niiden kasvaneiden volyymien ansiosta. Kysymyksiä herättivät soluun tulevien muutosten takaisinmaksuaika sekä kuinka parantaa solun tuottavuutta, jotta investointi olisi kannattava. Ongelmana oli myös robottisolussa esiintyvät häiriöt, jotka tulevaisuudessakin laskisi tuottavuutta.

Opinnäytetyössä tutkittiin roottorirobottisolun toimintaa, jotta häiriöiden syyt saatiin selville. Tämän jälkeen eri vaihtoehtoja testattiin häiriöiden poistamiseksi. Työssä laskettiin soluun tehtävien muutosten takaisinmaksuaikoja ja annettiin ehdotuksia solun tuottavuuden parantamiseksi arvioitujen prosessiaikojen pohjalta. Lisäksi käytössä olleesta robottisolusta tehtiin simulointimalli ABB Robot Studio -ohjelmaa käyttäen.

Työn tuloksena saatiin häiriöiden syyt selville sekä suurin osa niistä poistettua. Tuloksina saatiin myös realistinen takaisinmaksuaika uuden solun muutosten investoinnille, ehdotuksia solun tuottavuuden parantamiseen sekä toimiva simulointimalli.

Tämän työn perusteella havaittiin muun muassa, että tavoite 2-3 vuoden takaisinmaksuajasta on vaikea, mutta mahdollista saavuttaa ja kuinka monia asioita on otettava huomioon suunniteltaessa uutta automaattisolua aina oikean robottityypin valinnasta lähtien.

## ABSTRACT

Author	Toni Joensuu
Title	Development of the Rotor Robot Unit
Year	2016
Language	Finnish
Pages	49+ 2 Appendices
Name of Supervisor	Mika Billing

---

The objective of this thesis was to develop already existing rotor robot unit in ABB Ltd. Motors and Generators in Vaasa. The purpose was to improve the flexibility of the robot unit that was manufacturing only synchronous reluctance rotors. That is why there was willingness for shaft pressing, turning and balancing 160-200 mm shaft height of the squirrel cage rotors in electric motors because of their increased demand. Questions that came up were how long the payback time of upcoming modifications of the unit is and how to increase its productivity in order the investment to be profitable. The problem was also disturbances of the unit that would decrease productivity of the unit also in the future.

In this thesis the functionality of the robot unit was first studied in order to map the reasons for disturbances. After that different options were tested in order to remove the disturbances. The payback times of the upcoming modifications of the unit were calculated and suggestions were given in order to increase the productivity. The suggestions were based on estimated process times. Furthermore a simulation model was made of the existing robot unit.

The result of the thesis was that reasons for the disturbances were discovered and most of them were removed. The realistic payback time of the investment of the modifications in the upcoming unit was calculated. Also the suggestions in order to improve the profitability unit were given as well as a functional simulation model.

The conclusions of this work were among other things it is difficult but possible to reach the aimed 2-3 years payback and many things have to be taken into account when planning to new automation unit since the selection of right robot model.

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuvio 1.</b> ABB:n valmistaman oikosulkumoottorin aukileikkaus.	12
<b>Kuvio 2.</b> Roottorin häkkikäämitys.	14
<b>Kuvio 3.</b> ABB:n valmistamia häkkikäämittyjä roottoreita.	15
<b>Kuvio 4.</b> Tuurnalle ladottu roottorilevypaketti	16
<b>Kuvio 5.</b> Vasemmalla puolella levypaketti alamuotin päällä ja oikealla puolella sulan alumiinin annostelu.	17
<b>Kuvio 6.</b> Roottoripaketti, jossa häkkikäämitys tuuletinsiipeineen ja tasapainotustappeineen.	17
<b>Kuvio 7.</b> Akselin puristus roottoripakettiin	18
<b>Kuvio 8.</b> 4-napainen roottorilevy. /5/	19
<b>Kuvio 9.</b> Sorvaamaton ja tasapainottamaton synkronireluktanssiroottori	20
<b>Kuvio 10.</b> Takaisinkytketty säätöjärjestelmä. /8/	22
<b>Kuvio 11.</b> Kuuden vapausasteen kiertyvänivelinen robotti. /7/	24
<b>Kuvio 12.</b> ABB:n valmistama kuuden vapausasteen kiertyvänivelinen robotti. /1/	25
<b>Kuvio 13.</b> ABB:n valmistama Scara –robotti. /1/, /9/	26
<b>Kuvio 14.</b> ABB:n valmistama rinnakkaisrakenteinen robotti. /1/	26
<b>Kuvio 15.</b> Vasemmalla portaalirobotti ja oikealla robotti kiinnitettynä työalueeseen. /9/, /13/	27
<b>Kuvio 16.</b> Kuuden vapausasteen kiertyvänivelisen robotin kinemaattinen ketju. /24/	28
<b>Kuvio 17.</b> Esimerkki robottiturvallisuuden standardeista. /18/	31
<b>Kuvio 18.</b> Robottisolun häiriöitä.	33
<b>Kuvio 19.</b> Robotin työkalulaippaan kiinnitetty runko, tarraimien rungot sekä tarraimet.	35
<b>Kuvio 20.</b> Komponentteja ja robotin paikoituspisteitä.	36
<b>Kuvio 21.</b> Robottisolun valmis simulointiympäristö.	36
<b>Kuvio 22.</b> Osa robotin alkuperäisestä ohjelmasta.	37
<b>Kuvio 23.</b> Osa robotin ohjelmasta muokkauksen jälkeen.	37
<b>Kuvio 24.</b> Robotin kulunut akselitarrain.	40
<b>Kuvio 25.</b> "Kuppi", joka vastaanottaa tuurnan.	41

## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Robottisolun toiminnankuvaus.

**LIITE 2.** Takaisinmaksulaskelmat ja arvioidut prosessiajat.

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ABB	Asea Brown Broweri
3D	Kolmiulotteinen
DOF	Vapausaste (Degree of freedom)
IGES	Tiedostoformaatti 3D-malleille (Initial Graphics Exchange Specification)
SAT	Tiedostoformaatti 3D-malleille (Standard ACIS Text)
STEP	Tiedostoformaatti 3D-malleille
STL	Tiedostoformaatti 3D-malleille (StereoLithography)

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	9
2	YRITYSESITTELY ABB.....	10
	2.1 ABB:n historia Suomessa .....	10
	2.2 ABB Oy Motors and Generators, Vaasa.....	11
3	SÄHKÖMOOTTORI .....	12
	3.1 Rakenne.....	12
	3.2 Kolmivaiheinen oikosulkumoottori .....	13
4	ROOTTORI.....	14
	4.1 Häkkikämmetty roottori.....	14
	4.1.1 Valmistus .....	15
	4.2 Synkronireluktanssi roottori.....	18
	4.2.1 Valmistus .....	19
5	KAPPALETAVARA-AUTOMAATIO .....	21
	5.1 Tuottavuuden parantaminen automatisoinnilla.....	22
	5.2 Teollisuusrobotiikka .....	23
	5.2.1 Rakenne.....	24
	5.2.2 Kinematiikka.....	27
	5.2.3 Etäohjelmointi ja simulointi.....	28
	5.3 Turvallisuus.....	30
6	ROBOTTISOLUN TOIMINNAN KUVAUS.....	32
	6.1 Komponentit ja toiminta .....	32
	6.2 Ongelmat.....	33
	6.2.1 Häiriöt .....	33
	6.2.2 Joustavuus .....	34
	6.3 Tavoitteet .....	34
7	SIMULOINNIN TOTEUTUS.....	35
8	HÄIRIÖIDEN POISTO.....	39
9	JOUSTAVUUDEN PARANTAMINEN .....	42

10	LOPPUPÄÄTELMÄT .....	45
10.1	Työn tulokset .....	45
10.2	Jatkotoimenpiteet .....	45
	LÄHTEET .....	47

## LIITTEET



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena oli roottorirobottisolun kehittäminen ABB Oy Motors and Generators yksikössä. Robottisolussa valmistettiin 160-250 mm sähkömoottoreiden synkronireluktanssi roottoreita. Työ rajattiin solussa esiintyvien häiriöiden syiden selvittämiseen sekä mahdollisten ratkaisujen ehdottamiseen. Koska synkronireluktanssiroottoreiden volyyymi oli pieni, haluttiin robottisoluun tehtävän muutoksia, joilla kyettäisiin aksiloimaan valurautaisia häkkikäämittyjä 160-250 mm kokoluokkien roottoreita. Työn rajaukseen kuului myös robottisolun tulevien muutosten arviointi.

ABB:n Västeråsin moottoritehdas Ruotsissa lakkautettiin sähkömoottoreiden kokoonpano ja osa sen moottorinvalmistuksesta siirrettiin Vaasaan. Siirron myötä Vaasan moottoritehtaan volyymit 71-250 mm kokoluokan moottorinvalmistuksessa ovat kasvaneet ja odotetaan yhä kasvavan. Tämä tarkoittaa sitä, että myös häkkikäämittyjen roottoreiden tarve on kasvanut ja odotetaan kasvavan myös tulevaisuudessa. Roottoreiden aksilointi, sorvaus sekä tasapainotus teetetään alihankkijalla, mutta volyymien kasvu on mahdollistanut uuden investoinnin tekemisen. Tällä investoinnilla pyritään siihen, että voidaan valita, kuinka riippuvaisia halutaan olla alihankkijasta.

## 2 YRITYSESITTELY ABB

ABB Oy on yksi suurimmista sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymistä. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Sveitsin Zurichissä. ABB jakautui aiemmin viiteen eri divisioonaan, mutta 01.01.2016 voimaantulleen divisioonakevennyksen myötä ABB jakautuu neljään eri divisioonaan: Power Grids (PG), Electrification Products (EP), Process Automation (PA) sekä Discrete Automation and Motion (DM). Yrityksen palveluksessa on noin 135 000 henkilöä noin 100 eri maassa, joista Suomessa työskentelee noin 5100 henkilöä. Liikevaihto vuonna 2015 oli 35,5 miljardia dollaria. Yhtiön liikevaihto laski vuodesta 2014 noin 4,3 miljardia dollaria. ABB Oy on nykyään maailman markkinoilla yksi johtavista tuuliturbiinigeneraattoreiden, sähköverkkojen, sähkömoottoreiden ja taajuusmuuttajien toimittajista. /2/

### 2.1 ABB:n historia Suomessa

Vuonna 1889 Gottfird Strömberg perusti ensimmäisen sähkötekniikan alan verstaansa Helsingin Kamppiin. 1890-luvulla Helsingin Sörnäisissä avattiin Strömbergin uusi tehdas, jossa alettiin valmistaa myös sähkömoottoreita. Vuonna 1909 Strömbergistä tuli osakeyhtiö Oy Gottfr. Strömberg Ab. 1930-luvulla tuotanto siirtyi Helsingin Pitäjänmäelle, jonne perustettiin myös yhtiön oma konepajakoulu. 1940-luvulla yhtiö valmisti monen muun suomalaisen yhtiön tavoin sotatarvikketa jatkosotaa varten, joten toimintaa siirrettiin Vaasaan, koska sen katsottiin olevan Helsinkiä turvallisempi paikka sotatarvikkeiden valmistukselle. Vuonna 1980 Strömberg fuusioitui yhtiön Kymi-Kymmenen kanssa, minkä myötä yhtiön nimeksi tuli Kymi-Strömberg. Vuonna 1983 Strömberg siirtyi ruotsalaisyhtiö Asean omistukseen ja vuonna 1988 se yhdistyi sveitsiläisen Brown Boverin kanssa. Fuusion myötä syntyi ABB-yhtymä. /20/, /21/

## **2.2 ABB Oy Motors and Generators, Vaasa**

ABB Oy Motors and Generators liiketoimintayksikkö kuuluu kansainväliseen Discrete Automation and Motion divisioonaan. Yksikkö kehittää ja valmistaa sähkömoottoreita ja generaattoreita teollisuuteen ja sovelluksiin maailmanlaajuisesti. Suomessa yksikön tehtaot sijaitsevat Vaasassa sekä Helsingissä.

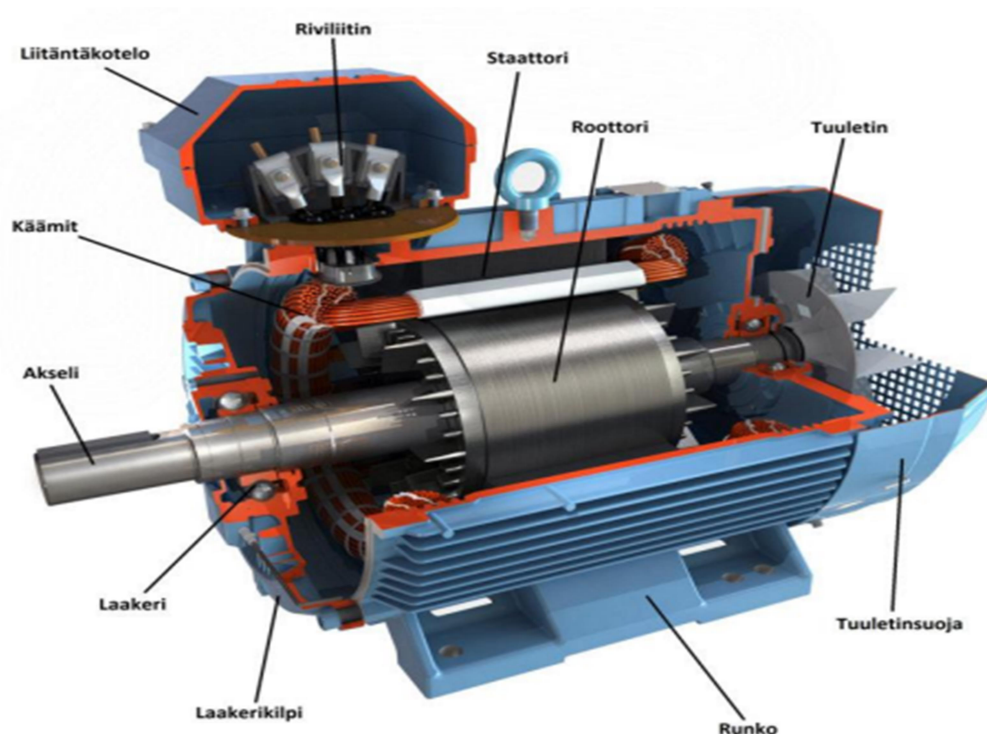
Vaasan tehdas kehittää ja valmistaa asiakasräätälöityjä valurauta- ja alumiinimoottoreita. Vaasan tehtaalla on maailmanlaajuinen vastuu erikoistilaus – sekä räjähdysvaarallisten tilojen pienjännitemoottoreista. Tehtaalla työskentelee noin 590 työntekijää. Valmistettavien sähkömoottoreiden akselikorkeudet vaihtelevat 71-450 millimetrin välillä. Akselikorkeus mitataan moottorin jalasta akselin keskikohtaan.

### 3 SÄHKÖMOOTTORI

Sähkömoottori on sähkökone, joka muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Yleisimmät konetyypit ovat epätahti-, tahti- ja tasavirtakoneet. Vaihtovirtakoneiden eli epätahti- ja tahtikoneiden toiminta perustuu koneen sisällä pyörivään magneettikenttään. /4/, /23/

#### 3.1 Rakenne

Kaikista normaalirakenteisista koneista voidaan erottaa perusosat, vaikka koneita onkin useita eri tyyppisiä. Perusosat ovat: pyörijä eli pyörivä roottori akseleineen, seisija eli staattori, laakerikilvet sekä laakerit. Laakereiden varassa staattoriaukossa on roottori. Ilmarako, joka on roottorin ja staattorin välissä mahdollistaa roottorin vapaan pyörimisen. Laakerit on kiinnitetty laakerikilpiin, jotka kannattelevat roottoria. Laakereina voidaan käyttää rulla-, kuula tai liukulaakereita. Staattori on prässätty staattorirungon sisälle, johon laakerikilvet on kiinnitetty. Käämitykset, joiden muoto ja rakenne vaihtelevat konetyypin mukaan, sijaitsevat staattorissa ja roottorissa. Syöttökaapeli kytketään koneen päällä tai sivussa sijaitsevaan liitinkoteloon. Kuviossa 1 on esitetty ABB:n oikosulkumoottorin rakenne. /4/



**Kuvio 1.** ABB:n valmistaman oikosulkumoottorin aukileikkaus.

### 3.2 Kolmivaiheinen oikosulkumoottori

Vaihtosähkökoneille yhteinen tekijä on se, että niiden staattoriin on saatava pyörivä magneettikenttä. Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin toiminnan edellytys on pyörivä magneettikenttä, joka syntyy itsestään ilman lisälaitteita kolmivaihekäämityksen ja vaihtovirran avulla. Roottorin navat ovat oikosuljettuja keskenään roottorissa olevien oikosulkurenkaiden avulla, josta tulee nimitys oikosulkumoottori. Kun kolmivaihevirta syötetään staattorin käämiin, syntyy pyörivä magneettikenttä, joka indusoi roottorin häkkikäämitykseen virran ja samalla magnetoi roottorin. Roottorin magneettikenttä alkaa seuraamaan staattorin magneettikenttää ja näin ollen roottori pyörii. Nimitys epätahtimoottori tulee siitä, että roottori pyörii staattorin magneettikenttää hitaammin. /4/, /23/

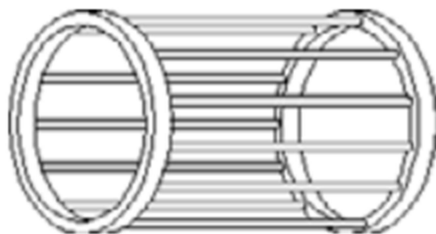
Oikosulkumoottorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, minkä vuoksi ne ovatkin hyvin suosittuja moottoreita. Ne ovat myös taloudellisia ja pitkäikäisiä. /23/

## 4 ROOTTORI

Roottori eli pyörijä on sähkömoottorin pyörivä osa. Roottorit voivat olla rakenteeltaan hyvin erilaisia ja siksi niiden valmistusprosessitkin eroavat toisistaan. Tässä luvussa esitellään opinnäytetyön kannalta kahden eri roottorin rakennetta sekä niiden valmistusprosesseja ABB Motors and Generators yksikössä.

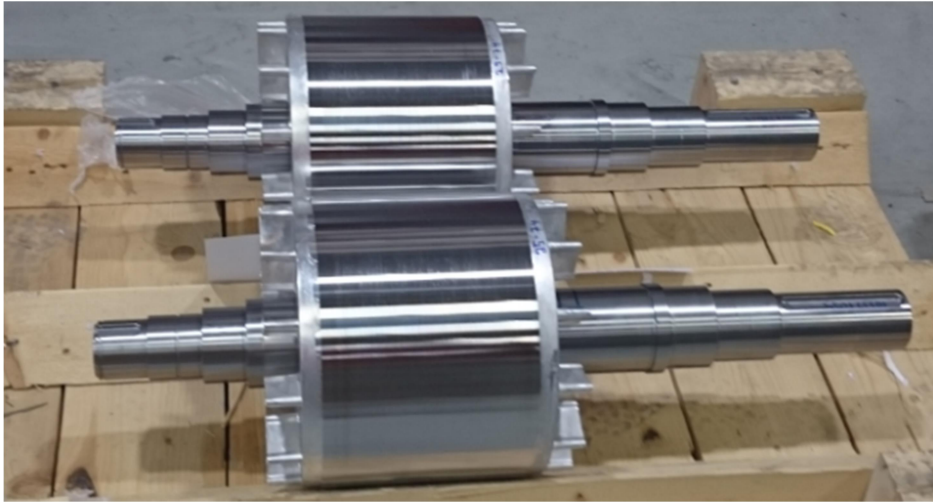
### 4.1 Häkkikäämitty roottori

Häkkikäämitty roottori on teollisuudessa ylivoimaisesti yleisin roottori. Häkkikäämityn roottorin rakenteeseen kuuluvat akseli sekä sähkölevyt, jotka ovat lakkapinnoitettuja 0,5 mm paksuja rautalevyjä. Lakkapinnoitus eristää sähkölevyt toinen toisistaan, jotta ne eivät johtaisi sähköä. Häkkikäämityn roottorin rakenteeseen kuuluu myös itse häkkikäämitys, joka on valettu alumiinista. Roottorin häkkikäämitys voi olla tehty myös kuparisauvoista, jolloin ne on juotettu kiinni oikosulkurenkaisiin. Kuviossa 2 oikosulkumoottorin roottorin häkkikäämitys. /4/



**Kuvio 2.** Roottorin häkkikäämitys.

ABB Motors and Generators -yksikössä häkkikäämittyjen roottoreiden häkkikäämitys tehdään valamalla alumiinia roottorin uriin ja samalla syntyy levypaketin molempiin päihin oikosulkurenkaat, jotka oikosulkevat roottorin käämiin indusoituneen virran ja näin ollen roottori magnetoituu. Kuviossa 3 ABB:n valmistamia alumiinista valettuja häkkikäämittyjä roottoreita.



**Kuvio 3.** ABB:n valmistamia häkkikämmittyjä roottoreita.

#### **4.1.1 Valmistus**

Häkkikämmitty roottori voidaan valmistaa eri tavoin. ABB Motors and Generators yksikössä valmistetaan 280-450mm:n häkkikämmityt roottorit. Alihankkijalta tilattavat osat ovat: akseli, alumiiniharkot, jotka sulatetaan sulatusuunissa sekä sähkölevyt, jotka uritetaan omassa urittamossa. Roottorinvalmistuksesta voidaan erottaa tietyt vaiheet: roottorilevyjen ladonta, valaminen, aksilointi, sorvaus sekä tasapainotus.

Ladonnassa roottorilevyt ladotaan tuurnalle maksimissaan 30 mm nipuissa. Jokaista levynippua käännetään noin 90 astetta edelliseen nähden levyn urajako huomoiden. Käännöllä kompensoidaan levyjen paksuusvaihtelun sekä valssaussuunnan vaikutusta roottorin mekaanisiin ja sähköisiin ominaisuuksiin. Lisäksi kääntämisellä minimoidaan selvitysurasta johtuva roottorin epätasapaino. Kuviossa 4. tuurnalle ladottu levypaketti. Ladonnan jälkeen tarkistetaan valmiiksi ladotun paketin pituus ladontapuristimessa puristuksen alaisena. Tarvittaessa poistetaan tai vähennetään levyjä paketista, kunnes paketin pituus on oikea.



**Kuvio 4.** Tuurnalle ladottu roottorilevypaketti

Valmis levypaketti siirretään valukoneen alamuotin päälle (**Kuvio 5.**). Valaminen tapahtuu automaattisesti:

1. Alamuotti ja roottoripaketti siirtyvät koneeseen.
2. Muotit sulkeutuvat ja peltisuoja laskeutuu alas.
3. Sula alumiini annostellaan sylinteriin (**Kuvio 5.**).
4. Ruiskutussylinteri siirtyy alamuotin alle.
5. Lopuksi tapahtuu ruiskutus ja varsinainen valu, jolloin roottoriin muodostuu ns. häkkikäämitys ja oikosulkurenkaat tuuletinsiipineen ja tasapainotustappeineen (**Kuvio 6.**).





**Kuvio 5.** Vasemmalla puolella levypaketti alamuotin päällä ja oikealla puolella sulan alumiinin annostelu.



**Kuvio 6.** Roottoripaketti, jossa häkkikäänitys tuuletinsiipeineen ja tasapainotustappeineen.

Valamisen jälkeen akseli puristetaan roottoriin (**Kuvio 7.**). Akselireikään sivellään rasvaa puristusta helpottamaan. Akseli puristetaan puristimella A-mittaa, joka tarkoittaa mitta akselin D-pään laakeriolakkeesta levypaketin päähän.



**Kuvio 7.** Akselin puristus roottoripakettiin

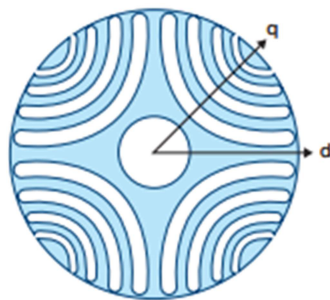
Aksiloinnin jälkeen roottoripaketti menee jäähdytystunnelin läpi sorvaukseen. Ennen sorvausta tarkistetaan akselin suoruus ja tarvittaessa oikaistaan. Roottorin pakettiosa sorvataan. Tämän jälkeen roottori tasapainotetaan lisäämällä tasapainotuskiekkoja roottoripaketissa oleviin tasapainotustappeihin tasapainotuskoneen osoittamaan paikkaan.

#### 4.2 Synkronireluktanssi roottori

Synkronireluktanssi roottori on rakenteeltaan yksinkertaisempi kuin häkkikäämitty roottori. Synkronireluktanssi roottori ei sisällä häkkikäämitystä häkkikäämityn rottorin tavoin, joten sen rakenne koostuu käytännössä vain sähkölevyistä sekä akselistä.

Synkronireluktanssi roottorin toimintaperiaate eroaa häkkikäämitystä roottorista. Koska synkronireluktanssi roottorissa ei ole käämityksiä, virta ei pääse indusoitumaan roottoriin. Staattorin käämeihin syötetty kolmivaihevirta luo pyörivän magneettikentän sen ympärille, jota roottori lähtee seuraamaan, jolloin roottori pyörii. Synkronireluktanssi roottorin toimintaan vaikuttaa olennaisesti sen roottorin toiminta. Toimintaperiaatteeseen liittyy olennaisesti permeanssi, joka

tarkoittaa magneettista johtavuutta sekä reluktanssi, joka tarkoittaa puolestaan magneettista vastusta eli se on permeanssin käänteisarvo. Roottorilevyn ilmavälit aiheuttavat suuren reluktanssin. Kuviossa 8 d-akseli kuvaa akseleita, joilla on suuri permeanssi ja q-akseli kuvaa akseleita, joilla on suuri reluktanssi eli suuri magneettinen vastus. Kun staattorin synnyttämä magneettikenttä pyörii, roottori pyrkii löytämään pienimmän reluktanssin omaavan akselin magneettiselle johtavuudelle, joka on d-akseli. Tämä tarkoittaa sitä, että staattorin magneettikenttään nähden roottori pyörii synkroninopeudella pienentäen reluktanssia magneettisessa piirissä, mistä tulee nimitys synkronireluktanssi. /4/, /5/

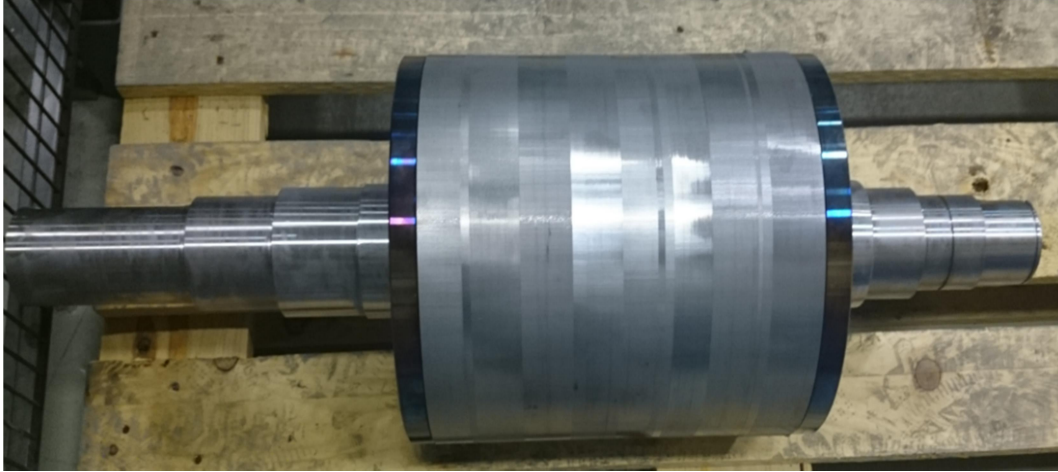


**Kuvio 8.** 4-napainen roottorilevy. /5/

#### 4.2.1 Valmistus

Koska synkronireluktanssiroottorin rakenne on yksinkertaisempi, on sen valmistaminenkin yksinkertaisempaa. 160-250 mm:n moottoreiden synkronireluktanssiroottorit valmistetaan ABB Motors and Generators yksikössä siihen tarkoitettuun robottisolussa, jonka toiminnankuvausta esitellään tarkemmin luvussa yhdeksän sekä liitteessä 1. Robottisolun puristin puristaa akselin levypaketin läpi, jonka molemmille puolille puristetaan päätyrenkaat, joiden tarkoitus on pitää levypaketti kasassa. Valmistukseen kuuluu myös roottorin pakettiosan sorvaus sekä tasapainotus, jossa ei lisätä tasapainotuskiekkoja niin kuin häkkikämmittyyn roottoriin vaan porataan reikiä synkronireluktanssiroottoreiden päätyrenkaisiin tasapainotuskoneen osoittamiin

paikkoihin. Kuviossa 9 sorvaamaton ja tasapainottamaton synkronireluktanssiroottori.



**Kuvio 9.** Sorvaamaton ja tasapainottamaton synkronireluktanssiroottori

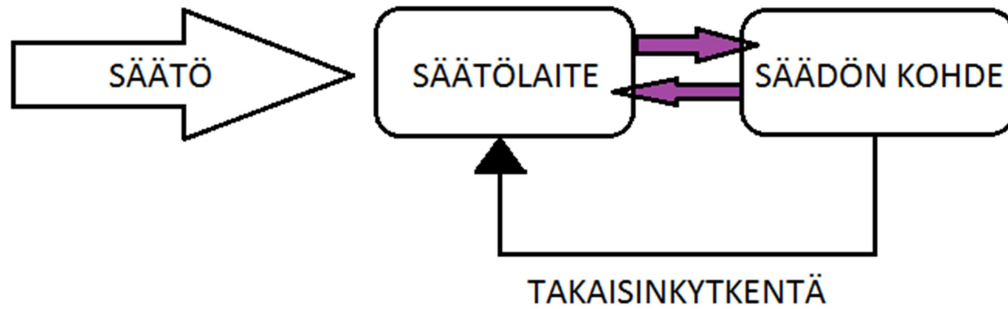
## 5 KAPPALETAVARA-AUTOMAATIO

Suomen automaatioseura määrittelee automaation seuraavasti: "Automaatio tulee kreikankielisestä sanasta automatos, joka tarkoittaa itsetoimivaa. Automaatiossa toiminta tapahtuu ilman ihmisen ohjaavaa tai suorittavaa osuutta. Automaatti on automaattisesti eli itsestään toimiva kone tai laite. Automaatio käsitetään usein vain teollisuuden koneistojen ja prosessien automaatioksi, mutta itsestään toimivia laitteita ja järjestelmiä on myös kodeissa, liikenteessä, maanviljelyssä, luonnossa - miltei kaikkialla." /22/

Teollinen tuotanto jaetaan tyypillisesti prosessi- ja kappaletavarateollisuuteen. Prosessiteollisuudessa tuotanto on jatkuvaa virtaa päivästä sekä viikosta toiseen, kun taas kappaletavaratuotannossa keskitytään liikuttamaan suunniteltuja työvaiheita läpikäyviin yksittäisiin kappaleisiin. Kappaletavaratuotannon yksi tärkeä komponentti on robotti. Kappaletavara-automaatio on siis tekniikkaa, jolla käsitellään selvästi eroteltavia kappaleita. /8/, /17/

Automaatio perustuu säätötekniikkaan, jossa olennaisena toimii takaisinkytkentä eli takaisinkytketyn säädön periaate, jossa säädettävä kohde antaa käskyn tilanteen korjaukselle poikkeaman tapahtuessa. Säädettävän suureen mittausarvoa verrataan haluttuun arvoon ja ohjataan kohteen toimintaa erosta riippuen. Tässä tekniikassa systeemiä kuvataan laatikoilla, joilla on sisäänmeno (input) sekä ulostulo (output), joka on yleensä se, jota halutaan säätää muuttamalla sisäänmenoa. /8/

”Systeemiä kuvaavan laatikon eteen piirretään toinen laatikko, joka on säädin. Tämäkin on systeemi, jolla on ulostulo ja sisäänmeno. Säätimen ulostulo on ohajusviesti, joka kytketään suoraan edellä edellä mainitun kohdesysteemin sisäänmenoon. Säätimen sisäänmenona on puolestaan kohdesysteemin ulostulon ja sen tavoitearvon erotus.” Kuviossa 10 systeemin kuvaus. /8/



**Kuvio 10.** Takaisinkytketty säätöjärjestelmä. /8/

Automaation toimiva kokonaisuus rakentuu valmiiksi toteutetuista komponenteista esimerkiksi käyttöliittymistä, säätäjistä ja ohjausyksiköistä, jotka voidaan yhdistää toisiinsa. Automaatiossa yhdistetyt komponentit mahdollistavat laajojenkin tehtaiden ohjauksen, jolloin ihmisen tehtäväksi jää kokonaisprosessin valvonta. /8/

Olennaisesti vähentynyt työvoima verrattuna massatuotantoon ja mekanisoituun valmistukseen on seurausta sovelletusta automaatiosta. Automaatio on yleistynyt, sillä nykyään monet kokoonpano- ja valmistustyövaiheet ovat automatisoituja teollisuusrobottien tai erilaisten numeerisesti ohjattujen koneiden avulla. Nykyään myös valmiita kappaleita kuljetetaan automaattitrukeilla, automaattisilla kuljettimilla ja teollisuusroboteilla. /8/

### 5.1 Tuottavuuden parantaminen automatisoinnilla

Kansainvälisille markkinoille valmistettujen tuotteiden kilpailu on kiristynyt teollisuuden alalla, minkä takia melko nopeastikkaan valmistettu tuote ei enää riitä. Valmistusjärjestelmää on käytettävä tehokkaasti, jotta palkka- ja pääomakustannukset valmistettavaa kappaletta kohti saadaan minimoitua. Oikein toteutettuna automatisointi lisää yrityksen tuottavuutta ja näin ollen kilpailukykyä. /3/

Tuottavuuden parantamiseen automatisointi on hyvä keino. Teollisuudessa automatisoinnin tarkoituksena on usein saada tuotto-/panossuhdeluku korkeammaksi, joka on yksi tuottavuuden mittari. Esimerkiksi täysin automatisoidun solun, joka toimii 24 tuntia vuorokaudessa miehittämättömänä,

tuottavuus on todennäköisesti suuri. Tämä johtuu siitä, että tällaisen solun toiminta ei vaadi paljon panoksia eli tässä tapauksessa ihmisen työpanosta. On siis selvää, että automatisointia olisi tehtävä silloin, kun sille on tarvetta, joka voi olla myös automatisoinnilla suoritettava ihmiselle raskas tai vaarallinen työ. Automaattiset laitteet eivät pidä lomiam eikä taukoja, mikä on yksi syy sille, että ne voivat olla tuottavia verrattuna ihmiseen.

Jotta automatisoinnilla saataisiin tuottavuutta parannettua merkittävästi, olisi sen toimittava mahdollisimman häiriöttämiä. Toistuviin ja vaikeasti ratkottaviin häiriöihin saattaa kulua ihmiseltä paljon aikaa, jolloin tuottavuus laskee, koska tällöin tuotto-/panossuhdeluku laskee ihmisen suorittaman työn takia. Tuottava automaatio vaatii myös materiaalin virtausta prosessissa. Pullonkaulat saattavat estää esimerkiksi automaattiosolun tuottavuuden, jossa esimerkiksi ihmisen työpanoksella on olennainen merkitys materiaalivirran kannalta. Tällaisessa tapauksessa ihmisen työpanos ei riitä pysymään automaattiosolun määräämässä tahdissa, jolloin solun tuottavuus laskee.

## **5.2 Teollisuusrobotiikka**

”Määritelmän (ISO 8373) mukaan teollisuusrobotti on uudelleen ohjelmoitavissa oleva monipuolinen, vähintään kolminivelinen mekaaninen laite, joka on suunniteltu liikuttamaan kappaleita, osia, työkaluja tai erikoislaitteita ohjelmoitavin liikkein monenlaisten tehtävien suorittamiseksi teollisuuden sovelluksissa.” /12/

Robottijärjestelmä sisältää muitakin komponentteja robotin lisäksi. Näitä ovat muun muassa erilaiset anturit, ohjausjärjestelmä sekä muut toimilaitteet. Teollisuuden ulkopuolelle on puolestaan sijoitettu palvelurobotteja, joiden tarkoitus on edistää ihmisten tai laitteiden hyvinvointia. /12/

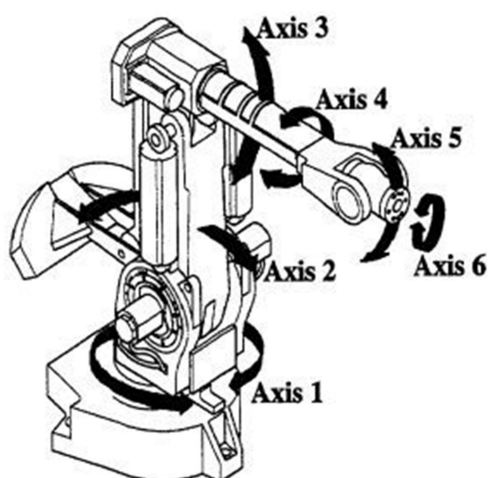
Robotiikka ja automaatio voivat monissa tilanteissa nostaa tuottavuutta, turvallisuutta, tehokkuutta sekä parantaa laatua. Robotit kykenevät toistamaan saman työvaiheen lukemattomia kertoja ilman laadun heikkenemistä. Robotit voivat työskennellä vaarallisissa ympäristöissä, esimerkiksi kuumissa, kylmissä

tai räjähdysvaarallisissa tiloissa. Robotit voidaan myös sijoittaa työtehtäviin, jotka ovat ihmiselle raskaita. Robotit saattavat viedä työpaikkoja lyhyellä tähtämellä, mutta ne eivät korvaa pelkästään ihmistä vaan mahdollistaa laadukkaan tuotannon sekä kilpailukyvyn parantamisen. /14/, /15/, /18/

Teollisuusrobotti on siis mekaaninen kone, jonka kiinnityslaipassa työkalu on kiinni. Tätä kiinnityslaippaa robotti siirtää työalueella halutulla tavalla. Liikerata voidaan määrittää eri tavoin, sillä se voidaan valita toimintaympäristön tapahtumien tai liikkeiden aikana antureiden perusteella. Liikerata voidaan myös määrittää kokonaan etukäteen. Robotissa olevat tukivarret on liitetty toisiinsa nivelillä, joita servotoimilaitteet liikuttavat. Servotoimilaitteet ovat takaisinkytketysti ohjattavia. /8/

### 5.2.1 Rakenne

Toistensa suhteen liikkuvat tukivarret voivat liikkua lineaariliikkeellä eli suoraan jonkun suoran suuntaisesti tai kiertoliikkeellä eli suoran ympäri. Tukivarret muuttavat asentojaan ja asemiaan toistensa suhteen nivelien avulla. Robotin perusliikettä eli niveltä kutsutaan robotin vapausasteeksi (DOF, degree of freedom). Kuviossa 11 kuusiakselinen eli kuusi vapausastetta omaava kiertyvänivelinen robotti. Robotin käyttötarkoitus tulisi määrätä vapausasteiden määrän, koska aina ei ole tarvetta monelle vapausasteelle. /15/, /18/



**Kuvio 11.** Kuuden vapausasteen kiertyvänivelinen robotti. /7/



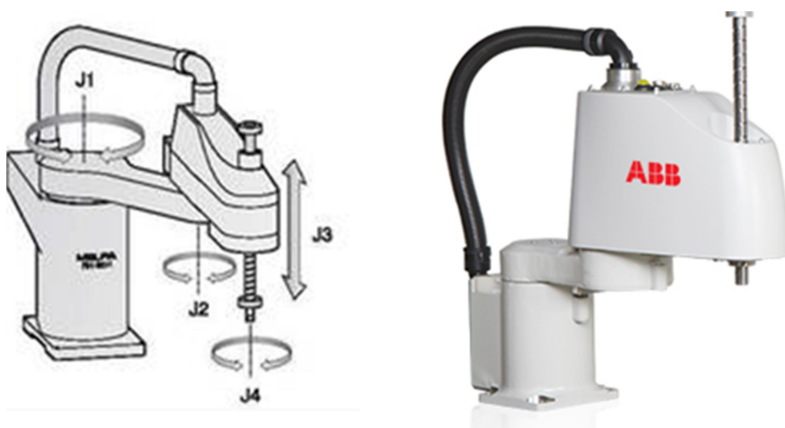
Teollisuusrobottityyppejä on monia erilaisia ja ne yleensä jaetaan perusrakenteensa ja liikekoordinaatistonsa mukaan luokkiin. Eri teollisuusrobottityyppejä ovat kiertyväniveliset robotit, SCARA -robotit (Selective Compliance Assembly Robot Arm), rinnakkaisrakenteiset robotit sekä suorakulmaiset robotit. /18/

Kiertyvänivelisessä robotissa saattaa olla jopa seitsemän vapausastetta, mutta tavallisemmin neljä tai kuusi. Robotin vapausasteet ovat kiertyviä, joten sen ulottuvuus on hyvä. Kiertyväniveliset robotit ovat monipuolisia, minkä takia ne ovat hyvin yleisiä teollisuudessa. Kuviossa 12 kiertyvänivelinen robotti, jolla kuusi vapausastetta. /18/



**Kuvio 12.** ABB:n valmistama kuuden vapausasteen kiertyvänivelinen robotti. /1/

Scara –robotti liikkuu kuin ihmisen käsivarsi vaakatasossa. Lisäksi sen ranteessa on pystyliike. Robotti soveltuu hyvin esimerkiksi kappaleiden poistoon kuljettimelta tai kokoonpanoon, jossa käsitellään pieniä kappaleita. Kuviossa 13 Scara –robotti. /18/



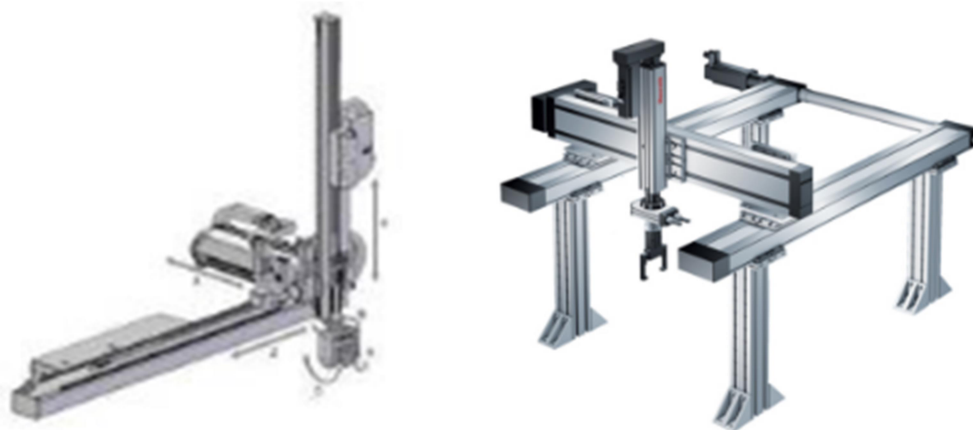
**Kuvio 13.** ABB:n valmistama Scara –robotti. /1/, /9/

Robotin liikeakselit rinnakkainkytkemällä saadaan aikaan rinnakkaisrakenteinen robotti, joka on rakenteeltaan tukeva ja näin ollen kestää suuriakin kuormia. Kuviossa 14 on kevytrakentaisempi rinnakkaisrakenteinen robotti, jonka etuina ovat sen nopeus sekä tarkkuus ja sitä käytetään kappaleiden poimintasovelluksissa. /18/



**Kuvio 14.** ABB:n valmistama rinnakkaisrakenteinen robotti. /1/

Suorakulmaista robottia eli portaalirobottia, jonka kolme ensimmäistä vapausastetta ovat lineaarisia, voidaan käyttää kappaleiden siirtelyyn esimerkiksi logistiikassa tai työstökoneita varten. Rakenne voi olla kiinnitetty jonkin koneen runkoon tai palkeilla työalueen nurkista kuvion 15 osoittamalla tavalla. /18/

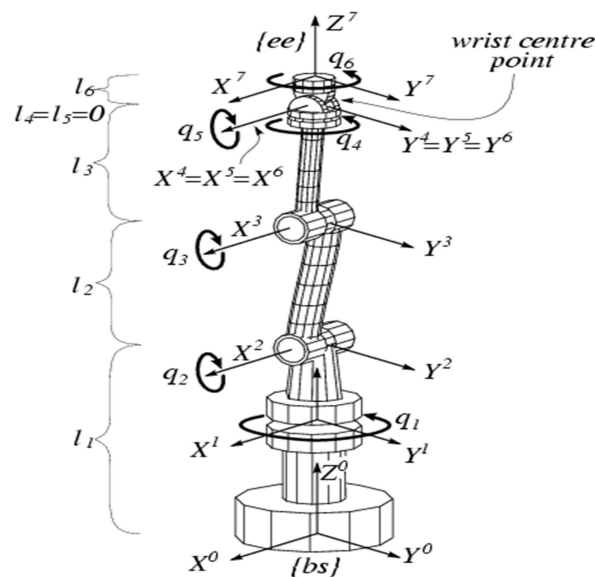


**Kuvio 15.** Vasemmalla portaalirobotti ja oikealla robotti kiinnitettyä työalueeseen. /9/, /13/

### 5.2.2 Kinematiikka

Kinematiikka on mekaniikan ala, joka kuvaa pisteiden, kappaleiden ja kokonaisuuksien liikkeitä, kuten esimerkiksi asemia, nopeuksia ja kiihtyvyyksiä huomioimatta massoja ja voimia, jotka ovat mahdollisesti aiheuttaneet liikkeen. /11/

Robotin tukivarret voidaan kytkeä joko toistensa perään eli avoimeksi kinemaattiseksi rakenteeksi tai rinnakkain eli suljetuksi kinemaattiseksi rakenteeksi. Kuviossa 16 on 6 akselisen kiertyvänivelisen robotin kinemaattinen ketju, jossa alin koordinaatisto on maailman koordinaatisto, toiseksi alin on peruskoordinaatisto ja ylimpänä työkalukoordinaatisto. Kuviossa 16 kinemaattinen ketju alkaa peruskoordinaatistosta ja päättyy työkalukoordinaatistoon. Avoin kinemaattinen rakenne on suljettua kinemaattista rakennetta yleisempi. /16/, /18/



**Kuvio 16.** Kuuden vapausasteen kiertyvänivelisen robotin kinemaattinen ketju. /24/

Suljetussa kinemaattisessa rakenteessa tietyille nivelen kulmamuuttujalle annetaan arvo, jolloin muutkin kulmamuuttujat saavat arvot automaattisesti. Avoimessa kinemaattisessa rakenteessa puolestaan annetaan jokaiselle nivelelmuuttujalle arvot erikseen, mutta tällöin ei ole varmuutta, onko robotin työkalun kärki halutussa asemassa. Tämän takia robotin täytyy pystyä laskennallisesti muuttamaan haluttu työkalun asema oikeiksi nivelien paikkaohjearvoiksi. Tätä kutsutaan käänteiseksi kinemaattiseksi tehtäväksi. Haluttu työkalun asema voidaan määrittää myös paikka-arvojen perusteella. Tätä kutsutaan suoraksi kinemaattiseksi tehtäväksi. Matriisilaskentaa sekä trigonometrisia tarvitaan kinematiikassa. /12/, /18/

### 5.2.3 Etäohjelmointi ja simulointi

Robotin ohjelmointi voidaan suorittaa joko etäohjelmoinnilla eli off-lineohjelmoinnilla tai on-lineohjelmoinnilla robotin käsiohjaimen avulla. Etäohjelmointi suoritetaan tuotannon ulkopuolella olevalla tietokoneohjelmistolla, joten tuotanto ei pysähdy. 3D-mallipohjaisessa ohjelmoinnissa hyödynnetään 3D-mallien muototietoja, joiden avulla voidaan luoda liikeratoja. Etäohjelmointi

voidaan suorittaa myös tekstipohjaisena eli koodaamalla ohjelma tekstieditorilla. Ohjelma voidaan siirtää robotille joko muistitikun tai tietoverkon avulla. /6/, /16/

Etäohjelmointi auttaa kehitystyössä, koska:

1. Kiinnitinsuunnitteluvaiheessa alkaa robotin ohjelmointi.
2. Ohjelmointi saadaan valmiiksi jo ennen ensimmäistä valmistettua tuote- tai kiinnitinprototyyppiä.
3. Valmistus alkaa ohjelmoinnin sijaan koneiden tullessa tuotantotilaan.
4. Ohjelmien ollessa valmiina, tuotemuutoksien asetusajat putoavat merkittävästi. /16/

Tietokonesimuloinnissa mallinnetaan reaali maailma ja testataan esimerkiksi eri parametrien avulla mallin toiminnallisuutta. Tietokonesimulointi voidaan suorittaa graafisesti tai numeerisesti. Graafinen simulointi on robottisimuloinneissa tärkeää, koska sillä saadaan simulointikohteesta visuaalinen kuvan. /16/

Solun suunnittelu on järkevää aloittaa tekemällä simulointimalli. 3D-malli mallinnetaan tuotantolinjasta tai sen osasta. Muista komponenteista voidaan myös luoda 3D-mallit, jos niitä ei ole valmiita 3D-malleja. 3D-mallit voidaan siirtää simulaatioon. Tiedostomuodot, joita yleisesti käytetään simulaatioissa ovat: SAT, STEP, STL sekä IGES. Simulointiomalli mahdollistaa esimerkiksi erilaisten layout-vaihtoehtojen kokeilun, työkaluvaihtojen testauksen, ulottuvuustarkasteluja, oheislaitteiden ja kiinnittimien törmäystarkasteluja sekä tahtiaikojen arviointeja. /16/

Ennen investointipäätöstä, voidaan halutun laitteiston toimivuus testata simuloimalla. Tämä saattaa antaa varmuuden sille, mitä laitteita oikeasti halutaan ja näin ollen saatetaan säästää huomattaviakin summia rahaa. Esimerkiksi tarkastelemalla robotin ulottuvuuksia, voidaan valita oikea robottityyppi. /16/

### 5.3 Turvallisuus

Teollisuuteen on tullut uudenlaisia työtehtäviä sekä työskentelytapoja teollisuusrobottejen ja automaatiokoneiden yleistymisen myötä. Hyvin suunnitellussa järjestelmässä raskaat ja yksinkertaiset työvaiheet suorittaa kone ihmisen sijaan. Ihmisen vastuulle jää siis koneen ohjeilmointi, häiriöidenpoistot sekä huolto. Automaattikoneiden käyttöönotto antaa mahdollisuuden työn henkisen sekä ruumiillisen kuormittavuuden vähenetämiseen. Toisaalta, ainoastaan tuotannon näkökulmasta suunniteltu työympäristö ja työtehtävät saattaa aiheuttaa myös vaaratekijöitä, yksitoikkoisia työtehtäviä sekä henkistä kuormittavuutta. Turvallinen työpaikka olisi luotava yhdessä tuotannon tarpeiden tyydytysten kanssa. Ihmisen voi olla vaikea ymmärtää monimutkaista järjestelmää, mikä voi myös aiheuttaa vaaratilanteita. Ennen robottisolun käyttöönottoa sille täytyy tehdä CE – merkintä, riskiarviointi sekä turva-analyysi ja vaatimusmäärittelyt. /18/

Teollisuusrobotilla on usein suuret voimat ja nopeudet. Nämä yhdistettynä sen laajaankin liikealueeseen saattaa aiheuttaa vakavia vammoja tai jopa kuoleman. Vaaratilanteita saattaa aiheutua esimerkiksi ohjelmoitaessa robottia käsiohjaimella, jolloin mahdolliset muut työpisteen koneet saattavat käynnistyä ja näin ollen aiheuttavat vaaratilanteita. Robotti siis saattaa liikkua ennalta aavistamattomastikin, jolloin se voi myös vaurioittaa samassa työpisteessä olevia muitakin koneita. Robotin sähköiset -ja mekaaniset vauriot sekä sisäiset ohjelmistoviat saattavat myös aiheuttaa ongelmia. /18/

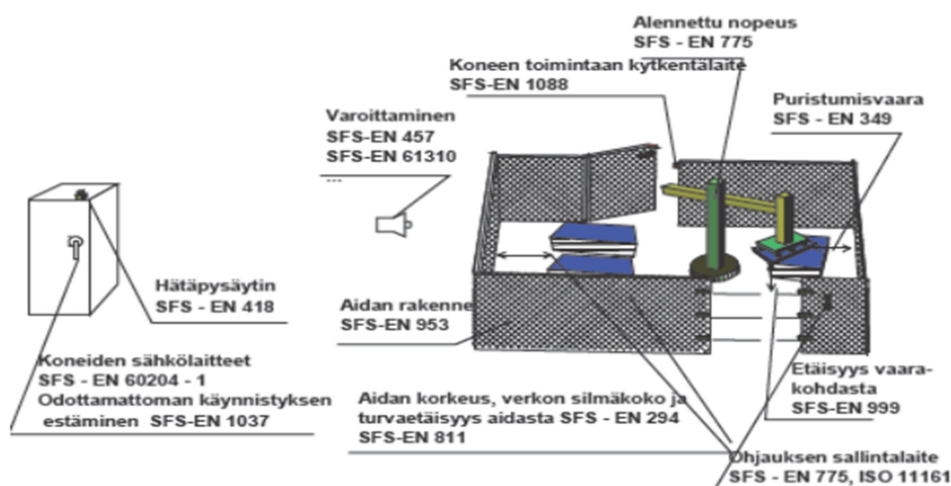
”Robottiturvallisuutta koskevat seuraavat standardit:

- SFS-EN ISO 11161 + A1 2010 Koneturvallisuus.Valmistusjärjestelmien koneyhdistelmät. Perusvaatimukset
- SFS-EN ISO 14121-1 2007 Koneturvallisuus. Riskin arviointi. Osa 1: periaatteet
- SFS-ISO/TR 14121-2 2010 Koneturvallisuus. Riskin arviointi. Osa 2: käytännön opastusta ja esimerkkejä menetelmistä

- SFS-EN 953 + A1 2009 Koneturvallisuus. Suojukset. Kiinteiden ja avattavien suojusten Suunnittelun ja rakenteen yleiset periaatteet
- SFS-EN 349 + A1 2008 Koneturvallisuus. Vähimmäisetäisyydet kehonosien puristumisvaaran välttämiseksi
- SFS-EN ISO 13857 2008 Koneturvallisuus. Turvaetäisyydet yläraajojen ja alaraajojen ulottumisen estämiseksi vaaravyöhykkeille
- SFS-EN ISO 10218-1 Teollisuusrobotit. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Robotti
- ISO-EN 10218-2 Robots for industrial environments, Safety requirements, Part 2 Robot systems and integration.” /16/

Robottisolun on valittavissa eri turvalaitteita ja niille on omat standardinsa, joita täytyy noudattaa. Kuviossa 17 on esitetty, kuinka eri standardeja voidaan käyttää.

/18/



**Kuvio 17.** Esimerkki robottiturvallisuuden standardeista. /18/

Ihmisten kouluttaminen ja asenteiden muuttaminen on tärkeä osa onnettomuuksien estämisessä. Uutta robottia kohtaan osoitetaan tietynlaista kunnioitusta, mutta välinpitämätön asenne syntyy ajan kuluessa, mikäli onnettomuuksia ei ole tapahtunut. /18/

## 6 ROBOTTISOLUN TOIMINNAN KUVAUS

Tässä luvussa käsitellään robottisolun toimintaa ja sen ongelmia. Lisäksi käsitellään ABB Motors and Generators –yksikön tavoitevolyyymeista.

### 6.1 Komponentit ja toiminta

Robottisolun tarkoituksena on valmistaa 160-250mm moottoreihin synkronireluktanssiroottoreita tasapainotusta ja sorvausta lukuunottamatta, mutta opinnäytetyön aikana sorvi ja tasapainotuskone tuotiin osaksi prosessia, jolloin roottorit voitiin sorvata sekä tasapainottaa. Valmistusprosessin pääkohtiin kuuluvat sähkölevyjen ladonta, akselin sekä päätyrenkaiden puristus roottorilevypakettiin. Robottisolun komponentit ovat: robotti, tuurna, akseliasema, päätyrengasmakasiini, induktiolämmitin, puristin sekä lavat valmiille roottoreille. Solusta löytyy myös kärry yhdelle epäonnistuneelle roottorille.

Työkierro sisältää monia eri vaiheita, joista tarkempi kuvaus liitteessä 1.

1. Roottorilevyt ladotaan käsin tuurna työkortissa ilmoitetun painon mukaan. Levyt ladotaan noin 30 mm:n nipuissa, jotka käännetään aina 90 astetta edelliseen nippuun nähden. Akseli asetetaan asemaan.
2. Kun ohjelma käynnistyy, robotti hakee akselin asemasta ja asettaa sen tuurnan päälle.
3. Robotti vie roottorilevyt, tuurna mukaanlukien sekä akselin puristinpöydälle.
4. Robotti hakee päätyrenkaan päätyrengasmakasiinista ja vie sen induktiolämmittimelle, minkä aikana puristin suorittaa paketin esipuristusta sekä mittausta levypaketille. Jos paketin mitta ei ole oikea, lisätään tai poistetaan levyjä koneen ilmoittama määrä.
5. Lämmitetty päätyrengas puristetaan akseliin, jonka aikana robotti hakee toisen päätyrenkaan ja vie sen induktiolämmittimelle.
6. Akseli ja päätyrengas puristetaan levyjen kanssa pakettiin.
7. Toinen päätyrengas puristetaan roottoripaketin toiselle puolelle.
8. Robotti hakee valmiin roottorin ja vie sen lavalle.



## 6.2 Ongelmat

Robottisolussa kiinnitettiin huomiota kahteen ongelmaan; häiriöihin sekä joustavuuteen. Nämä ongelmat vaikuttavat oleellisesti solun tuottavuuteen ja käytettävyyteen. Solun käyttöastetta nostettaessa olisi tärkeää, että solu toimisi mahdollisimman häiriöttömästi.

### 6.2.1 Häiriöt

Yleisimmät solussa esiintyvät häiriöt ovat akselin ja tuurnan välillä. Ladontavaiheen jälkeen robotti tarttuu vaakatasossa olevaan akseliin ja nostaa akselin ilmaan, jolloin akseli kääntyy pystytasoon. Kun robotti laskee akselin pystytasossa tuurnan päälle, akseli ei pääse asettumaan tuurnaan. Vastaavanlainen häiriö tapahtuu myös puristimella. Kun puristin laskee akselin tuurnan sisään, osuu akselin olake tuurnaan, jolloin akseli ei asetu tuurnaan. Lisäksi esipuristukseen ja mittaukseen laskeutuva puristin ei pääse laskeutumaan levypaketille asti, koska puristimen laskeutuessa akselin läpi, akseli osuu puristimessa olevan sylinterin reiän seinämään. Kuviossa 18 vasemmalla puolella akseli ei asetu tuurnaan ja oikealla puolella akseli osuu sylinterin reiän seinämään.



**Kuvio 18.** Robottisolun häiriöitä.

### 6.2.2 Joustavuus

Nykyisellä robottisolulla voidaan valmistaa vain synkronireluktanssiroottoreita, joiden volyyymi on pieni. Tämä tarkoittaa sitä, että robottisolun käyttöaste on pieni. Robottisolun haluttaisiin kykenevän aksiloimaan myös valuroottoreita, joiden volyymit ovat huomattavasti suuremmat kuin synkronireluktanssiroottoreiden. Työn aikana uudesta solusta tehtiin tarjouksia ja lopulta yksi tarjous hyväksyttiin. Kysymyksiä herättävät uuden investoinnin takaisinmaksuaika, johon olennaisesti liittyy se, kuinka paljon solulla voidaan tuottaa. Tuottavuuteen puolestaan liittyy mahdolliset pullonkaulat ja se, kuinka solua voisi vielä kehittää mahdollisimman kustannustehokkaasti. Soluun tehtävillä muutoksilla haluttaisiin olla riippumaton alihankkijan tekemästä työstä sekä laskea hintaa/roottori. Tavoite investoinnin takaisinmaksuajasta oli 2-3 vuotta.

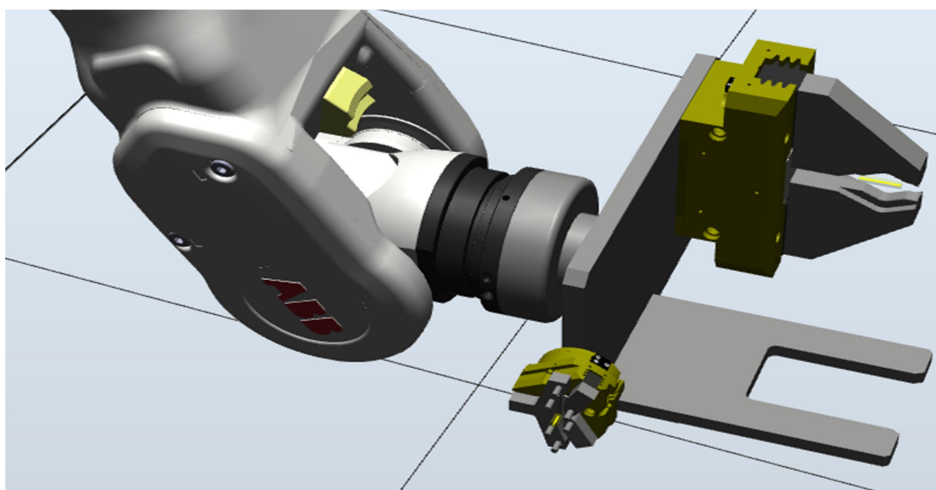
### 6.3 Tavoitteet

ABB Oy Motors and Generators -yksikössä pienmoottoreiden 71-250 mm akselikorkuisten alumiini- sekä valuratamoottoreiden volyymit ovat nousseet. 160-250 mm runkokokoisten moottoreiden, joihin kuuluvat 160 mm, 180 mm, 200 mm, 225 mm sekä 250, tavoitevolyyymi tulee olemaan noin 650 moottoria/viikko viikosta 26 lähtien uuden kokoonpanolinjan valmistuessa. Tämä tarkoittaa sitä, että häkkikäämittyjen roottoreiden tarve olisi vastaava valmistettävien moottoreiden määrän kanssa eli noin 650 kpl, joka tulisi olemaan myös uuden robottisolun tavoitevolyyymi roottoreiden valmistuksessa. Tarkemmat volyymit/ kokoluokka liitteessä 2.

## 7 SIMULOINNIN TOTEUTUS

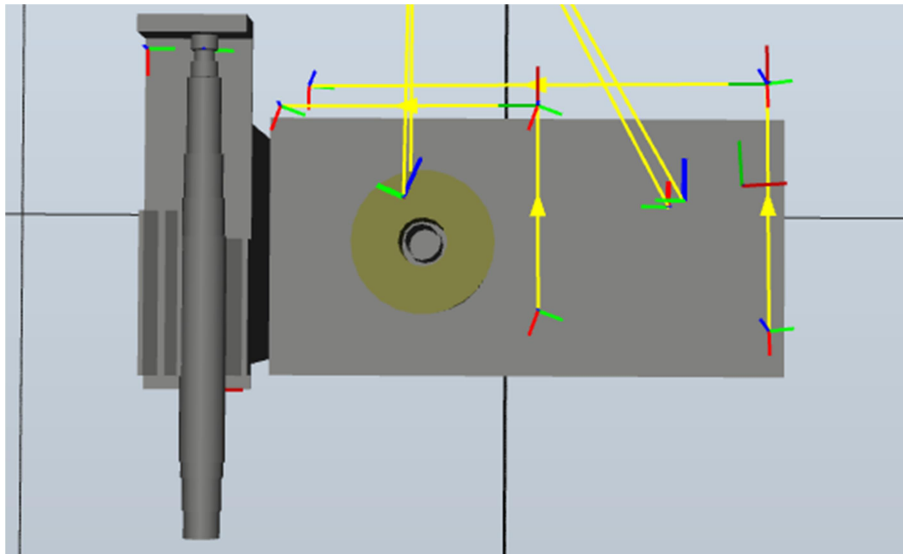
Tässä opinnäytetyössä tehtiin simulaatio jo toiminissa olevasta roottori robottisolusta. Simulaatio tehtiin siis ikään kuin taaksepäin. Tarkoituksena oli antaa tietoa simuloinnista ja todeta, että se voidaan käytännössä toteuttaa. Tällä pystyttiin myös katsomaan ohjelmassa olevat mahdolliset virheet.

Prosessi aloitettiin ottamalla robotilta backup-tiedosto, joka sisälsi robotin koko ohjelman paikoituspisteineen, liikekäskyineen ja liikeratoineen. Tiedosto siirrettiin muistitikun avulla tietokoneelle ABB Robot Studio simulointiohjelmaan. Robotin tarttumat mukaan lukien robotin työkalulaippaan kiinnitettävä osa mallinnettiin NX 3D-mallinnusohjelmalla. 3D-mallit siirrettiin NX:stä Inventor 3D-mallinnusohjelmaan, jonka avulla mallitiedostoista saatiin SAT-tiedostomuodot, joita ABB Robot Studio pystyi lukemaan. Robotin tarttujen runko-osat löytyivät Schunkin internetsivuilta. Kuviossa 19 Robotin työkalulaippaan kiinnitettyyn osaan kiinnitettiin tarrainten runko-osat, joihin voitiin edelleen kiinnittää itse tarraimet. Robottisolun muut komponentit mitattiin, mallinnettiin ja siirrettiin ABB Robot Studioon samalla tavalla kuin robotin tarttumatkin.

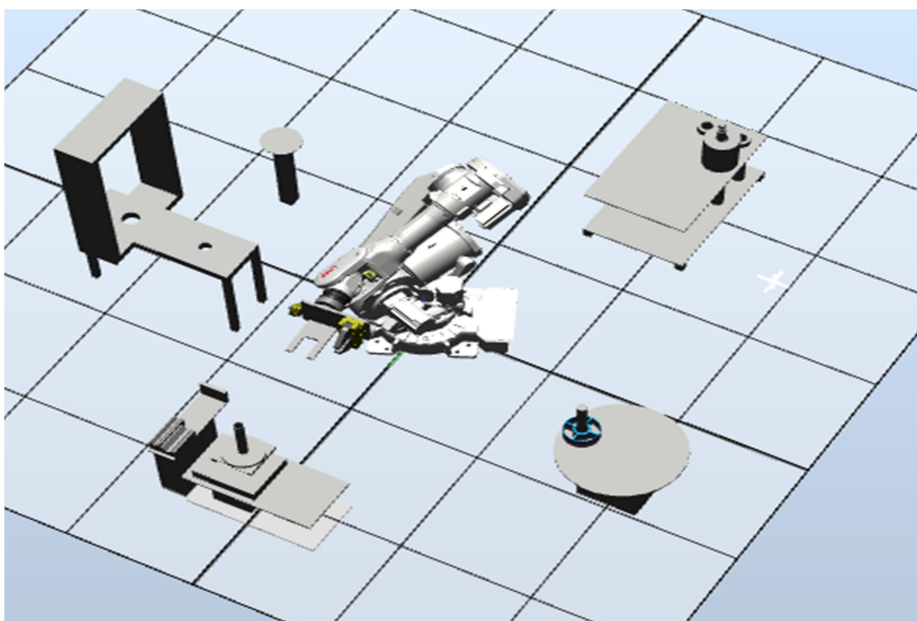


**Kuvio 19.** Robotin työkalulaippaan kiinnitetty runko, tarraimien rungot sekä tarraimet.

Robottisolun komponentit sijoitettiin simulointiympäristöön robottisolun layout-kuvan perusteella. Kuvassa olleet mitat eivät olleet tarkkoja, joten komponentit eivät sijoittuneet ympäristössä täsmälleen oikeille paikoille, kuten kuviosta 20 nähdään. Tähän johti myös mahdolliset mittauksessa tapahtuneet virheet ja epätarkkuus. Näiden seurauksena komponentteja jouduttiin siirtämään robotin paikoituspisteiden perusteella oikeille paikoille. Näin saatiin luotua robottisolu simulointiympäristöön (**Kuvio 21**).



**Kuvio 20.** Komponentteja ja robotin paikoituspisteitä.



**Kuvio 21.** Robottisolun valmis simulointiympäristö.

Robotin tarttujista tehtiin älykkäitä komponentteja (smart component), joilla oli tulo- ja lähtösignaalit. Näiden signaalien avulla robotin tarraimet saatiin tarttumaan työkappaleisiin sekä päästämään niistä irti.

Kuviossa 22 on osa robotin alkuperäisestä ohjelmasta, joka sisälsi 2648 kappaletta ohjelmointirivejä. Alkuperäinen ohjelma oli monimutkainen ja se sisälsi simuloinnin kannalta paljon turhia ohjelmointirivejä. Ohjelmasta tehtiä yksinkertaisempi poistamalla turhia rivejä, jolloin rivit vähenivät 2102 kappaleeseen (**Kuvio 23.**).

```

57 | stSenastOppdrag:="Omstart";
58 | Reset oSimLMPStapelRöd;
59 | WHILE TRUE DO
60 |   ResetFlags;
61 |   Assignments;
62 |   IF stOppdrag=stEmpty THEN
63 |     Set oSimLMPStapelBlå;
64 |     IF stSenastOppdrag<>stOppdrag THEN
65 |       TPWrite "Robot Väntar";
66 |     ENDIF
67 |     WaitTime 0.1;
68 |   ELSE
69 |     IF stSenastOppdrag<>stOppdrag THEN
70 |       TPWrite "Nytt Oppdrag/Jobb "+stOppdrag;
71 |       stSparadeOppdrag:=[stOppdrag,stSparadeOppdrag{1},stSparadeOppdrag{2},stSparadeOppdrag{3}.
72 |     ENDIF
73 |     Reset oSimLMPStapelBlå;
74 |   ENDIF
75 |   stSenastOppdrag:=stOppdrag;
76 |   TEST stOppdrag
77 |   CASE "Stopp Cykel dörröppning":
78 |     DoorStop;
79 |   CASE "Cykel stopp":
80 |     CycleStop;
81 |   CASE "Från Ändplattsmagasin till värmare":
82 |     TakeEndPlateFromStack;
83 |     PutEndPlateToHeater;
84 |   CASE "Från Ändplattsvärmare till Press":

```

**Kuvio 22.** Osa robotin alkuperäisestä ohjelmasta.

```

31 |     !CASE "Från Ändplattsmagasin till värmare":
32 |       TakeEndPlateFromStack;
33 |       PutEndPlateToHeater;
34 |       TakeAxisFromMont;
35 |       PutAxisToMont1;
36 |       TakePaletFromMont1;
37 |       PutPaletToPres;
38 |       TakeEndPlateFromHeater;
39 |       PutEndPlateToPres;
40 |       !päätylevy ja roottori häviää ja
41 |       !valmis roottori ilmestyy prässiin
42 |       TakeRotorFromPres;
43 |       PutFinishedRotorToPalet1;
44 |       TakePaletFromPress;

```

**Kuvio 23.** Osa robotin ohjelmasta muokkauksen jälkeen.

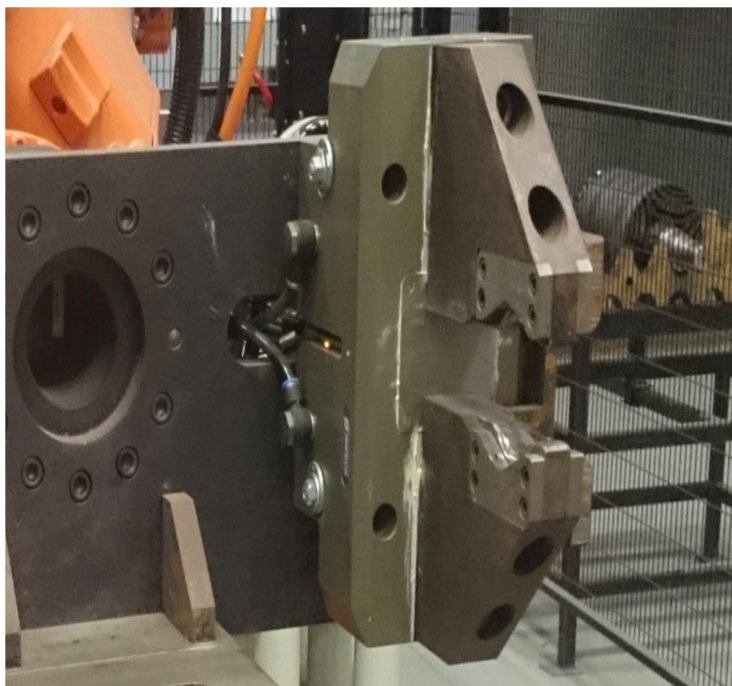
Lopuksi suoritettiin simulointi, joka saatiin toimimaan tarpeeksi hyvin. Puristimen mekanisme ei saatu toimimaan. Myös työkierrossa on pieni virhe.

## 8 HÄIRIÖIDEN POISTO

Häiriöiden tutkiminen aloitettiin tutustumalla ensin robottisolun toimintaan, jotta häiriöt voitiin paikantaa sekä todeta niiden toistuvuus. Useamman robottisolun työkierron jälkeen voitiin jo kiinnittää huomiota tiettyihin yksityiskohtiin, jotka voisivat olla häiriöiden taustalla. Kappaleessa 6.2.1 mainitut kolme häiriötä olivat erittäin toistuvia, mutta eivät välttämättä tapahtuneet joka työkierrossa, joten arveltiin, että häiriöt eivät johdu robotin ohjelmasta.

Robottisolun ollessa toimettomana tutkittiin solun eri komponentteja erityisesti tuurnia, koska kaikki häiriöt liittyivät akselin ja tuurnan yhteistyöhön, arveltiin syyt häiriöihin löytyvän niistä. Kahdesta tuurnasta mitattiin ulko- sekä sisähalkaisijat ja kohtisuoruudet, mutta mitat eivät eronneet merkittävästi alkuperäisistä mitoista.

Seuraavaksi kiinnitettiin huomiota robotin akselitarraimen ja huomattiin sen olevan erittäin kulunut. Tarraimen toimivuutta testattiin pysäyttämällä robottisolun työkierto kohtaan, jossa robotin akselitarrain on tarttunut akseliin ja nostanut akselin pystyasentoon. Tämän jälkeen tarkasteltiin, kuinka akseli liikkuu robotin tarraimessa. Huomattiin, että akselia pystyi liikuttamaan käsin melko helposti. Huomiota herätti myös se, että akselia pystyi käsin työntämään niin, että se ei enää palautunut alkuperäiseen paikkaan. Näistä seikoista tehtiin johtopäätös, että akseli ei osu työkierron alussa tuurnaan, koska akselitarrain oli niin kulunut, että se ei tarttunut akselin adapteriin aina samalla tavalla, minkä takia akseli ei joka työkierrossa keskittynyt tuurnaan. Tehtiin myös johtopäätös, että kulumista akselitarraimen on aiheuttanut tarraimen leukojen materiaalin pehmeys verrattuna akselin adapteriin. Täten akselitarraimen leuat tulisi vaihtaa kovempaan materiaaliin huomioiden akselin adapterin materiaalin kovuus. Kuviossa 24 akselitarrain ja sen kulumisen. Jos häiriö ei kuitenkaan poistu leukoja vaihtamalla, mahdollinen syy voisi olla asemassa, jossa tuurna on lähtötilanteessa. Aseman suoruus mitattiin vatupassilla ja huomattiin että se on hieman vinossa.



**Kuvio 24.** Robotin kulunut akselitarrain.

Puristimella tapahtuvia häiriöitä lähdettiin tutkimaan tuurnan asennon kautta. Puristimen laskeutuessa esipuristukseen tuurnan päällä olevan akselin läpi, osuu puristimen reiänseinämä akselin olakkeeseen sekä akselin laskeutuessa puristukseen päätyrenkaan kanssa, osuu akselin olake tuurnan sisäseinämään. Näiden kahden häiriöiden syyt ajateltiin johtuvan samasta tekijästä eli tuurnan asennonvinoudesta, joka huomattiin vatupassilla mitattaessa. Syytä tähän vinouteen lähdettiin tutkimaan ensin puristinpöydästä, jonka vinous kääntäisi myös tuurnan vinoon, mutta mittausten jälkeen pöydän todettiin olevan suorassa. Tämän jälkeen huomattiin puristinpöydässä olevan ”kupin”, joka vastaanottaa tuurnan olevan vinossa. Kuviossa 25 tuurnan vastaanottava ”kuppi.” Tämä pystyttiin todentamaan ilman mittaamista. ”Kuppi” ruuvattiin auki ja sen alle laitettiin ohuita metalliliuskoja, joiden avulla ”kuppi” saatiin säädettyä puristinpöydän kanssa samansuuntaiseksi.





**Kuvio 25.** "Kuppi", joka vastaanottaa tuurnan.

Uutta tarrainta ei vielä opinnäytetyön aikana hankittu, joten sitä ei päästy testaamaan. Koska synkronireluktanssiroottoreiden volyymit ovat melko pienet, ”kupin” toimintaa päästiin testaamaan vain viisi kertaa opinnäytetyön puitteissa. Näiden viiden kerran aikana puristimella tapahtuneita häiriöitä ei enää ilmennyt.

## 9 JOUSTAVUUDEN PARANTAMINEN

Uuden suunnitellun robottisolun joustavuutta tutkittiin ensin laskemalla uuden investoinnin eri takaisinmaksuaikoja. Näissä takaisinmaksuajoissa otettiin huomioon henkilökulut, uuden robottisolun mahdolliset tahtiajat mukaan lukien sorvaus ja tasapainotus, alihankkijan hinnat roottoreiden aksiloinnille, sorvaukselle sekä tasapainotukselle. Varioimalla työvuorojen määrää/vuorokausi eri henkilömäärillä sekä tahtiaikoja/tunti saatiin investoinneille eri takaisinmaksuaikoja (**LIITE 2.**). Näistä takaisinmaksuajoista voitiin tehdä päätelmiä, kuinka paljon solulla olisi pystyttävä tuottamaan, jotta investointi olisi kannattava. Liitettä 2 ei julkaistu liikesalaisuuksien vuoksi. Takaisinmaksuajat laskettiin seuraavan kuvitteellisen laskelman mukaisesti henkilökulujen ollessa 100 €/tunti, alihankkijan tekemän työn hinnan ollessa 30 €/roottori, roottoreiden valmistusmäärän eli tahtiajan ollessa 15 kappaletta/tunti sekä investoinnin kokonaishinnan ollessa 500 000 €:

1. Säästö/roottori, jos alihankkijan tekemän työn sijaan työ tehtäisiin omassa valmistuksessa eli:  $30 \text{ €} - (100 \text{ €} \div 10 \text{ kpl}) = 20 \text{ €}$
2. Säästö viikossa kolmivuorotyötä tehtäessä:  $20 \text{ €} \times 1050 \text{ kpl} = 21\,000 \text{ €}$
3. Säästö vuodessa:  $46 \times 21\,000 \text{ €} = 966\,000 \text{ €}$
4. Takaisinmaksuaika:  $500\,000 \text{ €} \div 966\,000 \text{ €} \approx 0,5 \text{ vuotta}$

Tavoitevolyyymiin eli 650 roottoria/viikko päästäisiin noin yhdeksän minuutin ja 40 sekunnin tahtiajalla eli vajaan 10 minuutin tahdilla olisi valmistuttava uusi roottori olettaen, että roottoreita valmistetaan kolmessa vuorossa ja töitä tehtäisiin yhdessä vuorossa seitsemän tuntia. Uuteen soluun suunnitellut syöttölaitteet häkkikkäämityille roottoripaketeille ja akseleille sekä kahden roottoripaketin lämmittämisen samanaikaisesti mahdollistava induktiolämmin olivat ratkaisuja, jotka mahdollistaisivat suuremman tuotantomäärän.

Yksi laskelmista tehtiin perustuen realistisempaan arvioon solun tahtiajasta ottaen huomioon prosessin eri vaiheisiin kuluvat ajat. Sorvauksen ja tasapainotuksen kuluvien aikojen arvioinnin pohjana käytettiin 280-315 mm roottoreiden sorvauksen ja tasapainotuksen mitattuja aikoja. Itse robotin ympäristö, johon

sorvi ja tasapainotuskone eivät kuulu oli vaikea arvioida, mutta arviointi pyrittiin tekemään mahdollisimman realistisesti. Todennäköinen tuotantomäärä asettuu aluksi kaksivuorotyön tuotantomäärän mukaiseksi. Tässä laskelmassa päästiin noin 4-5 vuoden takaisinmaksuaikaan.

Teoriassa uudella solulla voitaisiin päästä noin seitsemän minuutin tahtiaikaan, mutta käytännössä se ei ole mahdollista. Solussa tulee esiintymään jatkossakin ongelmia, jotka saattavat johtaa tuotannon pysähtymiseen. Vaikka synkronireluktanssi roottoreiden volyyymi on pieni, hidastaa niiden valmistaminen häkkikämmittyjen roottoreiden valmistusta ja sen myötä tahtiaika nousee. Mitä vähemmän itse robottisolun sitoo työntekijää, sitä pienempi on tahtiaika. Tällöin kaksi työntekijää voi keskittyä roottoreiden sorvaukseen ja tasapainotukseen. Investoinnin kannattavuus on riippuvainen tuotantomäärästä. Kolmessa vuorossa täydellä kapasiteetilla päästäisiin noin 2-3 vuoden takaisinmaksuaikaan. Tärkeää olisi siis saada nostettua tuotto-/panossuhdelukua.

Häkkikämmityt roottoripaketit täytyy lämmittää ennen niiden akselin puristamista pakettiin, joten pakettejen lämmitys olisi yksi vaihe työkierrossa. Arvioitujen aikojen perusteella uudessa solussa eniten aikaa kuluu roottoripakettien lämmityksessä. Robotin täytyy joka työkierrossa odottaa uutta pakettia lämmityksestä arviolta noin kaksi minuuttia ja 40 sekuntia. Robotti olisi siis toiminnassa myös samaan aikaan, kun paketit ovat lämmityksessä, mikä mahdollistaisi haluttuun tuotantomäärään pääsemisen. Vaikka lämmitysaika olisi lyhyempi ja roottorit saataisiin nopeammin jäähdytykseen, estää roottorin sorvaukseen ja tasapainotukseen kuluva aika nopeamman tahtiajan. Voidaan siis todeta, että prosessissa pullonkauloja ovat sorvaus ja tasapainotus. Arvioidut ajat liitteessä 2.

Näiden asioiden pohjalta annettiin ehdotuksia, jotka olivat:

- Rullaratojen asentaminen niin, että nostomatkat olisivat mahdollisimman lyhyet. Tämä nopeuttaisi sorvaus- ja tasapainotusprosessia.
- Työntekijöiden kouluttaminen automaatio- sekä robottialaan. Näin saataisiin työntekijöille lisättyä ammattitaitoa, joka ilmenisi ongelmien

ratkaisussa sekä uusien ideoiden lisääntymisessä. Tällöin solun tuottavuus kasvaisi, sillä esimerkiksi ongelmat voitaisiin ratkaista nopeammin, jolloin pitkiltä tuotannon keskeytyksiltä vältyttäisiin.

- Tarpeen vaatiessa esilämmityksen suunnitteleminen roottoripaketeille ennen varsinaista lämmitystä, jolloin paketin varsinainen lämmitysaika lyhenisi.

Lisäksi tehtiin ehdotus ABB:n SafeMove -turvallisuusratkaisun käyttöönotosta. Tällä voitaisiin parantaa robottisolun turvallisuutta. Nykyisessä solussa olevat turva-aidat sekä valoverhot saattavat aiheuttaa henkilövahinkoja. Valoverhot eivät välttämättä pysäytä robotin nopeaa liikettä heti, jolloin esimerkiksi ihmisen sormien ollessa kiinni turva-aidassa saattaa ne jäädä robotin työkalun ja aidan väliin. SafeMove on ohjelmistoon ja elektroniikkaan pohjautuva turvaratkaisu, joka käyttää geometrinen rajoitteiden lisäksi myös nopeusrajoitteita. Sen avulla voidaan esimerkiksi pienentää turva-aitoja sekä vähentää erilaisten turvalaitteiden määrää, jolloin säästyy tilaa sekä rahaa. /19/

## 10 LOPPUPÄÄTELMÄT

Opinnäytetyö oli haastava, mutta mielenkiintoinen. Synkronireluktanssi roottoreiden valmistusmäärät olivat pienet, joten robottisolun toimintaan oli vaikea päästä tutustumaan työn edellyttämällä tavalla. Robottisolun häiriöt hidastivat merkittävästi robottisolun tuottavuutta. Kun osa häiriöistä saatiin poistettua huomattiin tuottavuuden paranemisen lisäksi, että työ oli myös mielekkäämpää. Häiriöiden poistaminen oli merkittävä osa sitä, että robottisoluun tehtävien muutosten jälkeen sen tuottavuus olisi korkea.

Automaattiset tuotantosolut ovat lisääntyneet teollisuudessa, sillä ne voivat lisätä tehtaan tuottavuutta ja tuotteiden laatua merkittävästi, mutta kannattava investointi on vaikea saavuttaa, mikäli solua ei ole etukäteen hyvin suunniteltu. Simulointimallin tekeminen antaa lisäarvoa suunniteltaessa uutta robottisoluja. Simulointimallilla voidaan myös suunnitella olemassa olevan robottisolun muutoksia.

Mitä tuotattavampi automaattinen tuotantosolu on, sitä lyhyempi takaisinmaksuaika sillä on. Tässä työssä mainittu tavoite 2-3 vuoden takaisinmaksuajasta on mahdollista saavuttaa, mikäli solulla on korkea tuottavuus. Häkkikäämittyjen roottoreiden suuri tarve mahdollistaa sen, että solun avulla voidaan pyrkiä korkeaan tuottavuuteen.

### 10.1 Työn tulokset

Työn tuloksena saatiin häiriöiden syyt selville sekä suurin osa niistä poistettua. Tuloksina saatiin myös laskettua takaisinmaksuaika eri tuotantomäärillä uuden solun muutosten investoinnille, ehdotuksia solun tuottavuuden parantamiseen sekä toimiva simulointimalli.

### 10.2 Jatkotöiden piteet

Simulaatio voitaisiin ohjelmoida loppuun asti ja sitä voitaisiin käyttää myös tulevien muutosten suunnittelussa. Robottisolulla tehtävien muutosten jälkeen, jolloin synkronireluktanssiroottoreiden valmistus sekä häkkikäämittyjen

roottoreiden aksilointi ovat automatisoituja, voitaisiin automatisoida sorvaus- ja tasapainotusprosessi. Uuden robotin hankinta mahdollistaisi työkappaleiden liikuttamisen koneiden välillä ihmisen tekemän työn sijaan. Tämä voisi antaa mahdollisuuden siihen, että koko prosessissa työskentelisi vain yksi työntekijä, joka voisi mahdollistaa uuden kannattavan investoinnin. Tuotto-/panossuhdeluku nousisi merkittävästi, jos kahden työntekijän sijasta prosessissa työskentelisi vain yksi työntekijä, mikäli tuontamäärä ei laskisi merkittävästi.

## LÄHTEET

- /1/ ABB Robotics. ABB Oy:n verkkosivut. Viitattu 05.05.2016.  
<http://new.abb.com/products/robotics>
- /2/ ABB yhtymä lyhyesti. ABB Oy:n verkkosivut. Viitattu 15.04.2016
- /3/ Anttila, J. & Santala, J-P. 1990. Automaatiotekniikka. Porvoo. WSOY
- /4/ Aura, L. & Tonteri, A.J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Porvoo: WSOY.
- /5/ Baldor (A member of the ABB Group). Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package catalog 2015. Viitattu 12.05.2016.  
<http://www.baldor.com/mvc/DownloadCenter/Files/9AKK105828>
- /6/ Delfoi. Delfoin verkkosivut. Viitattu 19.05.2016.  
[http://www.delfoi.com/web/solutions/robotiikka/fi\\_FI/piensarjoille/](http://www.delfoi.com/web/solutions/robotiikka/fi_FI/piensarjoille/)
- /7/ Global Robots FZE, Global Robots FZE:n verkkosivut. Viitattu 05.05.2016. [http://globalrobots.ae/robot\\_guide/index.html](http://globalrobots.ae/robot_guide/index.html)
- /8/ Heinonkoski, R. Asp, R. & Hyppönen, H. 2008. Automaatio – helppoa elämää? Helsinki. Opetushallitus.
- /9/ International Federation of Robotics. International Federation of Robotics verkkosivut. Viitattu 05.05.2016. <http://www.ifr.org/industrial-robots/products/>
- /10/ Key figures for year ending Dec. 31. 2016. ABB Oy:n verkkosivut. Viitattu 29.04.2016. <http://new.abb.com/about/abb-in-brief/key-figures>
- /11/ Kinematics. Wikipedia. Viitattu 08.05.2016.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Kinematics>
- /12/ Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Tampere. Suomen Robotiikkayhdistys Ry.

- /13/ Machine Design, Machine Design:in verkkosivut. Viitattu 11.05.2016.  
<http://machinedesign.com/motion-control/difference-between-cartesian-six-axis-and-scara-robots>
- /14/ Malm, T. 2008. Vuorovaikutteisen Robotiikan Turvallisuus. Helsinki. Suomen Robotiikkayhdistys Ry.
- /15/ Niku, Saeed B. 2011. Introduction to Robotics. Pearson Education, Inc. United States of America.
- /16/ Oppimisympäristö robotiikan ja etäohjelmoinnin opetukseen. Diplomityö. Mikael Billing. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 30.05.2016.  
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21003/billing.pdf?sequence=3>
- /17/ Prosessitekniikan perusta Automaatiotekniikka. Oulun yliopisto. Viitattu 25.04.2016.  
[http://www.oulu.fi/sites/default/files/content/PTperusta\\_automaatio.pdf](http://www.oulu.fi/sites/default/files/content/PTperusta_automaatio.pdf)
- /18/ Robotiikan yleinen osa, luennot. Lahden ammattikorkeakoulu. Viitattu 30.05.2016.  
[http://miniweb.lpt.fi/automaatio/opetus/luennot/pdf\\_tiedostot/Robotiikka\\_yleinen.pdf](http://miniweb.lpt.fi/automaatio/opetus/luennot/pdf_tiedostot/Robotiikka_yleinen.pdf)
- /19/ SafeMove Robot Safety Option. ABB Oy:n verkkosivut. Viitattu 07.05.2016.  
[https://library.e.abb.com/public/cf49d4f8bed37f67c125772e00518e8e/SafeMove%20ROB0088EN\\_C.pdf](https://library.e.abb.com/public/cf49d4f8bed37f67c125772e00518e8e/SafeMove%20ROB0088EN_C.pdf)
- /20/ Strömberg (yritys), Wikipedia. Viitattu 20.04.2016.  
[https://fi.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mberg\\_\(yritys\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mberg_(yritys))
- /21/ Suomalaiset juuret: Strömbergin jalanjäljillä vuodesta 1889. ABB Oy:n verkkosivut. Viitattu 20.04.2016. <http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/suomalaiset-juuret>



- /22/ Suomen Automaatioseura ry. Suomen automaatioseura ry:n verkkosivut. Viitattu 05.05.2016. <http://www.automatioseura.com/>
- /23/ Sähkövoimatekniikkaopus. 1998. leenakorpinen.fi. Viitattu 21.04.2016. <http://www.leenakorpinen.fi/node/158>
- /24/ The OrocOS Project, The OrocOS Project verkkosivut. Viitattu 05.05.2016. [http://www.orocos.org/kdl\\_old](http://www.orocos.org/kdl_old)

**LIITTEET**

Liite 1: Robottisolun toiminnankuvaus.

Liite 2: Takaisinmaksulaskelmat ja arvioidut prosessiajat.