



# Servoyksiköiden käyttöönotto

Mishka Haagensen

Opinnäytetyö, AMK

Kesäkuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (AMK)

**Haagensen, Mishka**

## **Servoyksiköiden käyttöönotto**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Kesäkuu 2024, 36 sivua.

Sähkö- ja automaatiotekniikka, insinööri (AMK). Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

## **Tiivistelmä**

Opinnäytetyö aiheena oli lineaariservoyksikön turvallistaminen ja käyttöönotto tilaajana toimivalle Jyväskylän ammattikorkeakoululle. Työn tehtävinä oli selvittää ja toteuttaa käyttöönottoa varten lineaariservoyksikön kasaaminen ohjauslogiikan sekä turvalaitteiden kanssa, sekä niiden asianmukainen ohjelmointi. Työn aikana perehdyttiin koneturvallisuuden standardeihin, niin valikoituneiden turvalaitteiden kuin järjestelmän ympärille luodun koteloinnin osalta.

Toteutus aloitettiin teoriaan ja standardeihin perehtymällä, joiden pohjalta turvalaitteiden vähimmäisetäisyyksien ja lineaariservoyksikön maksiminopeuden mitoittaminen suoritettiin. Ohjauksesta vastaavan ohjauslogiikan kytkentöjä sekä kasausta varten turvauduttiin valmistajien luomiin ohjeistuksiin sekä tietolehtiin. Ohjelmointi suoritettiin aiemmin hankitun osaamisen sekä valmistajan tietojärjestelmän sisältävien esimerkkitapausten avulla. Lopuksi toteutettiin lineaariservoyksikölle kotelointi, johon mitoitus mukaisesti asennettiin turvalaitteet sekä ohjauslogiikka.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin tilaajalle toimiva lineaariservoyksikkö, joka on standardien vaatimusten mukaisesti turvallistettu. Lineaariservoyksikkö mahdollistaa näytekappaleiden ajattamisen lineaarisella akselilla, jota tilaaja pystyy hyödyntämään esimerkiksi opetustoiminnassa. Muita käyttökohteita toteutetulle laitteistolle voisi olla turvatoimintojen teoriapohjaisten mitoitus käytännössä todentamisen opettaminen opetustoiminnassa.

## **Avainsanat (asiasanat)**

PLC-ohjaimet, servotekniikka, ohjelmointi, koneturvallisuus, standardit, logiikkaohjelmointi, Beckhoff, Leuze, TwinCAT

## **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

-

**Haagensen, Mishka**

**Commissioning of servo units**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, June 2024, 36 pages.

Degree Programme in Electrical and Automation Engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

**Abstract**

The topic of the thesis was the safety and commissioning of a linear servo unit for the client Jyväskylä University of Applied Sciences. The task was to determine what safety functions would be needed to implement as a part of the commissioning, which was done alongside the installation of the control logic and the safety devices, as well as their proper programming. Implementation of the selected equipment required some familiarization with machine safety standards, both in terms of the selected safety devices and the enclosure created around the system.

The implementation began by studying machine safety standards, based on which the dimensioning of the required minimum distances of safety devices and the maximum speed of the linear servo unit was carried out. For the connections and assembly of the control logic, which was responsible for controlling the linear servo unit, instructions and information sheets created by the manufacturer were used. Programming the control logic was done with the help of previously acquired know-how and with examples provided by the manufacturer. Finally, the linear servo unit was encapsulated alongside the control logic and safety devices.

End result of the thesis was a functional linear servo unit for the client, which is safe in accordance with machine safety standards. The linear servo unit enables samples to be driven onto a linear axis, which the client can utilize, for example, in teaching activities. Other applications for the commissioned system could be to teach the practical verification of theoretically attained safety measures in teaching activities.

**Keywords/tags (subjects)**

Programmable logic controllers, servo technology, programming, safety of machinery, standards, logic programming, Beckhoff, Leuze, TwinCAT

**Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>3</b>
1.1	Tavoitteet ja rajausta.....	3
1.2	Kehitysmenetelmä .....	4
<b>2</b>	<b>Lineaariservoyksikön mitoitus standardien avulla .....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Valoverhon vähimmäisetäisyys .....	4
2.1.2	Lineaariservoyksikön koteloointi .....	6
<b>3</b>	<b>Lineaariservoyksikön komponentit .....</b>	<b>10</b>
3.1	Lineaariservoyksikkö .....	10
3.2	Lineaariservoyksikön servomoottori.....	11
3.3	Työssä käytetyt turvalaitteet .....	11
3.4	Ohjauslogiikan komponentit .....	12
<b>4</b>	<b>Opinnäytetyössä käytetyt ohjelmistot.....</b>	<b>14</b>
4.1	TwinCAT 3.....	14
4.2	Motion Designer.....	14
4.3	TwinSAFE .....	14
<b>5</b>	<b>Opinnäytetyön toteutus.....</b>	<b>15</b>
5.1	Jarrutusaikojen simuloiminen Motion Designer - ohjelmistolla.....	15
5.2	Lineaariservoyksikön kytkennät.....	21
5.3	Kokonaisuuden koteloointi .....	25
<b>6</b>	<b>Ohjauslogiikan ohjelmointi .....</b>	<b>26</b>
6.1	Turvatoiminnot ja TwinSAFE .....	28
6.2	Alustavan ajo-ohjelman luominen .....	30
6.3	Ajo-ohjelman käyttöliittymä .....	32
<b>7</b>	<b>Tulokset ja pohdinta .....</b>	<b>33</b>
7.1	Tutkimuskysymykset .....	35
7.2	Jatkokehityskohteet .....	36
	<b>Lähteet .....</b>	<b>37</b>
	<b>Liitteet .....</b>	<b>39</b>

## Kuviot

Kuvio 1 Yläraajoilla ulottumisen estävät turvaetäisyydet (SFS-EN ISO 13855:2020, 11). ....	8
Kuvio 2 Ulottuminen ympärille liikkeen ollessa rajoitettu (SFS-EN ISO 13857:2020, 13). ....	9
Kuvio 3 Käyttöjännitteen valinta TwinCAT 3 – ohjelmistossa. ....	16
Kuvio 4 Motion Designer – ohjelmiston kuularuuvien profiili ja tiedostopuu. ....	17
Kuvio 5 Motion Designer – ohjelmiston hammasrattaiden ja hihnan profiili. ....	18
Kuvio 6 Motion Designer – ohjelmiston inertia ja massalaskin. ....	18
Kuvio 7 Motion Designer – ohjelmiston servomoottorin valinta. ....	19
Kuvio 8 Motion Designer – ohjelmiston liikeprofiilit ja asetukset. ....	20
Kuvio 9 Motion Designer – ohjelmiston simuloimat nopeudet sekä jarrutusajat. ....	21
Kuvio 10 EL7221-9014 (EL72x1-901x, 2024, 60). ....	23
Kuvio 11 EL2911 (EL2911 and EL2911-2200, 2024, 40). ....	24
Kuvio 12 TwinCAT 3 – ohjelmiston tiedostopuu. ....	27
Kuvio 13 TwinCAT 3 – ohjelmiston akselin parametrivalikko. ....	27
Kuvio 14 TwinCAT 3 – ohjelmiston ”safety” – projektin tiedostopuu. ....	28
Kuvio 15 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu ”safety” – projekti. ....	29
Kuvio 16 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luodun ”ST_AxisCommand” – tietue. ....	30
Kuvio 17 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu ”Control” ohjelma. ....	31
Kuvio 18 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu pääohjelma. ....	32
Kuvio 19 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu käyttöliittymä. ....	33
Kuvio 20 Toteutettu lineaariservoyksikkö ....	34

# 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli käyttöönottaa valmistajalta SMC tilattu LEFS40RNH lineaarinen servoyksikkö. Käyttöönoton tavoitteina oli luoda turvallistettu järjestelmä työn tilaajana toimivalle Jyväskylän ammattikorkeakoululle, joka tulee myöhemmässä vaiheessa liittämään lineaariservoyksikön osaksi konenäkökamerajärjestelmää, ja käyttämään kokonaisuutta osana opetus-, hanke- sekä palveluliiketoimintaa oppilaiden ja opettajien toimesta. Mahdollisuus projektin toteutukselle sekä aiheen ajankohtaisuus ja merkitys opiskeleman tutkinnon kannalta alalla, jossa vastaavat toteutukset ovat oleellisia, vaikuttivat omalta osaltani tämän aiheen valintaan.

Lineaariservoyksikön tyylinen järjestelmä, joka tulee toimimaan muun muassa opetustoiminnassa ja omaa mahdollisuuden nopeaan voimakkaaseen liikkeeseen, vaatii käyttöönotolta, sijoittelulta sekä turvallistamiselta asianmukaisten standardien noudattamisen, sekä asianmukaiset turvalaitteet laiteturvallisuuden takaamiseksi. Opinnäytetyössä käytetty ja käsitelty laitteisto oli hankittu tilaajan toimesta ennen opinnäytetyön aloitusta. Lineaariservoyksikkö oli kokonaisuus, joka oli tilattu valmistajalta SMC, joka tuottaa ja myy heidän luomiaan servoyksiköitä. Turvalaitteet, eli hätäeis-painike sekä valoverhot, olivat valmistajalta Leuze, joka valmistaa turvalaitteita ja -komponentteja automaattioratkaisuihin ja koneturvallisuuteen. Ohjauslogiikka ja siihen kuuluvat komponentit sekä servomoottori, tulivat valmistajalta Beckhoff, joka luo tuotteita sekä ohjelmistoja servokäyttöjä ja automaattioratkaisuja varten.

## 1.1 Tavoitteet ja rajaus

Tarkempina tavoitteina oli siis toteuttaa standardinmukainen lineaariservoyksikön turvallistaminen yhdessä turvalaitteiden kanssa. Turvallisuuspuoli vaati siis työn ohella omakohtaista perehtymistä koneturvallisuuteen, jotta mahdollisten vaaratilanteiden tunnistaminen, ja niitten pohjalta turvallisen järjestelmän toteuttaminen olisi mahdollista. Tämän lisäksi opinnäytetyöhön kuului ohjauslogiikan asianmukainen asennus, kytkentä, käyttöönotto sekä ohjelmointiin perehtyminen. Ohjelmoinnin tavoitteena oli luoda tilaajalle alustava ohjelmapohja lineaariservoyksikön käyttöä varten, jonka kehitystä tilaaja voisi jatkaa opinnäytetyön päätyttyä.

Tämän opinnäytetyön tapauksessa käsiteltiin koneturvallisuutta, servokäyttöjä sekä logiikkaohjelmointia. Kyseessä oli siis aiheita, jotka ovat laajuudeltaan suuria. Tämän sekä hyvien käytäntöjen ja

rajallisen ajan vuoksi opinnäytetyö päätettiin rajata pääasiassa käsittelemään lineaariservoyksikköä ja sen turvallisuusratkaisuja sekä -mitoituksia. Yleisen tason koneturvallisuuteen tai servokäyttöihin ei perehdytä sen enempää, kuin mikä on oleellista työn toteuttamisen kannalta. Näiden lisäksi opinnäytetyössä käydään läpi logiikkaohjelmointia alustavalla tasolla.

## **1.2 Kehitysmenetelmä**

Opinnäytetyö oli kehittämismenetelmältään kehitystyö, jossa työn aihepiireistä tutkittiin standardeja sekä teoriaa, joita lopuksi sovellettiin käytännössä työn saattamiseksi loppuun. Tutkimuskysymykset opinnäytetyössä keskittyivät koneturvallisuuteen, kuten laitenopeuksiin, eli minkälaisia maksiminopeuksia voidaan käyttää, ja miten suuremmat nopeudet vaikuttavat laitteiston turvatoiminnoiden laukeamisesta johtuvaan jarrutusaikaan. Muita selvitettäviä asioita oli turvalaitteiden sijoittelun osalta, esimerkiksi minkälaisia etäisyyksiä vaaditaan turvalaitteiden ja lineaariservoyksikön välille, jotta jarrutusaika riittäisi estämään laitteistoa käyttävän henkilön koskettamisen vaara-alueelle.

## **2 Lineaariservoyksikön mitoitus standardien avulla**

Opinnäytetyön tietoperusta, josta työn toteutus alkoi, perustui pitkälti standardipohjaisiin mitoituksiin koneturvallisuuden näkökulmasta. Tässä kappaleessa käydään läpi työssä toteutettuja mitoituksia turvalaitteiston sekä koteloinnin osalta. Mitoituksiin valikoidut standardit saatiin käymällä läpi koneturvallisuuden standardeja, ja vertaamalla standardien sisältöä ja esimerkkejä soveltuvuudeltaan suunnitteilla olevaan lineaariservoyksikköön.

### **2.1.1 Valoverhon vähimmäisetäisyys**

Opinnäytetyötä varten tilaaja oli hankkinut Leuzen valmistaman ELC100T17-600 valoverhon, jonka sijoitusta varten tutkittiin standardia SFS-EN ISO 13855 (2010). Standardi käsittelee turvalaitteiden sijoitusta kehonosien lähestymisnopeuden kannalta, ja esittää menetelmät, joilla voidaan määrittää turvalaitteiden havaitsemisvyöhykkeiden tai hallintalaitteiden vähimmäisetäisyydet vaaravyöhykkeestä (SFS-EN ISO 13855:2010, 10).

Vähimmäisetäisyyden määrittäminen aloitettiin tarkastelemalla standardista SFS-EN ISO 13855 (2010, 22) kohtaa 5 ”Yleinen yhtälö järjestelmän kokonaispysähtymisaian ja vähimmäisetäisyyden laskemiseksi”, jossa selvitetään järjestelmän kokonaispysähtymisaika alla olevan kaavan avulla.

$$T = t_1 + t_2$$

- $T$  on järjestelmän kokonaispysähtymisaika.
- $t_1$  on pisin aika suojausteknisen laitteen vaikuttumisen tapahtumisen ja lähtösignaalin POIS-tilan saavuttamisen välillä.
- $t_2$  on pysähtymisaika, joka on pisin aika, joka vaikuttaa koneen vaarallisten toimintojen lakkaamiseksi sen jälkeen, kun suojausteknisen laitteen lähtösignaali saavuttaa POIS-tilan. Ohjausjärjestelmän vasteajan on sisällyttävä aikaan  $t_2$ .

Tutkimalla työhön valitun valoverhon tietolehteä saatiin tieto kyseisen mallin toiminta-ajasta, joka oli 9,5 ms (ELC 100 2024, 39). Tämän lisäksi tarkastettiin sama tieto käytettävissä olevasta EL2911 turvaohjainyksiköstä sekä EL7221-9014 servo-ohjaimesta, joiden toiminta-ajaksi valmistaja ilmoitti vastaavasti 4 ms ja 10 ms (EL2911 and EL2911-2200 2024, 25; EL72x1-901x 2024, 21). Nämä summaamalla saadaan yllä olevaan kaavaan kohdan  $t_1$  aika, eli 23,5 ms. Kohdan  $t_2$  pysähtymisaika saatiin ”Motion Designer” – ohjelmiston avulla toteutetusta simuloinnista, joka käydään tässä opinnäytetyössä kappaleessa 5.1. Simuloitu pisin jarrutusaika tällä järjestelmällä, liikeradan ollessa 1 metrin mittainen oli 48,5 ms. Täten edellä mainitulla kaavalla saadaan:

$$T = 23,5 + 48,5 = 72 \text{ ms}$$

Seuraavana vuorossa oli valoverhon vähimmäisetäisyyden laskeminen. Ottaen huomioon, että valoverho tulisi suojaamaan laitteiston edustaa, josta ajettavia kappaleita voidaan syöttää yksikön näytelaatalle, tuli turvallistamista tarkistella käsien suojaamisen kannalta. Tämän vuoksi tarkasteltiin standardista SFS-EN ISO 13855 (2010, 28) kohtaa 6.2.3 ”Koskematta tunnistava aktiivinen valosähköinen turvalaite, jonka tunnistin havaitsee kappaleen, jonka halkaisija on  $\leq 40 \text{ mm}$ ”, käsiteli haetun mukaista tapausta, jossa tarkoituksena on havaita pienempikokoisia kehonosia, alla olevan yhtälön avulla.



$$S = (K * T) + C$$

- S on vähimmäisetäisyys turvalaitteelle.
- K on muuttuja muodossa mm/s, joka saadaan kehonosien liikenopeustiedoista.
- C on kehonosan lähestymisetäisyys millimetreissä.
- d on laitteen tunnistimen havaitsemiskyky millimetreinä.

Standardin mukaan tapauksessa, jossa tunnistin kykenee havaitsemaan kappaleen, joka on halkaisijaltaan pienempi kuin 40 mm, käytetään yhtälössä K:n liikenopeustietona arvoa 2000 mm/s ja C:n lähestymistietona arvoa  $8(d-14)$ , jossa d on käytettävän tunnistimen havaitsemiskyky, eli resoluutio (SFS-EN ISO 13855:2010, 28). Havaitsemiskyky saatiin jälleen valitun valoverhon tietolehdestä, jossa ilmoitettu resoluutio oli 17 mm (ELC 100 2024, 41). Lopuksi lisättiin yhtälöön vielä aiemmin laskettu kokonaispysähtymisaika T, joka oli 72 ms. Vähimmäisetäisyydeksi saatiin siis:

$$S = (2000 * 0,072) + 8 * (17 - 14) = 168 \text{ mm}$$

Standardissa oli vielä seuraava huomio vähimmäisetäisyyttä varten: ”Kun on ennakoitavissa, että koskettamatta tunnistavaa aktiivista valosähköistä turvalaitetta käytetään muissa kuin teollisissa sovelluksissa, esimerkiksi ympäristössä, joissa voi olla lapsia, vähimmäisetäisyys, S, on laskettava yhtälöllä (3) ja laskettuun arvoon on lisättävä vähintään 75 mm” (SFS-EN ISO 13855:2010, 28). Tässä tapauksessa käytettiin juuri mainittua yhtälöä, joten ottaen huomioon, että laitteisto ei tule olemaan teollisessa ympäristössä, lisättiin laskettuun vähimmäisetäisyyteen 75 mm, jolloin vaadituksi vähimmäisetäisyydeksi valoverhoille vaaravyöhykkeestä saatiin 243 mm.

### 2.1.2 Lineaariserveyksikön kotelointi

Turvalaitteiden lisäksi järjestelmälle oli tarkoitus rakentaa kotelo, joka sulkisi koko järjestelmän. Tilaajan mukaan koteloidun yksikön lopullinen sijoituskohde oli laboratoriotiloissa seinustan vierellä sijaitsevalla pöydällä. Kyseinen paikka tarkastettiin ja pöytä mitattiin, jotta kotelon koko saataisiin määritettyä pöydälle mahtuvaksi. Tila mahdollisti maksimissaan noin 1600 mm pitkän ja 800 mm leveän kokonaisuuden. Korkeuden osalta tilanne oli hankalampi, sillä siihen vaikutti työhön valitut valoverhot. Valoverhot olivat 600 mm pitkiä, jolloin koteloinnin edustalla sijaitsevan aukon

korkeuden tuli olla sellainen, että valoverhot pystyisivät kattamaan koko edustan ilman, että rakenteiden väliin jäisi minkäänlaista rakoa, josta kenenkään olisi mahdollista päästä vaaravyöhykkeelle laukaisematta turvatoimia.

Jos kotelointi toteutettaisiin tilaajalta löytyvillä 40 x 40 mm alumiiniprofiileilla ja valoverhot asennetaan etukehikon sisäpuolelle siten, että sen yli tai ali ei ole mahdollista kurottaa kättä, tulisi kotelon lopulliseksi korkeudeksi noin 710 mm. Ottamalla sijoitusta varten varatun pöydän korkeus tähän huomioon, kasvaisi järjestelmän yläreuna noin 1400 mm korkeuteen.

Kotelo oli aluksi tarkoitus jättää päältä auki, jotta tilaaja saisi konenäkökameran avulla mahdollisimman selkää kuvaa laitteistosta, mutta ottamalla huomioon mahdolliset vaaratilanteet, joissa henkilö voisi mahdollisesti kurottaa koteloinnin yli laitteiston sisälle, päädyttiin tutkimaan aihetta käsittelevää standardia SFS-EN ISO 13857 (2020) ”Koneturvallisuus. Turvaetäisyydet yläraajojen ja alaraajojen ulottumisen estämiseksi vaaravyöhykkeille”.

Kohdassa 4.1.2.2 ”Ylöspäin ja ylitse ulottumista koskevien turvaetäisyyksien valinta” määritellään mitä arvoja ja taulukkoja tulisi käyttää, kun turvallistetaan järjestelmää ylitse ulottumisen kannalta. Standardi painottaa myös ottamaan huomioon mikä esiintymistodennäköisyys ja vakavuus mahdollisella vaarantekijällä on, sillä taulukoissa esiintyvät etäisyydet vaihtelevat tämän tiedon perusteella. (SFS-EN ISO 13857:2020, 8.)

Laitteisto, jota tämän opinnäytetyön aikana käsitellään, on turvallistettu muillakin keinoilla, ja omaa rajoitteet käyttönopeuksille, jonka takia voidaan vaarantekijän vakavuutta pitää alhaisena. Tilanteessa, jossa henkilö saisi kätensä laitteiston lähelle sen ollessa käynnissä, olisi osumasta johdettava vamma lähinnä pintapuoleinen. Tämän perusteella voidaan tarkastella kohdan 4.2 ”Yläraajoilla ulottumisen estävät turvaetäisyydet” taulukkoa 1 (SFS-EN ISO 13857:2020, 11), joka on esitetty kuviossa 1.

Suunnitellun laitteiston suojarakenteen korkein kohta ( $h_{ps}$ ) oli noin 1400 mm ja vastaavasti vaaravyöhykkeen korkeus ( $h_h$ ) noin 800 mm, jolloin vaakasuoran turvaetäisyyden vaaravyöhykkeeseen ( $s_h$ ) tulisi olla vähintään 600 mm. Tämähän ei olisi toteutunut sillä käytettävissä oli vain noin 800

mm tilaa syvyysuunnassa, josta laitteisto veisi noin 300 mm, jättäen vain 500 mm turvavyöhykettä.

$h_h$ , lähinnä yläraajan ulottuman aluetta olevan vaaravyöhykkeen pisteen korkeus	$h_{ps}$ , suojaranteen korkeus <sup>a</sup>								
	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 500
$s_h$ , lähinnä yläraajan ulottuman aluetta olevan vaaravyöhykkeen pisteen vaakasuora turvaetäisyys									
2 500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 400	100	100	100	100	100	100	100	100	0
2 200	600	600	500	500	400	350	250	0	0
2 000	1 100	900	700	600	500	350	0	0	0
1 800	1 100	1 000	900	900	600	0	0	0	0
1 600	1 300	1 000	900	900	500	0	0	0	0
1 400	1 300	1 000	900	800	100	0	0	0	0
1 200	1 400	1 000	900	500	0	0	0	0	0
1 000	1 400	1 000	900	300	0	0	0	0	0
800	1 300	900	600	0	0	0	0	0	0
600	1 200	500	0	0	0	0	0	0	0
400	1 200	300	0	0	0	0	0	0	0
200	1 100	200	0	0	0	0	0	0	0
0	1 100	200	0	0	0	0	0	0	0

<sup>a</sup> Korkeudeltaan alle 1 000 mm suojarakenteita ei ole otettu mukaan, koska ne eivät rajoita kehon liikettä riittävästi.

Kuvio 1 Yläraajoilla ulottumisen estävät turvaetäisyydet (SFS-EN ISO 13855:2020, 11).

Toinen ratkaisu turvallisemmaksi oli kotelon päällisen sulkeminen kokonaan, mutta tässä tapauksessa tilaaja olisi halunnut aukaistavan luukun konenäkökameraa varten, jotta kuvantaminen voitaisiin pitää selkeänä. Tämän seurauksena päädyttiin tutkimaan vaihtoehtoa, jossa kurottaminen laitteiston sisälle estettäisiin peittämällä etuosa kotelon päällisestä, jättäen seinän vierustalle tuleva takareuna avonaiseksi.

Samaisessa standardissa, kohdassa 4.2.3 ”Ulottuminen ympärille”, kerrotaan henkilöiden yläraajojen perusliikkeistä 1.4 m korkeudella tai yläpuolella (SFS-EN ISO 13857:2020, 11–13). Tässä tapauksessa olisi mahdollista käyttää alle 850 mm turvaetäisyyksiä, jos liikettä rajoittavan esteen pituus on vähintään 300 mm. Ottamalla huomioon käytettävän laitteiston turvatoimien ylettävän 1400 mm korkeuteen, voitiin tämän kyseisen kohdan taulukon 3 ”Ulottuminen ympärille liikkeen ollessa

rajoitettu” (SFS-EN ISO 13857:2020, 13) avulla selvittää osittaisen peitteen riittävyyttä kurottamisen estämiseksi.

Kuviossa 2 esitetty standardin SFS-EN ISO 13857, kohdan 4.2.3, taulukon 3 (2020, 13), toisessa kuvassa esitetään vähintään 300 mm pitkä este, jonka tukiessa käsivartta kyynärpäähän asti, tulisi turvaetäisyyden olla vähintään 550 mm. Tämä eroaa aikaisemmasta kohdan 4.2 (SFS-EN ISO 13857:2020, 11) ohjeistuksesta siten, että kyseessä ei ole vaakasuora mitta vaaravyöhykkeelle, vaan säteinen turvaetäisyys käytettävissä olevan tuennan uloimmasta pisteestä. Tämän työn tapauksessa, jos kotelointi varustettaisiin hieman pidemmällä, noin 400 mm pituisella peitteellä etureunasta, jäisi turvaetäisyyttä vaaravyöhykkeeseen noin 570 mm. Vaikka toteutettavassa järjestelmässä ei ole esimerkkien mukaista korkeintaan 120 mm halkaisijan aukkoa, josta käsi voitaisiin kurottaa, ei siinä myöskään ole vaaravyöhykettä yläpuolella. Täten päätettiin yhdessä tilaajan kanssa toteuttaa kurottamisen osalta turvallistaminen soveltamalla tätä standardikohtaa, asentamalla laitteiston etureunan päälle noin 400 mm pituinen peite, jonka ansiosta pystyttiin pitämään takareuna auki kuvantamista varten.

Liikkeen rajoitukset	Turvaetäisyys vaaravyöhykkeeseen, $s_r$	Kuva
Liikettä rajoitetaan vain olkapään ja kainalon kohdalta	$\geq 850$	
Käsivarsi on tuettuna kyynärpäähän asti	$\geq 550$	

Kuvio 2 Ulottuminen ympärille liikkeen ollessa rajoitettu (SFS-EN ISO 13857:2020, 13).

### 3 Lineariservoyksikön komponentit

Opinnäytetyön tilaajana toimiva Jyväskylän Ammattikorkeakoulu oli ennen työn alkamista hankkinut kaikki toteutukseen tarvittavat komponentit.

#### 3.1 Lineariservoyksikkö

Työssä käytetty LEFS40RNH-1000-X780 lineaariyksikkö oli tilattu SMC Automation Oy yritykseltä osittain valmiina pakettina. Osittain siksi, koska normaalisti yritys toimittaa lineaariyksikön sopivan servomoottorin kera, mutta tässä tapauksessa lineaariyksikkö oli tilattu ilman servomoottoria, joka oli hankittu eri valmistajalta. Koska kyseessä oli kuitenkin paketti, johon ei ollut aiemmin tutustuttu, tarkastettiin valmistajan digitaalisesta luettelosta mallinumeron avulla yksikön tarkat tiedot myöhempiä mitoituksia ja nopeuslaskentoja varten.

Mallinumeron selvitys tuotti hieman hankaluuksia, sillä kuten edellä mainittiin, oli yksikkö tilattu ainoastaan lineaarisen liikeradan takia, jonka takia mallinumeron loppuosaa ”X780” ei saatu selvitettyä. Kyseessä voi myös olla virhemerkintä, sillä valmistajan digitaalisen luettelon mukaan tuo loppuosayhdistelmä vastaisi moottoriin liittyviä tietoja, jota ei tässä tapauksessa kyseiseltä valmistajalta ollut tilattu. Saatiin kuitenkin selvitettyä olennaisimmat asiat, kuten liikeradan, kuularuuvien ja hammasrattaiden fyysiset mitat, joita tarvittiin nopeus- ja jarrutuslaskuja varten.

Mallinumeron alku, ”LEFS”, on valmistajan luoma nimike kuularuuvilla toimivalle yksikölle. ”40”, valmistajan yleinen kokoluokitus laitteistoille, tässä tapauksessa sarjan suurin. ”R”, moottorin sijointi yksikössä, tässä tapauksessa yhdensuuntaisesti oikealla puolella. ”N”, olisi normaalisti kertonut moottorin tyypin, mutta työn tilaaja oli tilannut servomoottorin erilliseltä valmistajalta. ”H”, lineaarinen liike, jonka kuularuuviin liitetty kappale tekee yhden kokonaisen kierroksen aikana, tässä tapauksessa 30 mm. Ja ”1000”, lineaarisen liikkeen kokonaispituus, eli 1000 millimetriä. (Slider Type, n.d. 140.)

Yksikön toiminta ja lineaarinen liike perustuu edellä mainittuun kuularuuviin. Kuularuuvien ollessa lappeellaan, sen kierteinen liike liikuttaa siihen kiinnitettyä vastakappaletta lineaarisesti. Kierteisestä liikkeestä vastaava servomoottori on asennettu oikeanpuoleisesti yksikön rinnalle, jonka takia moottorin sekä kuularuuvien akselien päähän on asennettu hammaspyörät, joiden välillä on

hihna. Hammaspyörät ovat tässä tapauksessa samansuuruiset kummassakin akselissa, jolloin välityssuhde moottorin ja kuularuuvien välillä pysyy samana.

### 3.2 Lineaariservoyksikön servomoottori

Opinnäytetyön tilaaja oli valinnut lineaariyksikön pyörittämiseen Beckhoffin valmistaman AM8122-wjyz servomoottorin. Moottoria voidaan ajaa joko 24 tai 48 V tasajännitteellä, joka vaikuttaa moottorin maksiminopeuksiin sekä vääntömomenttiin. Opinnäytetyön tapauksessa servomoottoria tullaan käyttämään 24 V jännitteellä, joka mahdollistaa noin 2000 min<sup>-1</sup> maksiminopeuden servomoottorin nimellismomentilla 0,75 Nm. (AM8122-wJyz, n.d.)

### 3.3 Työssä käytetyt turvalaitteet

Opinnäytetyön turvallistamisen saavuttamiseksi käytettiin valmistajan ”Leuze” tuottamaa ELC100 – sarjan valoverhoa sekä hätä-seis-painiketta. Valittu valoverho toimii 24 V tasajännitteellä, on 600 mm korkea ja omaa 17 mm resoluution. Ominaisuuksien osalta laite soveltuu tehtävään työhön mainiosti, sillä korkeuden ja resoluution ansiosta voidaan turvata koko laitteiston edusta, ja estämään operoijan käsien tai sormien päätyminen vaaravyöhykkeelle laitteiston ollessa käynnissä.

Laitteiston omaksi turvaksi, sekä mekaanisten rasituksien vuoksi, oli tilaaja hankkinut induktiiviset rajakytkimet lineaarisen liikeradan kumpaankin päähän. Rajakytkinten ajatuksena oli mahdollistaa näytelaatan tunnistaminen, ennen sen osumista liikeratojen päihin, jotta servomoottori ei ohjelmoinnin pettäessä vahingossakaan ajaisi yksikön fyysisiä rajoja vastaan. Rajakytkimet mahdollistavat ohjelmoinnin puolella myös oikeisiin rajoihin perustuvan ”Homing” eli kotiutustoiminnon, jonka avulla ohjauslogiikka voi ajattaa näytelaattaa vuorotellen liikeradan päätyihin, jolloin rajakytkimet ilmoittavat ohjauslogiikalle rajan tulleen vastaan, ja näin paikoittaa järjestelmän senhetkisen tarkan sijainnin lineaariakselilla.

### 3.4 Ohjauslogiikan komponentit

#### IPC

Lineaariservoyksikölle varattu C6030-0070 IPC, on Beckhoffin luoma pienikokoinen tietokone. IPC soveltuu kokonsa vuoksi pienempiinkin automaatiojärjestelmiin, jonka lisäksi se pystytään kiinnittämään osaksi toteutettavaa järjestelmää rungossa sijaitsevien kiinnityspisteiden avulla. IPC käyttää Windows 10 käyttöjärjestelmää, joten se soveltuu uusillekin sovelluksille. (C6030-0070, n.d.)

#### EK1100 - Linkki

EK1100 toimii linkkinä terminaalien ja yhdistettävän verkon välillä. EK1100 pystyy havaitsemaan siihen kytkettävät terminaalit automaattisesti ja välittämään niille maksimissaan 5V jännitteen sekä 2A virran laitteen kyljessä olevien virtakoskettimien kautta. Kytkin omaa myös kaksi RJ45 Ethernet liitintä, joista ylempi toimii verkkokytkentänä ja alempi laajennusporttina muille EtherCAT - laitteille. (EK110x-00xx, EK15xx, 2024.)

#### EL9222-5500 - Ylivirtasuojayksikkö

EL9222-5500 on ylivirtasuojaliitin, joka nimensä mukaisesti suojaa muita terminaaletta ylivirroilta. Kyseisen terminaalin ylivirtarajaa voidaan muuttaa 1 A askeleissa maksimissaan 10 A asti. Terminaalin suojattu ulostulo voidaan kytkeä normaalisti johdoilla, tai hyödyntää E-Bus virtakoskettimia, jolloin ylivirtasuojaus vaikuttaa kaikkiin jälkimmäisiin terminaalettiin. (EL922x, 2024.)

#### EL1008 - Tuloyksikkö

EL1008 on yksinkertainen kahdeksankanavainen digitaalinen tuloliitin, jota käytetään tämän opin näytetyön tapauksessa rajakytkinten kanssa laitteiston liikeradan ulkoisten rajojen asettamiseksi. Tuloliitin vastaanottaa virtasignaalin kytkettyjen kanavien kautta, ja niiden toimintaa voidaan ohjelmoida TwinCAT – sovelluksessa. (EL10xx, EL11xx, 2024.)

**EL2008 - Lähtöyksikkö**

EL2008 on kahdeksankanavainen digitaalinen lähtöliitin, jota työn toteutuksen aikana ei ole hyödynnetty, mutta mahdollistaa tilaajalle vaihtoehdon lähettää signaaleja ohjelmointitasolla muille komponenteille tulevaisuudessa. (EL20xx, EL2124, 2024.)

**EL7221-9014 – Servo-ohjainyksikkö**

EL7221-9014 on servo-ohjain, joka omaa yhden kanavan. Servo-ohjain hyödyntää valmistajan Beckhoff luomaa OCT-teknologiaa, jossa moottorin ohjauskaapeli ja takaisinkytkentä on yhdistetty yhteen ja samaan kaapeliin. Tässä työssä lineaariyksikköä ajava AM8122 servomoottori on yhdistetty tähän terminaaliin. (EL72x1-901x, 2024.)

**EL9576 - Jarrukatkojayksikkö**

EL9576 on jarrukatkoja, jotka käytetään yhdessä ZB8110 jarruvastuksen kanssa. Kyseistä kombinaatiota käytetään tässä työssä yhdessä servo-ohjain EL7221-9014 kanssa, jolloin saadaan servomoottorin jarrutuksista syntyvä ylimääräinen energia otettua talteen ja vastuksen avulla muutettua lämmöksi. (EL9576, 2024.)

**EL2911 - Turvaohjainyksikkö**

EL2911 on TwinSAFE – logiikkaa käyttävä, turvallistamiskomponenteille suunnattu turvaohjain, jonka avulla tässä järjestelmässä käytettävien turvakomponenttien, kuten hätäseis – painikkeen, rajakytkimien ja valoverhon ryhmitys ja yhdistäminen on mahdollistettu. Turvaohjain omaa myös ”fail-safe” – tilan, jolloin järjestelmävirheen ilmentyessä terminaali kykenee havaitsemaan ongelman ja pysäyttämään laitteiston. (EL2911 and EL2911-2200, 2024.)



## 4 Opinnäytetyössä käytetyt ohjelmistot

### 4.1 TwinCAT 3

Valmistajan Beckhoff luoma TwinCAT alusta, tarkemmin tämänhetkinen versio TwinCAT 3, koostuu useasta eri osaohjelmistosta, joita voidaan käyttää hyödyksi automaatiosovellusten ja servojärjestelmien mitoittamisessa, suunnittelussa ja toteutuksessa. Tämän opinnäytetyön osalta oleelliset osaohjelmistot olivat ”Motion Designer”, jonka käyttötarkoitusta avataan tämän opinnäytetyön kappaleessa 4.2, sekä XAE (eXtended Automation Engineering), eli niin sanottu perusversio TwinCAT 3 – ohjelmasta, joka sisältää mahdollisuudet ohjauslogiikan ohjelmointiin sekä TwinSAFE suojaustoimien määrittämiseen.

TwinCAT 3 ohjelmiston alusta pohjautuu C ja C++ ohjelmointikieliin, mutta ohjauslogiikan ohjelmointi voidaan toteuttaa perinteisin menetelmin, hyödyntäen esimerkiksi Ladder Diagram (LD) tyyliä, eli tikapuulogiikkaa, tai kuten tämän opinnäytetyön tapauksessa, Function Block Diagram (FBD) tyyliä, jossa mahdolliset toteutettavat funktiot on luotu omanlaisiinsa tietokuitioihin ohjelmoinnin helpottamiseksi ja selkeyttämiseksi. Näiden lisäksi TwinCAT 3 ohjelmisto mahdollistaa muutkin standardinmukaiset ohjelmointityylit, kuten Instruction List (IL), Structured Text (ST), Sequential Function Chart (SFC) ja Continuous Function Chart Editor (CFC).

### 4.2 Motion Designer

”Motion Designer” on ohjelmisto, jonka valmistaja Beckhoff on luonut osaksi TwinCAT 3 alustaa. Tätä ohjelmistoa hyödynnettiin tämän opinnäytetyön alustavissa mitoituksissa, joissa selvitettiin lineaariservoyksikön maksiminopeutta ja sitä vastaavaa jarrutusaikaa. Ohjelma mahdollisti servokäyttöisten järjestelmien liikkeen, voimien sekä nopeuksien simuloimisen. Ohjelmisto salli myös toteutettavan järjestelmän komponenttien, esimerkiksi servomoottoreiden, valinnan lisäksi mekaanisten ominaisuuksien, kuten hammasrattaiden, kuularuuvien ja hihnojen huomioon ottamisen simuloinnissa.

### 4.3 TwinSAFE

TwinSAFE on osa TwinCAT alustaa, ja sen perimmäinen tarkoitus on mahdollistaa automaatiojärjestelmien suojaustoimien ohjelmointi ja realisointi. TwinSAFE on valmistajan Beckhoff luoma

brändi, joka kattaa heidän luoman suojalaitteiston, kuten tässä työssä käytetyn EL2911 – turvaohjainyksikön, sekä ohjelmointiin tarkoitetun visuaalisen ympäristön, joka muun muassa hyödyntää PLC – ohjelmoinnista tuttua Function Block Diagram (FBD) – logiikkaa.

Kytkemällä toteutettavaan järjestelmään valitut suojalaitteet, kuten tässä työssä käytetyn valoverhon ja hätäseis-painikkeen, TwinSAFE – logiikalla toimivaan turvaohjainyksikköön, voidaan TwinCAT 3 alustaan integroidulla ”Safety Editor” – sovelluksella määrittää ja ohjelmoida kunkin suojalaitteen vaikutus toteutettavaan automaatiojärjestelmään. Esimerkiksi tämän opinnäytetyön tapauksessa suojalaitteiden laukeaminen lähettää signaalin servo-ohjainyksikön EL7221-9014 STO-terminaalin, joka pysäyttää järjestelmän nopeasti ja hallitusti, mutta isommissa järjestelmissä voitaisiin erotella osa suojalaitteistosta toimimaan turva-alueena, johon henkilön astuessa laitteisto hidastuisi huomattavasti, sen sijaan, että se pysähtyisi kokonaan.

## **5 Opinnäytetyön toteutus**

Opinnäytetyön toteutus aloitettiin keskustelemalla tilaajan kanssa sekä tutustumalla tehtävänantoon ja saatavilla olevaan laitteistoon. Tilaajan toive järjestelmästä oli saada se kytkettyä, turvallisettua, sijoitettua ja valmiina ohjelmoitavaksi. Samalla saatiin tietoa siitä, minkälaisessa yhteydessä ja millaisilla kappaleilla järjestelmää tulisi käyttää, jonka avulla voitiin kartoittaa mahdollista järkevää maksiminopeutta ja mitoittamaan turvarakenteiden suhdanteita asianmukaisten standardien avulla. Tämä oli tärkeää ottaa huomioon, sillä kyseinen kokoonpano mahdollisti nopeidenkin liikkeiden suorittamisen, jolloin järjestelmää käyttävien henkilöiden käsien läsnäolo laitteiston lähistöllä, tai liian kevyt kappale suurilla nopeuksilla, olisi voinut johtaa vaarallisiin tilanteisiin operaattorin huomion herpaantuessa.

### **5.1 Jarrutusaikojen simuloiminen Motion Designer - ohjelmistolla**

”Motion Designer” - sovelluksen käyttöä varten perehdyttiin valmistajan luomaan TE5910 dokumentaatioon (TE5910, 2021). Dokumentaatio selittää ja ohjeistaa simuloimisen eri vaiheet.

Mitoitus aloitettiin luomalla uusi projekti, jota tehdessä voitiin valita järjestelmän käyttöjännite ja servo-ohjaimen luokitus. Tässä tapauksessa valittiin käyttöjännitteeksi 24 V tasajännite, ja ohjainluokitukseksi EL72x1, kuvion 3 mukaisesti, sillä käyttöönotettavaan järjestelmään oli varattu EL7221-9014 servo-ohjainyksikkö.

Drive group	DC	AC 1 Phase	AC 3 Phases
AMI8000	8 V - 48 V	-	-
AMP8000	180 V - 700 V	110 V - 480 V	110 V - 480 V
AX5000	18 V - 700 V	100 V - 240 V	100 V - 480 V
AX8000	18 V - 700 V	100 V - 240 V	200 V - 480 V
EL72x1	8 V - 48 V	-	-

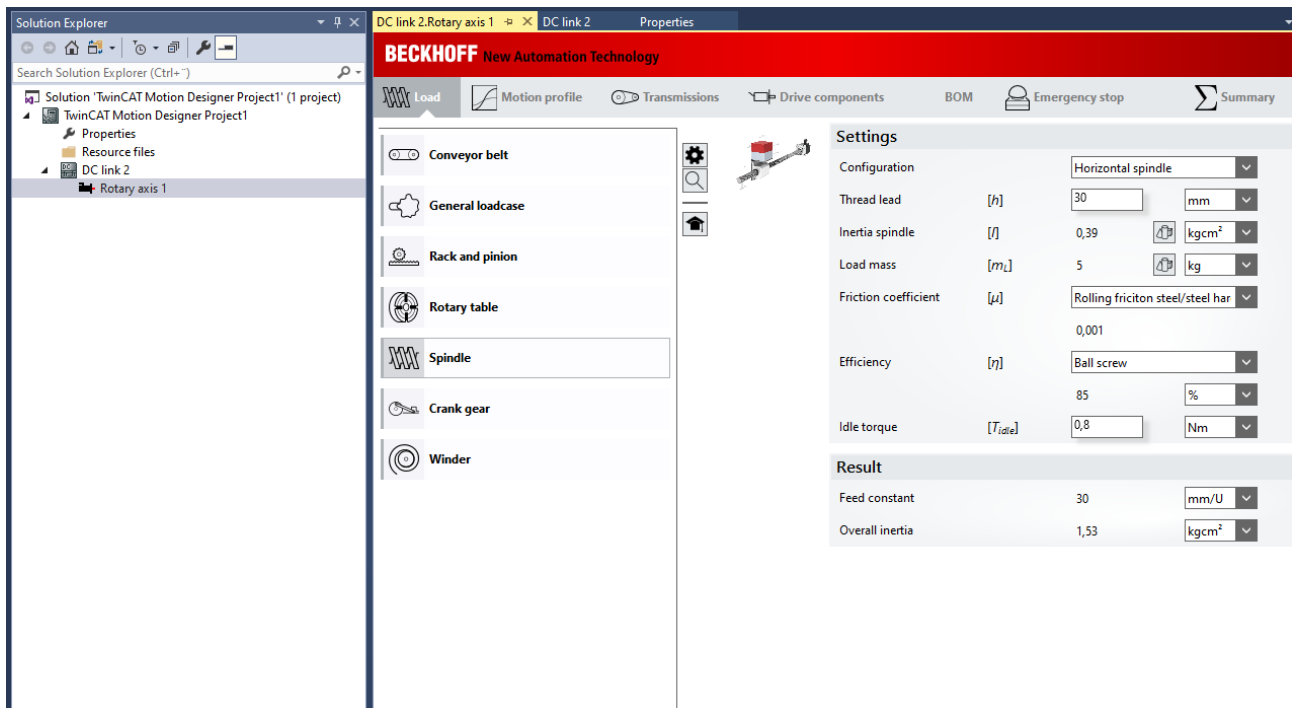
Kuvio 3 Käyttöjännitteen valinta TwinCAT 3 – ohjelmistossa.

Projektin luomisen jälkeen päästiin sovellusnäkömään, jonka vasemman laidan tiedostopuusta pystyttiin tarkistamaan sovelluksen automaattisesti luomia linkityksiä. Kuvio 4 voidaan todeta sovelluksen luoneen tasajännitelinkin, ja yhdistäneen siihen yhden akselin. Valitsemalla luotu akseli, päästiin luomaan järjestelmä, jota haluttiin simuloida.

Ensimmäisenä ohjelmistoon täytyi luoda profiili lineaariyksikön kuularuuville, jotta simulaatio ottaisi huomioon tästä syntyvän inertian vaikutuksen ajoprofiileille. Vasemmasta sivuvalikosta valittiin ”spindle”, josta päästiin syöttämään kuularuuvien tiedot sovellukselle.

Kohta ”Thread lead” tarkoittaa kuularuuvien yhden kierroksen aikana luomaa lineaarisen liikkeen matkaa, joka tässä tapauksessa oli 30 mm. Kuularuuvien omaa inertiaa varten aukaistiin uusi näkymä painamalla ”spindle inertia” kohdan vieressä olevaa harmaata näppäintä. Tästä auenneeseen ikkunaan syötettiin kuularuuvien loput suhdanteet, kuten halkaisija, materiaali ja pituus. Lopuksi syötettiin vielä järjestelmällä ajettavien kappaleiden maksimimassa, jonka tilaaja oli arvioinut







olevan noin 5 kiloa, ja valittiin alasettovalikoista toteutettavaa järjestelmää varten sopivimmat valinnat.



Kuvio 4 Motion Designer – ohjelmiston kuularuuvien profiili ja tiedostopuu.

Sama toimenpide toistettiin kuularuuvien ja servomootorin välisille hammasrattaille ja hihnalle. Kuviosta 5 näkyvästä ylävalikosta valittiin kohta "Transmissions", ja tästä auenneen näkymän vasemmasta laidasta kohta "Belt Drive". Auenneeseen asetusnäkyymään syötettiin hammasrattaiden halkaisijat, rattaiden välisen hihnan massa ja käytetyn hihnan tyyppi, eli hammashihna.

Tämän lisäksi sovellukseen täytyi syöttää servomootorin sekä hammasrattaiden inertiat, joista moottori oli helposti selvitettävissä valmistajan tietolehtien avulla. Hammasrattaiden osalta sovellus pystyi laskemaan inertian automaattisesti, mutta tätä varten jouduttiin syöttämään hammasrattaiden fyysiset suureet samalla tavalla kuin aiemmin kuularuuvien kanssa.

Load	Motion profile	Transmissions	Drive components	BOM	Emergency stop	Summary
Gear ratio	1					
Motor side inertia	0,381	kgcm <sup>2</sup>				
Efficiency	98	%				
			 <b>1. Belt drive</b> <b>Belt drive</b>		Add Insert before Remove	
<div>  <b>Belt drive</b> </div> <div>  <b>Clutch</b> </div> <div>  <b>Gear stage</b> </div> <div>  <b>Gearbox</b> </div>						
			<b>Settings</b>			
			Description: Belt drive			
			Motor side diameter $[\Phi d_1]$ : 33 mm			
			Load side diameter $[\Phi d_2]$ : 33 mm			
			Motor side inertia $[I_{1add}]$ : 0,262 kgcm <sup>2</sup>			
			Load side inertia $[I_{2add}]$ : 0,0872 kgcm <sup>2</sup>			
			Belt mass $[m_{belt}]$ : 0,0117 kg			
			Idle torque $[T_{123}]$ : 0 Nm			
			Efficiency $[\eta]$ : Toothed belt 98 %			
			<b>Result</b>			
			Gear ratio: 1			
			Motor side inertia: 0,381 kgcm <sup>2</sup>			
			Efficiency: 98 %			

Kuvio 5 Motion Designer – ohjelmiston hammasrattaiden ja hihnan profiili.

Sovelluksen sisäiseen inertia ja massa laskimeen luotiin kaksi uutta profiilia kummallekin rattaalle. Profiileiden asetuksiin syötettiin kuvion 6 mukaisesti rattaitten sisä- ja ulkohalkaisijat, materiaali-paksuus sekä materiaalivahvuus. Tähän syötettiin myös rattaiden pystysuuntainen etäisyys niitä pyörittävistä akseleista, joka tässä tapauksessa, rattaiden ollessa akseleissa suoraan kiinni, oli 0 mm. Lopuksi valittiin vielä alavetovalikosta pyörimissuuntaa vastaava akselisto.

Settings	
Description	Moottorin hammaspyörä
Mass calculation	Density
Number $[n]$	1
Mode	Addition
Outer diameter $[D_o]$	33 mm
Inner diameter $[D_i]$	24 mm
Height $[h]$	20 mm
Distance to axis $[d]$	0 mm
Rotary axis	A axis
Density $[\rho]$	Aluminium cast
	2,6 kg/l

Kuvio 6 Motion Designer – ohjelmiston inertia ja massalaskin.

Seuraavaksi päästiin valitsemaan servomoottori sekä servo-ohjain. Yläpalkista siirryttiin kohtaan ”Drive Components”, jonka jälkeen valittiin keskivalikosta kohta ”Motor”. Kuviossa 7 esitetyn näkymän oikeasta alanurkasta painamalla pystyttiin näkemään sovelluksen tämänhetkisten tietojen perusteella ehdottamia servomoottoreita. Valitsemalla jokin servomoottori listasta, näyttää sovel-  
lus valitun moottorin tiedot sekä jännitekäyrät. Tässä tapauksessa servomoottori oli jo hankittu, joten valittiin listasta AM8122-xJx0-0000, joka vastaa työssä käytettyä servomoottoria AM8122-wjyz.

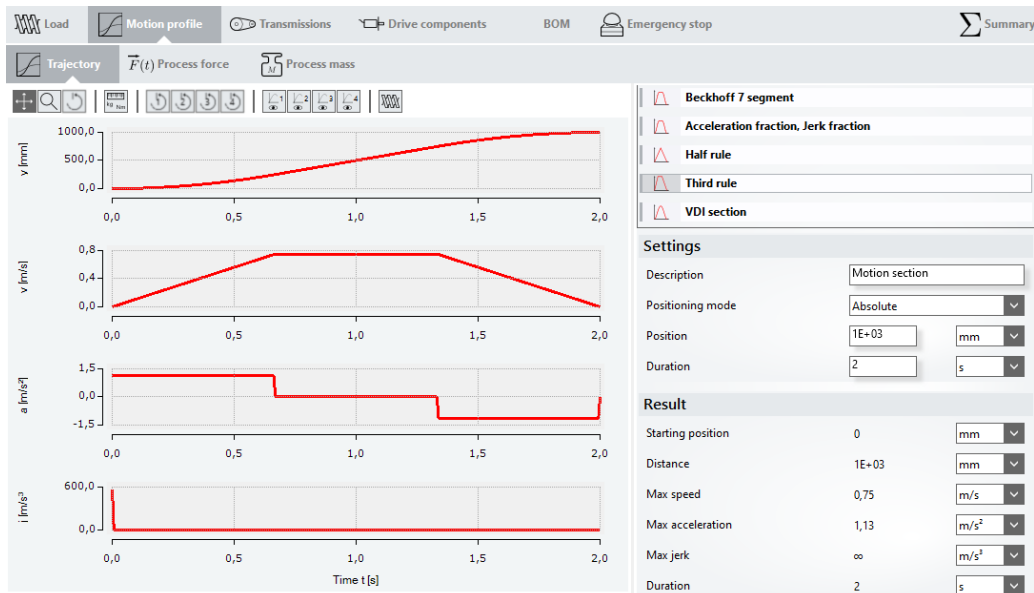
Servo-ohjaimen osalta siirryttiin keskivalikosta kohtaan ”Drive”, joka toimii samalla tavalla kuin servomoottorin valintasivu. Oikeasta alanurkasta valittiin työssä käytetty EL7221-9014 servo-ohjainyksikkö.



Kuvio 7 Motion Designer – ohjelmiston servomoottorin valinta.

Ennen tulosten tarkastelua täytyi vielä tarkastella liikeasetuksia kohdasta ”Motion profile”. Kuvion 8 mukaiselta sivulta voitiin tarkastella ja valita eri liikeprofiileja, joita servomoottorilla voitaisiin ajaa. Lisäksi pystyttiin määrittämään simulointia varten kuljettavan matkan pituus sekä aika, jossa matka tulisi toteutua. Opinnäytetyön tapauksessa, lineaariyksikön liikeradan ollessa 1000 mm

pitkä, käytettiin tätä tietoa kuljettavan matkan kohdalla. Ajan osalta päädyttiin kokeilemaan miten jarrutusajat ja maksiminopeudet muuttuisivat sen perusteella, kuinka monta sekuntia ajettavan matkan kestoksi laitettiin.



Kuvio 8 Motion Designer – ohjelmiston liikeprofiilit ja asetukset.

Tulosten tarkastamista varten siirryttiin yläpalkista kohtaan "Emergency stop". Valikoidusta, kuvion 9 mukaisesta, aukeamasta päästiin tutkimaan valittujen asetusten perusteella simuloituja jarrutusnopeuksia sekä -aikoja. Käyttämällä edellä mainituissa liikeprofiili asetuksissa matkana 1000 mm ja aikana 2 sekuntia, olisi järjestelmän maksiminopeus 750 mm/s ja jarrutusaika 0,0485 sekuntia. Laskemalla aikaa yhteen sekuntiin, saatiin maksiminopeudeksi 1500 mm/s ja jarrutusajaksi 0,0971 sekuntia.



Kuvio 9 Motion Designer – ohjelmiston simuloimat nopeudet sekä jarrutusajat.

Tulosten perusteella pystyttiin tilaajan kanssa päättämään, että järjestelmä on enemmän kuin tarpeeksi nopea jarrutuksenkin suhteen, riippumatta siitä millä nopeuksilla laitteistoa ajetaan. Päädyttiin kuitenkin tilaajan kanssa rajoittamaan lineaariservoyksikön käyttönopeus 750 mm/s: iin lisäturvallisuuden vuoksi ja koska todennäköistä on, että he eivät tule tarvitsemaan suurempia nopeuksia lineaariservoyksiköllä.

## 5.2 Lineaariservoyksikön kytkennät

Ennen kuin järjestelmän kytkennät aloitettiin, tarkasteltiin työhön valikoituneiden ohjauslogiikka yksiköiden käyttöönotto-ohjeita ja tietolehtiä. Yksiköt käyttävät Ether-BUS tekniikkaa, jossa korttien kyljissä on virran- ja tiedonkulun mahdollistavat liitoskohdat, joilla eri yksiköt voivat keskustella niin keskenään kuin myös ohjauksesta vastaavalle IPC:llekin. Työssä käytettävien yksiköiden välillä on kuitenkin eroja, sillä laitteiston valmistaja on määritellyt osan EL- ja ES-yksiköistä passiiviyksiköiksi, joka tarkoittaa, että ne eivät siirrä tietoa, eivätkä ota virtaa E-Bus liitoksen kautta. Tämä voi valmistajan mukaan johtaa tiedonsiirto-ongelmiin, jos passiiviyksiköitä on enemmän kuin kaksi vierekkäin.



Työhön valikoidut yksiköt asennettiin alla olevaan järjestykseen valmistajan passiiviterminaalien tunnistamiseen luodun ohjeistuksen (Installing passive EtherCAT Terminals, n.d.) avulla, joka määrittelee terminaalien tunnistamisen TwinCAT 3 – ohjelmiston kautta.

- EK1100 – Linkki
- EL9222-5500 – Ylivirtasuojayksikkö
- EL1008 – Tuloyksikkö
- EL2008 – Lähtöyksikkö
- EL7221-9014 – Servo-ohjainyksikkö
- EL9576 – Jarrukatkojyksikkö
- EL2911 – Turvaohjainyksikkö

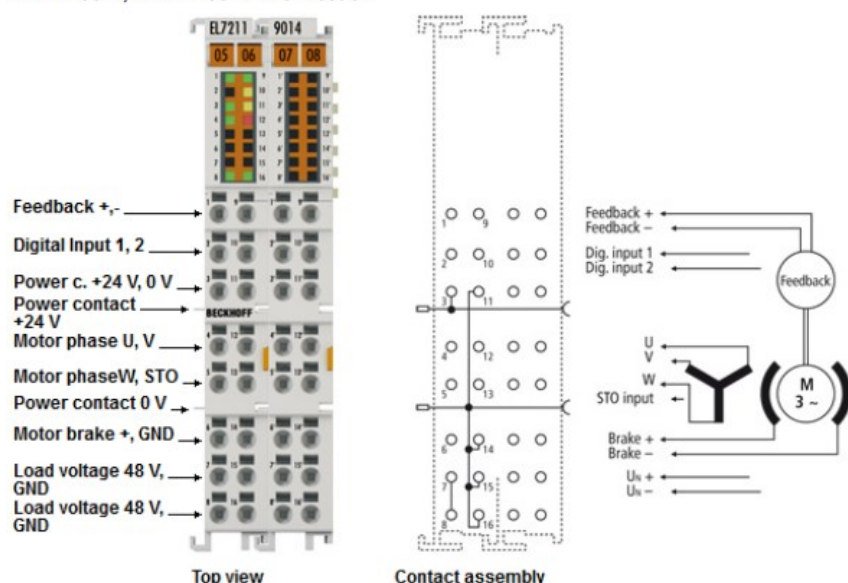
Varsinaiset kytkennät aloitettiin selvittämällä mitkä yksiköt vaativat 24 V jännitteen suoraan virtalähteeltä. Tutkimalla yksiköiden tietolehtiä ja kytkentäkaavioita, selvitettiin, että EL9222-, EL9576- ja EL2911-yksikkö sekä EK1100 kytkin, vaativat suoran kytköksen 24 V virtalähteelle kyljissä olevien virtakoskettimien lisäksi. Tässä vaiheessa on myös hyvä huomioda, että opinnäytetyön aikana virtalähteenä käytettiin erillistä väliaikaista 24 V tasajännitteistä virtalähdettä, vaikka tilaaja oli hankkinut järjestelmälle oman erillisen virtalähteen, jonka tarkoitus on tulla myöhemmässä vaiheessa pysyväksi osaksi kokoonpanoa. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut itse opinnäytetyön tekemiseen millään tavalla. Tilaaja kuitenkin halusi järjestelmän valmiiksi, ennen kuin asennuttaa lopullisen virtalähteen paikalleen.

Ylivirtasuojayksikön EL9222 tapauksessa suojaus muille korteille saadaan sekä E-Bus virtakoskettimen, että yksikön edustalla olevan turvatun ulostulon kautta. E-Bus virtakosketin suojaa kaikki EL9222 – yksikön jälkeen asennetut yksiköt, jotka saavat virtansa E-Bus koskettimien kautta. Tästä huolimatta, turvattua ulostuloa käytettiin suojatun jännitelähteen takaamiseksi turvaohjainyksikölle EL2911, joka vaatii 24 V tasajännitteen liitäntöihin 3' ja 4'.

Yksiköt EL1008 sekä EL2008, vastaavasti tulo- ja lähtöyksikkö, kytkettiin ensimmäisinä ylivirtasuojayksikön EL9222 jälkeen. Kuten aiemmin mainittiin, EL2008 lähtöyksikköä ei tässä työssä ole käytetty, vaan sitä pidetään varalla tilaajan myöhempää käyttöä varten. EL1008 tuloyksikköä kuitenkin käytettiin, sillä siihen kytkettiin turvatoimien resetointi, jolla TwinCAT 3 – ohjelmistossa luodun turvalogiikan laukeamisen saa nollattua järjestelmän operoinnin jatkamista varten. Turvatoimien resetointi kytkettiin EL1008 – tuloyksikön liitäntään 2.

Servo-ohjaimena toimivaan EL7221-9014 yksikköön kytkettiin järjestelmässä käytettävä servo-moottori AM8122-wJyz kuviossa 10 näkyvän kytkentäkaavion mukaisesti. Moottorilta tulevat OCT + sekä OCT – johdot, jotka vastaavat takaisinkytkennästä, kytkettiin liittäntöihin 1 ja 9. Servomoottorin U, V ja W vaihteiden tiedosta vastaavat johdot kytkettiin liittäntöihin 4, 5 sekä 12. Jarrutusenergian osalta, jonka servomoottori siirtää ohjauskaapelin mukana servo-ohjaimelle, kytkettiin kyseiset johdot servo-ohjaimen liittimiin 6 ja 14. Ylimääräisen jarrutusenergian asianmukaisen häivyttämisen vuoksi kytkettiin vielä servo-ohjaimen liittimet 7 ja 15 jarrukatkojajyksikön EL9576 liittimiin 4 ja 8.

EL7211-901x, EL7221-901x - Connection



Kuvio 10 EL7221-9014 (EL72x1-901x, 2024, 60).

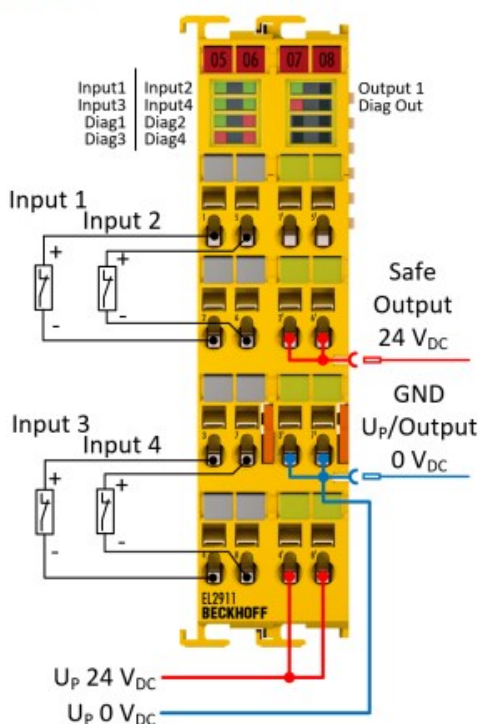
EL9576 jarrukatkojajyksikön tapauksessa täytyi ottaa huomioon edellä mainittu riittävän jännitteen takaaminen suoraan virtalähteeltä. Valmistajan ohjeistuksen mukaan yksikkö vaatii E-Bus koskettimien kautta tulevan jännitteen lisäksi vähintään 18 V jännitteen laitteen etuliitännöiden kautta. Tämä toteutettiin kytkemällä johdot virtalähteeltä suoraan jarrukatkojan liittäntöihin 3 ja 7. Tämän lisäksi järjestelmän servomoottorilta tulevan jarrutusenergian siirrosta vastaavat johdot on edellä mainitun mukaisesti kytketty liittimiin 4 ja 8. Jotta jarrutusenergia saadaan hävitettyä asianmukaisesti ja tehokkaasti, oli jarrukatkojajyksikölle hankittu tilaajan toimesta erillinen ZB8110 vastus, joka tässä tapauksessa yhdistettiin liittimiin 1 ja 5.

Järjestelmän turvallisuudesta vastaavan EL2911 turvaohjainyksikön kytkennät aloitettiin tarkastelemalla kuviosta 11 näkyvää turvaohjainyksikön kytkentäkaaviota. Kytkentä aloitettiin kytkemällä ylivirtasuojayksikön EL9222 suojatusta ulostulosta vastaavat liittimet 5 ja 7 turvaohjainyksikön EL2911 liittäntöihin 3' ja 4', suojatun 24 V jännitteen takaamiseksi. EL2911 omaa suojaustoimien mukaisen turvallisen lähdön liittännöissä 2' ja 6', joista liitin 2' kytkettiin servo-ohjainyksikön EL7221-9014 liittäntään 13, joka toimii STO-tulona. STO-tulon aktivoituessa, pysäyttää se järjestelmän kulun sen kytkeytyessä päälle.

Myös hätäseis-painike sekä valoverhot kytkettiin turvaohjainyksikköön EL2911. Hätäseispainike toimii tässä tapauksessa kahdella NC (Normally Closed) kytkimellä, jotka kytkettiin yksikön liittimiin pareina, liittimiin 1 ja 2, sekä liittimiin 5 ja 6. Työssä käytettävien valoverhojen osalta kytkentä on hieman erilainen. Turvaohjainyksikön EL2911 valmistajan mukaan valoverhoilta tulevat tietokaapelit, joita on kaksi, tulee kytkeä kahden eri tuloliitännän välille (Application Guide TwinSAFE 2024, 108). Tässä vaiheessa ainoat vapaat tuloparit turvayksikössä EL2911, olivat tulo 3 ja tulo 4, jotka vastaavasti ovat liittimien 3 ja 4, sekä 7 ja 8 välillä. Täten valoverhojen tietokaapelit kytkettiin liittimiin 4 ja 8, jotta ohjeistuksen mukainen kahden kanavan käyttö toteutuisi.

#### 5.2.4.4

#### Connection



Kuvio 11 EL2911 (EL2911 and EL2911-2200, 2024, 40).

### 5.3 Kokonaisuuden kotelointi

Lineaariservoyksikön kotelointi aloitettiin pituuden päättämällä, sillä vaadittu korkeus ja leveys oli huomioitu jo aiemmin standardien SFS-EN ISO 13855 ja SFS-EN ISO 13857 avulla. Pituuden ha-  
luttiin pysyvän maltillisena sijoitussijaintia varten, mutta kuitenkin sisältävän hieman liikkumava-  
raa ohjauslogiikkaan kuuluvien yksiköiden ja IPC:n asennusta varten. Tässä tapauksessa päädyttiin  
pituudelta sisämittaan 1420 mm, joka jättäisi noin 70 mm väliä näytelaatasta kumpaankin päähän.  
Samalla päätettiin ohjauskomponenttien sijoituksesta laitteiston vasempaan etukulmaan, jolloin  
siihen olisi yksinkertaista päästä käsiksi, mutta olisi kuitenkin sijoitettuna turvallisesti laitteiston  
turvalaitteiden taakse.

Koteloinnin runkomateriaaliksi valikoituneesta 40 x 40 mm alumiiniprofiilista leikattiin vannesahan  
avulla aluksi kaksi 1420 mm ja kaksi 630 mm pitkää kappaletta kotelon pohjaksi, jotka kiinnitettiin  
toisiinsa alumiinikulmakiinnikkeillä. Kokoamisen aikana päädyttiin kahden 560 mm pitkän lisäki-  
kon käyttöön pohjan sisällä, sillä se mahdollistaisi lineaariservoyksikön kiinnityksen koteloon ja  
edesauttaisi koko rakennelman vakautta.

Seuraavana askeleena oli tuoda kotelon pääty- ja takaseinät ylös. Aiemmin tehtyjen standardimi-  
toitusten ja suunnittelun aikana oli koteloinnin korkeuden osalta päädytty 700 millimetriin, joka  
tarkoitti, että kulmiin tulevan kiskot tulisi katkaista noin 620 mm mittaan, sillä pohjalle ja päälle  
tulevat alumiiniprofiilit kasvattavat kokonaiskorkeutta noin 80 mm. Aiemmin käytettyjä kulmakiin-  
nikkeitä ei voitu käyttää profiileiden kiinnittämiseen pohjaan, sillä runkoon jäävät avonaiset sivut  
oli myöhemmin tarkoitus peittää suljetun kokonaisuuden saavuttamiseksi. Täten päädyttiin käyttä-  
mään matalaprofiilisia L-kiinnikkeitä, jotka pystyttiin asentamaan alumiiniprofiileiden pintaan ko-  
telon rungon ulkopinnoille, jossa ne eivät olisi tiellä.

Lopuksi katkaistiin kotelon yläreunoille tulevat alumiiniprofiilit, mittaan 1420 mm ja 630 mm, joita  
kumpaakin tehtiin kaksi, niin kuin pohjallekin. Katkaistut alumiiniprofiilit kiinnitettiin ensin toisiinsa  
kulmakiinnikkeillä, jonka jälkeen valmis kehikko kiinnitettiin runkoon L-kiinnikkeillä. Tässä vai-  
heessa leikattiin valmiiksi myös yksi ylimääräinen 1420 mm profiili, joka asennettiin kotelon päälle  
noin 400 mm etäisyydelle etureunasta, jolloin standardiosiossa määritelty etäisyys vaaravyöhyk-  
keestä toteutuisi.

Kotelon rungon valmistuttua siirryttiin asentamaan ohjauskomponentit sekä lineaariyksikkö kotelon sisälle. Lineaariyksikkö sijoitettiin siten, että mahdollisesta näytelaatasta jäisi kumpaankin päähän noin 70 mm väliä, jonka jälkeen se kiinnitettiin pohjalle asennettuihin lisäkiskoihin pulteilla. Ohjauslogiikkayksiköt kytkettiin DIN-kiskoon, joka asennettiin 50 x 50 mm kokoisen alustan päälle laitteiston vasempaan etureunaan yhdessä ohjaukseen käytettävän IPC:n kanssa. Lopuksi asennettiin vielä hätäseis-painike alustavasti kotelon vasempaan päättyyn yläreunaan, ja valoverhot kotelon edustalle runkopalkkeihin pienemmillä kulmakiinnikkeillä.

Jotta kotelo olisi suljettu, täytyi etusivua lukuun ottamatta muut sivut peittää. Tätä varten seinämiksi valittiin polykarbonaattilevy, eli pleksi, joka pystytettiin asentamaan alumiiniprofiileissa sijaitseviin uriin. Pleksi leikattiin koteloinnin sivuja vastaaviin mittoihin, jonka lisäksi ne asennettiin paikoilleen yhdessä kapeiden muovilistojen kanssa. Muovilistat painavat pleksiä alumiiniprofiiliin, jolloin ne eivät kykene liikkumaan urien välissä.

## 6 Ohjauslogiikan ohjelmointi

Lineaariservoyksikön valmistuttua kokoonpanon kannalta, siirryttiin ohjelmoimaan järjestelmän ohjauslogiikkaa sekä turvalaitteita TwinCAT 3 – ohjelmistolla. Ohjelmointi suoritettiin Beckhoffin ohjeistuksen pohjalta, aloittaen ohjauslogiikan määrittämisestä projektin pohjaksi, jonka jälkeen luotiin turvatoiminnoista vastaava ohjelmointi, ennen kuin siirryttiin alustavan ajo-ohjelman pariin.

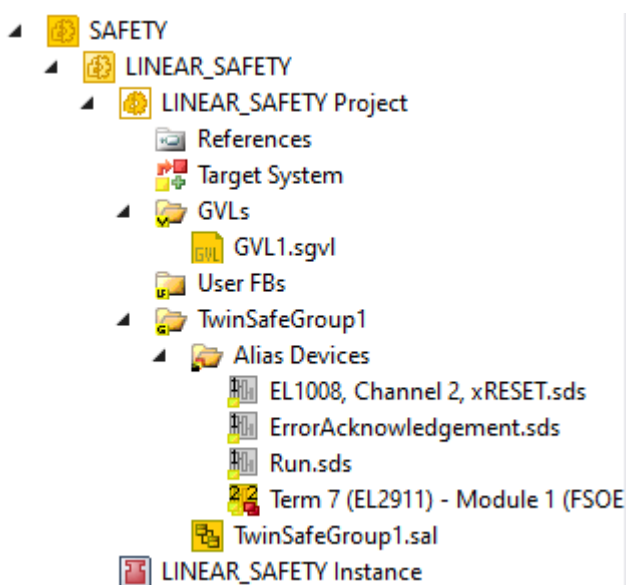
Ennen turvatoimien sekä ajo-ohjelman luontia, täytyi TwinCAT 3 – ohjelmistolla luoda projekti. Projektin luomiseen ja yhteyden määrittämiseen laitteistolle käytettiin Beckhoffin ”Information System” - palvelusta löytyvää ”TwinCAT Quick Start” - ohjeistusta (TwinCAT Quick Start N.d.). Samassa ohjeistuksessa esitetään myös PLC – ohjelmointiympäristön luominen, muuttujien määrittämisen ohjelmointia varten ja lopuksi valmiin ohjelman latauksen ohjauslogiikalle.

Samalla määritettiin standardiosiossa päätetty maksiminopeus sekä lineaariakselin raja-asennot projektin tietoihin. Maksiminopeuden osalta navigoitiin kuvion 11 osoittamasta tiedostopuusta ”Motion” - valikon alta löytyvään ”Axis A” valintaan, josta kuvion 12 parametrivalikosta pystyttiin syöttämään määritelty 700 mm/s maksiminopeus servomoottorille. Lineaariakselin raja-asennoiden määrittäminen tehtiin samanlailla, tosin tällä kertaa valitsemalla tiedostopuusta ”Axis A” va-



## 6.1 Turvatoiminnot ja TwinSAFE

Turvatoimintojen ohjelmointi toteutettiin TwinCAT 3 – ohjelmistolla, joka mahdollistaa TwinSAFE-komponenttien turvatoimintojen realisoinnin. Turvatoimien ohjelmointi aloitettiin luomalla TwinCAT 3 – projektille oma ”Safety - project”, eli turvaprojekti, joka linkitettiin ohjauslogiikassa olevaan EL2911 turvaohjainyksikköön kuviossa 13 näkyvän tiedostopuussa sijaitsevan ”Target System” valinnan kautta.



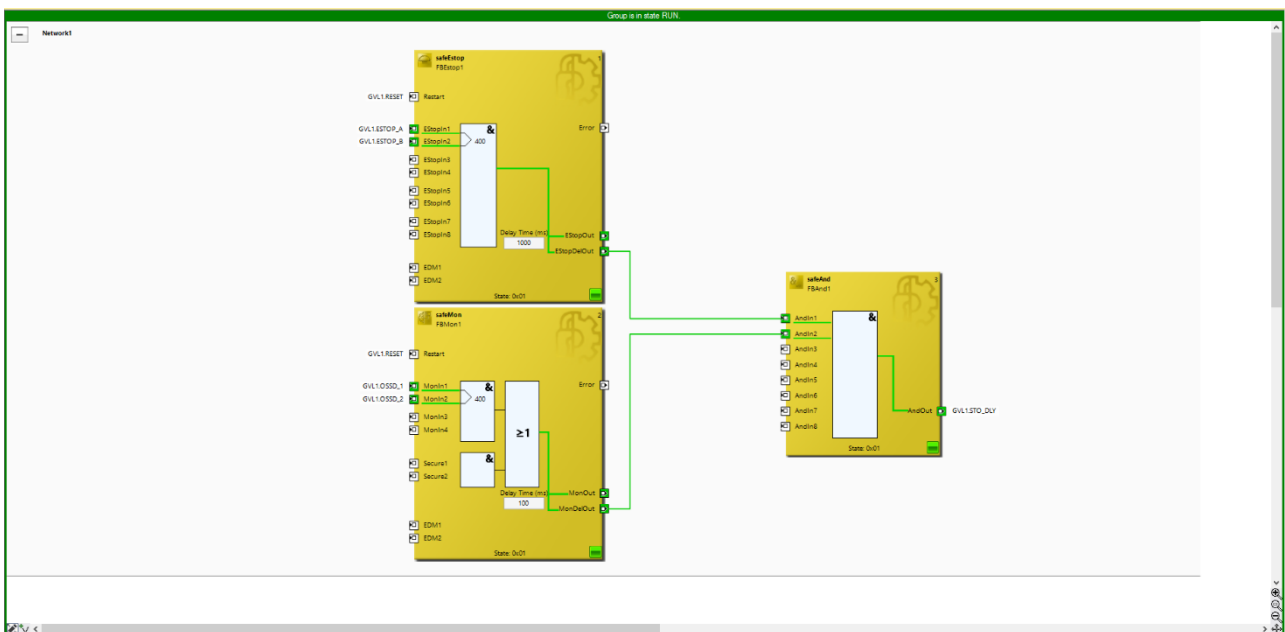
Kuvio 14 TwinCAT 3 – ohjelmiston ”safety” – projektin tiedostopuu.

Komponenttilinkin luomisen jälkeen siirryttiin itse ohjelmointiin. Valitsemalla tiedostopuusta ”TwinSafeGroup” päästiin kuvion 14 mukaiseen näkymään, jossa FBD-logiikkaohjelmoinnilla toteutettava turvatoimien ohjelmointi tapahtuisi. Ohjelmointia varten tutkittiin valmistajan luomaa TwinSAFE – ohjeistuksesta kappaletta 2.1 ”ESTOP function variant 1” (Application Guide TwinSAFE 2024, 16), jossa määritellään opinnäytetyön mukaisen hätäseis-painikkeen ohjelmointi käyttäen ”Emergency Stop” funktiota. Luotiin siis ESTOP – funktio, johon määriteltiin tuloliitännöiksi EL2911 turvaohjainyksikköön kytketyt hätäseis-painikkeen liittimet.

Sama operaatio toistettiin valoverhojen osalta, jota varten tarkasteltiin TwinSAFE – ohjeistuksen kappaletta 3.7 ”Light curtain” (Application Guide TwinSAFE 2024, 108). Ohjeistuksen mukaan valo-

verhoilta tulevien OSSD1 sekä OSSD2 tietojen välinen monitorointi tapahtuu ”Machine Monitoring” funktion avulla, jossa funktio vertailee lähettimen ja vastaanottimen välistä häiriötä, jonka esiintyessä turvatoimet laukeavat. Ohjeistuksen mukaisesti projektiin lisättiin ”Machine Monitoring” - funktio, joka näkyy kuviossa 14, johon turvaohjainyksikön EL2911 valoverhoille määrätyt liittimet lisättiin tuloliitännöiksi.

Järjestelmän pysähtymiseksi tarvittiin vielä funktio, jolla voidaan deaktivoida servo-ohjainyksikön EL7221-9014 STO-tulo. TwinSafeGroup – projektiin lisättiin tätä varten ”safeAND” - funktio, joka vaatii molemmilta turvalaitteilta ja niitä vastaavilta funktioilta tiedon, että turvalaitteet ovat toiminnassa eivätkä ole laenneet. Tapauksessa, jossa jompi kumpi turvalaitteista laukeaisi, katkeaa toinen ”safeAND” - funktiolle tuleva heräte, joka taas deaktivoi STO-tuloon liitetyn muuttujan, täten pysäyttäen järjestelmän kulun. Samalla lisättiin molempien edellä luotujen turvalaitteiden funktioihin ”Restart” - muuttuja, joka työn tapauksessa linkitettiin tuloyksikön EL1008 liittimeen 3. ”Restart” - muuttuja nimensä mukaisesti resetoi turvalaitteiden laukeamisesta johtuvan turvatilan, ja mahdollistaa järjestelmän käytön jatkamista.



Kuvio 15 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu ”safety” – projekti.



Turvatoimien ohjelmoinnin valmistuttua, todennettiin vielä turvatoimien toimivuus ajamalla ohjelmointia järjestelmän kanssa. Todettiin, että valoverhojen tai hätäseis-painikkeen laukaisusta järjestelmä meni turvatilaan, jossa servomoottorin jarrut aktivoituivat ja ohjelmakoodin suoritus pysähtyi. Samalla saatiin visuaalinen todennus standardiosiossa määritellyistä mitoituksista, kun pystyttiin seuraamaan järjestelmän pysähtymisnopeutta.

## 6.2 Alustavan ajo-ohjelman luominen

Ajo-ohjelman ohjelmointiin käytettiin niin aiempaa ohjelmoinnin osaamista, kuin myös Beckhoffin tietojärjestelmän TwinCAT 3 | PLC (2024) – ohjeistusta.

Ohjelmointiin luotiin ensiksi tietueet servomoottorin ohjaukselle, servomoottorilta saataville tiedoille sekä manuaalijon painikkeille. Tietueissa käytetään komentoja, joille määritetään muuttujat, joita ohjelmointi käyttää tietueen käyttötarkoituksen perusteella esimerkiksi servomoottorin ohjaamiseen. Samalla luotiin yleiset muuttujat, jotka yhdistettiin luotuihin tietueisiin, jotta tietueissa määritellyt komennot olisivat käytettävissä ohjelmarakenteessa. Tietueiden käyttö mahdollistaa ohjelmoinnissa selkeän erottelun komentojen välillä etuliitteidensä takia. Kuviossa 15 on esimerkkinä tietueen "ST\_AxisCommand" rakenne, joka siis vastaa servomoottorin ohjauksesta.

```

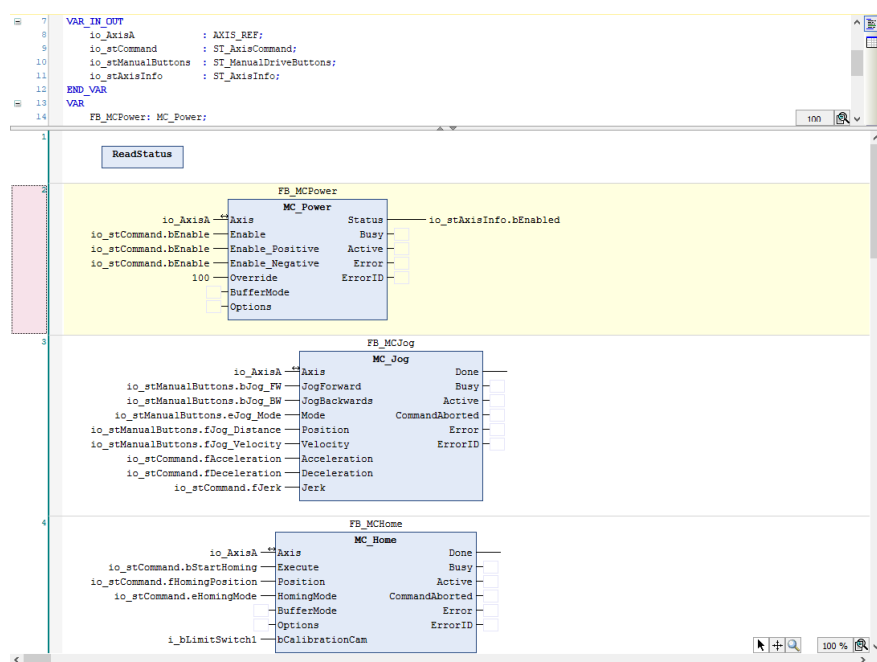
1  TYPE ST_AxisCommand :
2  STRUCT
3      bEnable           : BOOL; //Enables axis
4      bStartHoming      : BOOL; //Starts homing process
5      fHomingPosition   : LREAL:= 0; //Position that is set at the completion of Homing.
6      bStartMoveAbsolute : BOOL; //Starts an absolute move.
7      bStartNewPosVelo   : BOOL;
8      bStartVelocity     : BOOL; //Starting Velocity
9      bHalt              : BOOL;
10     bStop              : BOOL;
11     bReset              : BOOL; //Reset
12     fPosition           : LREAL; //Position
13     fVelocity           : LREAL:= 100; //Preset Velocity to be used in association with "stCommand".
14     fAcceleration       : LREAL:= 1000; //Preset Acceleration to be used in association with "stCommand".
15     fDeceleration       : LREAL:= 5000; //Preset Deceleration to be used in association with "stCommand".
16     fJerk                : LREAL:= 5000; //Preset Jerk to be used in associaton with "stCommand".
17     eHomingMode         : MC_HomingMode := MC_HomingMode.MC_DefaultHoming; //Homing mode defined by TwinCAT3.
18 END_STRUCT
19 END_TYPE
20

```

Kuvio 16 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luodun "ST\_AxisCommand" – tietue.

Seuraavaksi luotiin ”Function Block Diagram (FBD)” – ohjelmointikielellä servomoottorin ohjauksesta vastaava ohjelma. Ohjelman nimeksi annettiin ”Control” ja siihen lisättiin TwinCAT 3 – ohjelmiston mukana tulleet valmiit funktiot. Funktiot ovat määritelty ohjelmistossa käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi funktio ”MC\_Power”, vastaa servomoottorin käynnistyksestä ja ”MC\_Jog” manuaaliajosta. Funktioita lisättiin siis edellä mainittujen lisäksi servomoottorin akseliston virhetilan resetoimista, paikoitusajoa, jarruttamista, sammuttamista sekä kotiuttamista varten.

Kuviossa 16 on esimerkkinä työlle luotu ohjelma, jossa voidaan nähdä käytettyjä funktioita sekä muuttujia, joita funktiot käyttävät toiminnassaan. Muuttujat tulevat siis aiemmin luoduista tietueista, jonka takia tietueet tuli määrittää käytettäväksi tähän ohjausohjelmaan. Tämä toteutettiin kuvion yläosiossa näkyvässä ”VAR\_IN\_OUT” kohdassa, jossa tietueet yhdistettiin etuliitteisiin, joita ohjelmoinnissa käytettiin.

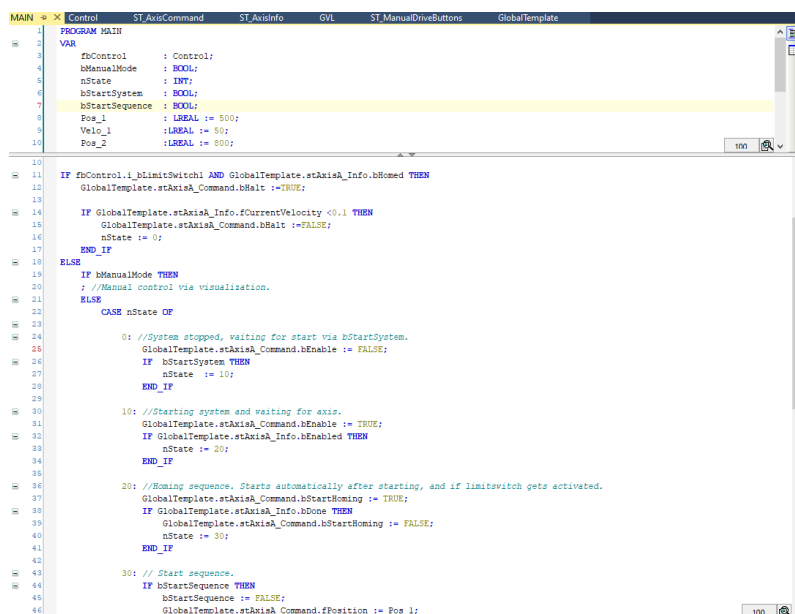


Kuvio 17 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu ”Control” ohjelma.

Lopuksi luotiin vielä pääohjelmointi, joka sitoo luodut osiot yhteen ja mahdollistaa lineaariservoyksikön käytön. Pääohjelman käytettäväksi määriteltiin edellä luotu ”Control” – ohjelma, jonka lisäksi luotiin muutamia paikallisia muuttujia, joita ohjelmoinnissa käytettiin. Muuttujat nimettiin käyttötarkoituksen mukaan sekä muuttujatyypin mukaan, esimerkiksi ”bStartSystem”, joka on BOOL – muuttuja, joka vastaa järjestelmän käynnistämisestä.

Laitteiston ohjaus toteutettiin ohjelmoinnissa ”Case” – rakenteella, jossa lineaariservoyksikön ohjauksessa suoritettavat eri vaiheet jaoteltiin useisiin osioihin, joita pystyttiin tilanteen mukaan kutsumaan yksi kerrallaan.

Pääohjelma luotiin kuvion 17 mukaisesti, jossa lineaariservoyksikön käynnistäminen aloittaa automaattisesti koodista ”0”, joka edustaa pysähtynyttä järjestelmää ja on niin sanottu aloituspiste, josta ohjelmoinnin kulku alkaa. Tässä yhteydessä nähdään myös ”IF” – rakenne, joka muuttaa koodiksi ”10”, jos muuttuja ”bStartSystem”, joka on käyttöliittymässä sijaitseva käynnistyspainike, kytetään päälle. Tämän jälkeen koodissa ”10”, ohjelmointi odottaa servomootorilta valmiustietoa, jonka jälkeen ohjelma siirtyy koodiin ”20”, joka taas aloittaa lineaariservoyksikön kotiutustoiminnon, jonka tehtävä on paikoittaa näytelaatan sijainti lineaariakselilla. Onnistuneen kotiutuksen jälkeen ohjelma siirtyy koodiin ”30”, jonka jälkeen lineaariservoyksikköä voidaan ajattaa halutulla tavalla.

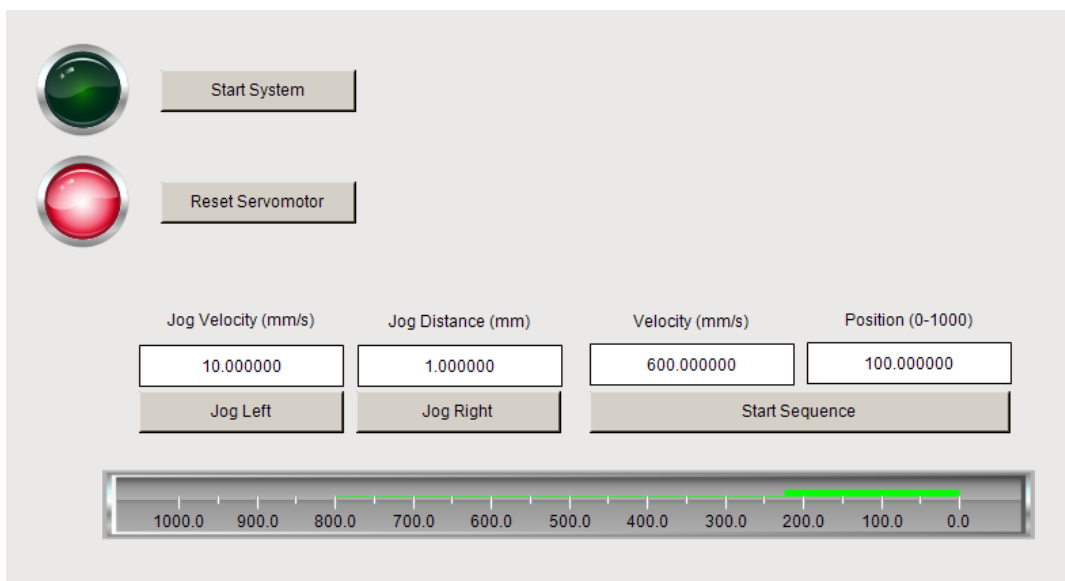


Kuvio 18 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu pääohjelma.

## 6.3 Ajo-ohjelman käyttöliittymä

Lineaariservoyksikön ajattamista varten toteutettiin viimeisenä käyttöliittymä valmistajalta löytyvän TwinCAT 3 - käyttöliittymä ohjeistuksen (Creating a visualization n.d.) avulla.

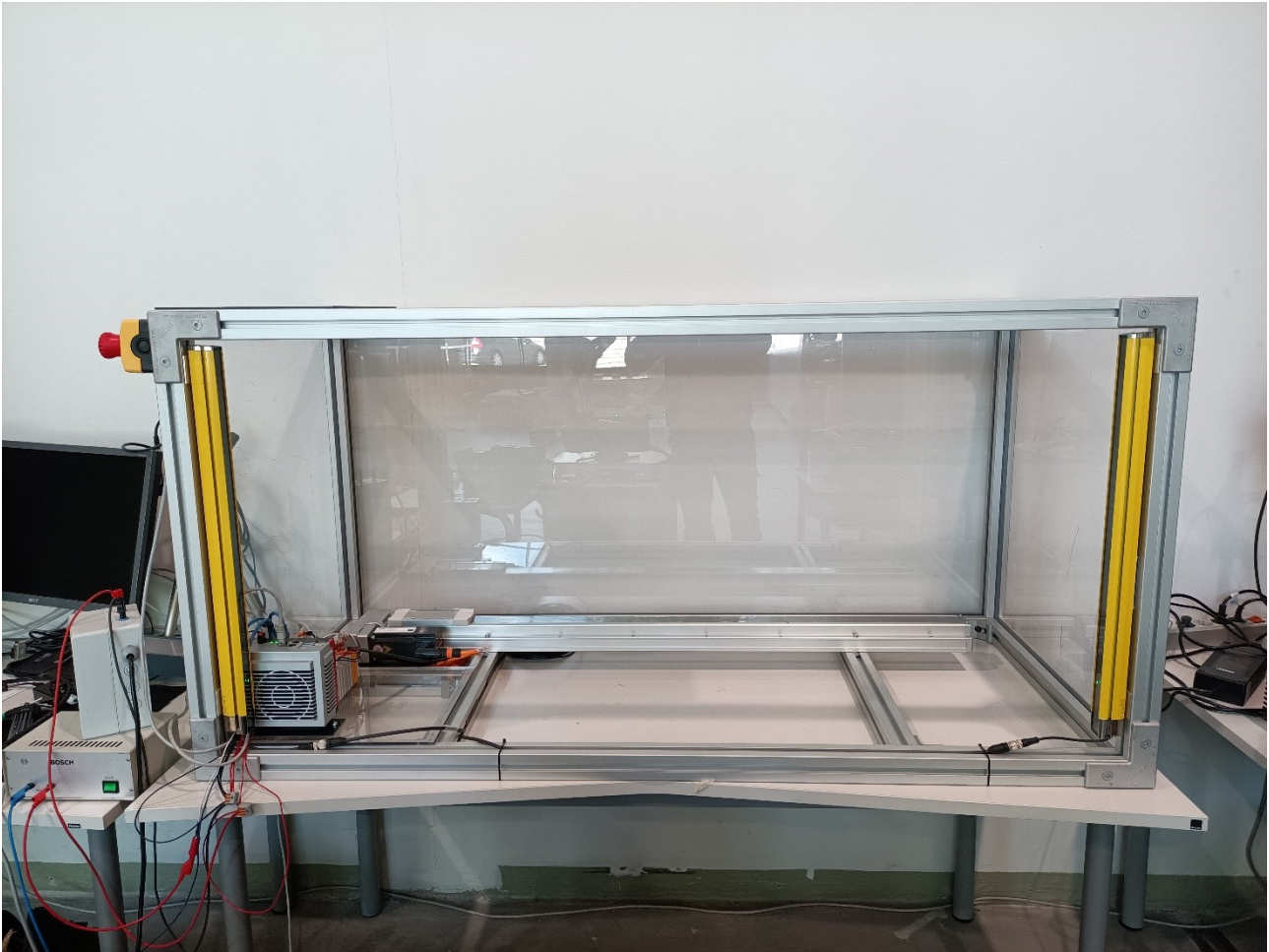
Luotiin kuvion 18 mukainen yksinkertainen käyttöliittymä, jonka kentät, painikkeet sekä ledit ovat yhdistetty ajo-ohjelmassa käytettyihin muuttujiin. Käynnistys- ja resetoitipainike ohjaavat vastavasti servomoottorin käynnistystä sekä turvatoimien laukaisusta johtuvaa servomoottorin pysähdystä. Manuaaliajolle toteutettu ratkaisu omaa kaksi kenttää, joista voidaan säätää manuaaliajon nopeutta sekä askelpituutta, sekä kaksi ajosuunnasta vastaava painiketta. Paikoituspisteeseen perustuvalle sekvenssiajolle luotiin omat muuttujat nopeuden sekä position osalta, jonka lisäksi luotiin "Start Sequence" - painike, jolla sekvenssiajon saa päälle. Lopuksi lisättiin vielä yksinkertainen visualisaatio näytelaatan paikoituksesta lineaariakselilla ohjauspainikkeiden alle.



Kuvio 19 TwinCAT 3 – ohjelmistossa luotu käyttöliittymä.

## 7 Tulokset ja pohdinta

Opinnäytetyön tuloksena saatiin toteutettua tilaajalle kuvion 20 mukainen toimiva lineaariservoyksikkö. Tavoitteiden osalta, tarkemmin turvallistamisen puolesta, saatiin tämä toteutettua hyvin. Turvalaitteisiin lukeutuvan valoverhon kohdalla saatiin standardinmukaiset mitoitus suoritettua, jonka pohjalta asennukset sekä sijoittelu toteutettiin. Hätäseis-painikkeen osalta kytkennät sekä toiminta saatiin myös toteutettua, mutta jätettiin lopullinen sijoittelu tilaajalle. Hätäseis-painike siis kiinnitettiin koteloinnin vasempaan pätyyn, tosin vain alustavasti, jotta tilaaja voi preferenssinsä mukaan siirtää painikkeen sijaintia.



Kuvio 20 Toteutettu lineaariservoyksikkö

Turvatoimien ohjelmoinnin osalta onnistuttiin toteuttamaan kokonaisuus, jossa turvalaitteiden laukeaminen pysäyttää ajo-ohjelman kulun, ja jarruttaa servomootoria, kunnes lineaariservoyksikkö pysähtyy. Turvatoimien ohjelmointi ei siis vaadi tilaajalta jatkotoimenpiteitä, vaan luotu ohjelma on käytettävissä ja kopioitavissa muihin mahdollisiin lineaariservoyksikölle toteutettaviin ohjelmointeihin. Myös ajo-ohjelman ohjelmoinnin suhteen saatiin toivottu alustava rakenne suurimmaksi osaksi toteutettua. Ohjelmointi on ajokelpoinen ja rakennettu perusrungoltaan pisteeseen, josta tilaaja voi jatkaa ohjelman toimintojen lisäämistä.

Ohjauslogiikan ja laitteiston kytkentöjen osalta päästiin myös tavoitteisiin. Ohjauslogiikan keskeiset kytkennät, sekä yksiköiden lisälaitteiden, kuten jarruvastuksen ja turvalaitteiden kytkennät, toteutettiin toimivasti valmiiksi. Kuten toteutus vaiheessa mainittiin, oli tilaaja hankkinut myös virtalähteen, joka tulee osaksi laitteistoa myöhemmässä vaiheessa. Tämän vuoksi jätettiin

virtalähteelle kytkettävät johdot pidemmiksi ja sijoitettiin ne laitteiston vasempaan etukulmaan asennuksen helpottamiseksi.

Lopuksi toteutettu kotelointi, johon lineaariservoyksikkö, ohjauslogiikka sekä turvalaitteet asennettiin, osoittautui myös onnistuneeksi. Kotelointi saatiin standardien avulla mitoittettua sisältämään tilaajan toivoman avonaisen takareunan, joka mahdollistaa myöhemmin asennettavan kameran selkeään kuvantamisen laitteistosta. Lisäksi kotelointiin käytetyn paksumman alumiiniprofiilin sekä pleksin ansiosta kokonaisuudesta saatiin vankka rakenne, joka tulee turvaamaan niin laitteistoa kuin laitteiston käyttäjiä. Kotelointi saatiin myös pysymään tilaajan sijoitustoi-veen suhtaisissa mitoissa, jolloin toista säilytyspaikkaa järjestelmälle ei tarvitse alkaa etsimään.

## 7.1 Tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön alussa mietittyihin tutkimuskysymyksiin saatiin projektin aikana selkeät vastaukset, joita käytettiin lineaariservoyksikön toteutuksessa.

Maksiminopeus ja sitä vastaavaa jarrutusaikaa, joita kartoitettiin teoriaosuudessa, päästiin selkeään lopputulokseen. Suuremmillakin nopeuksilla järjestelmä kykenee jarruttamaan hyvinkin nopeasti, jonka seurauksena maksiminopeuden rajaaminen oli pikemminkin lisäturva laitteistolle itselleen ja toteutettiin suurimmaksi osaksi valoverhojen vähimmäisetäisyyden vuoksi, johon jarrutusaika vaikutti suoraan.

Valoverhon vähimmäisetäisyyteen lineaariservoyksikön vaaravyöhykkeestä saatiin myös vastattua. Standardien avulla toteutettu mitoitus antoi myös hyvää näkökulmaa huomioon otettavista asioista, joita tämän tyylisten etäisyyksien mitoittamisessa tulee ottaa huomioon. Tarkemmin siis käytetyn laitteiston vasteajat, valitun turvalaitteen havaitsemiskyky sekä nopeus, jolla turvattavaa laitteistoa tul-taisiin ajamaan. Saatiin siis selvitettyä standardinmukainen etäisyys turvalaitteelle, joka toteutettiin laitteiston koteloinnin yhteydessä.

Tutkimuskysymysten luomat vastaukset todennettiin vielä käytännössä projektin lopussa, jolloin lineaariservoyksikön jarrutusajan ja valoverhojen etäisyyden riittävyyttä pystyttiin käytännössä ko-keilemaan. Ajettiin siis laitteistoa määritetyllä maksiminopeudella, ja visuaalisesti todettiin teori-assa määriteltyjen turvatoimintojen riittäisyys kokonaisuudelle.

## 7.2 Jatkokehityskohteet

Jatkokehityskohteita, joita toteutetulle laitteistolle voisi tehdä on muutama. Tilaajan kanssa oli keskusteltu lineaariservoyksikön fyysisten rajojen turvaamisesta, jotta järjestelmää ajettaessa ei vahingossa väännätettäisi servomoottoria väkisin laitteiston ulkorajoja vasten. Rajat on kyllä määritelty ohjauslogiikalle ohjelmointipohjaisesti, jonka lisäksi käytettävissä oli induktioanturit, joita koitettiin soveltaa järjestelmälle sopivaksi. Ohjelmoinnissa toteutettu kotiutustoiminto saatiin näillä käytettävissä olevilla antureilla tehtyä, mutta antureiden havaitsemiskyky osoittautui liian heikoksi lineaariservoyksikön alumiinirunkoa varten. Täten jätettiin induktioanturit asentamatta ja ehdotettiin tilaajalle toisena ratkaisuna mekaanisia rajakytkimiä, jotka voisi asentaa laitteistoon lähes samalla tavalla. Ohjelmointi on kuitenkin toteutettu valmiiksi, joten tilaajalle jäisi vain rajakytkimien asennuttaminen laitteiston lineaariakselin päihin, ja kaapeloinnin vaihtaminen kytkennöissä.

Toinen huomio on ohjelmoinnin osalta. Ohjelmointi luotiin opinnäytetyön aikana siis alustavaan vaiheeseen, josta tilaaja voi jatkaa ajo-ohjelman rakentamista. Vaikka luotu ajo-ohjelma ajaa asiansa ja toimii, ehdotettiin tilaajalle lisätoimintojen ohjelmointia, oli se sitten tilaajan omasta toimesta tai osana opetustoimintaa. Ajo-ohjelmaan voisi lisätä useamman paikoituspisteen välisen ajotilan, joka mahdollisesti toimisi jatkuvasti, kunnes ohjelma pysäytetään. Lisäksi jatkokehittävää jäi käyttöliittymän selainversion osalta, joka mahdollistaisi käyttöliittymän käytön IP-osoitteen avulla järjestelmän ulkopuoliselta tietokoneelta. Tätä selainversiota ei ajanpuutteen takia keretty opinnäytetyön aikana toteuttamaan.

Lineaariservoyksikön osalta ainut toteuttamatta jäänyt asia oli lineaarisen akselin päällä kulkevan näytelaatan luominen, jota ei myöskään keretty toteuttamaan rajallisen ajan vuoksi. Lineaariservoyksikkö siis omaa akselillaan liikkuvan kiinnityskappaleen, jolle tilaaja oli toivonut suuremman näytelaatan. Näytelaatalle on yksikössä kiinnikkeet valmiina, ja se suunniteltiin olemaan maksimissaan 300 x 300 mm suuri, sillä näytelaatan koko vaikutti koteloinnin mittojen määrittämiseen ja lineaariservoyksikön sijaintiin koteloinnin sisällä. Materiaalina oli suunniteltu käytettävän jonkin sortin kovempaa muovia, joka voisi olla jäykkyytensä mukaan noin 10–25 mm paksua.

## Lähteet

AM8122-wJyz. N.d. Servomotor 0.80 Nm (M0), F2 (58 mm). Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 15.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/products/motion/rotary-servo-motors/am8100-servomotors-for-compact-drive-technology/am8122-wjyz.html?>.

Application Guide TwinSAFE. 2024. Examples for the calculation of safety parameters for safety functions. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 17.5.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/35674424>.

C6030-0070. N.d. Ultra Compact Industrial PC. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 24.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/products/ipc/pcs/c60xx-ultra-compact-industrial-pcs/c6030-0070.html>.

Creating a visualization. N.d. TwinCAT 3 PLC. Beckhoff Information System. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 2.6.2024. [https://infosys.beckhoff.com/content/1033/tc3\\_plc\\_intro/35233778034359666571.html?id=5935399907570540863](https://infosys.beckhoff.com/content/1033/tc3_plc_intro/35233778034359666571.html?id=5935399907570540863).

EK110x-00xx, EK15xx. 2024. EtherCAT Bus Coupler. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 23.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/62252449>.

EL10xx, EL11xx. 2024. Digital Input Terminals. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 24.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/51480897>.

EL20xx, EL2124. 2024. Digital Output Terminals. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 25.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/51478519>.

EL2911 and EL2911-2200. 2024. TwinSAFE Potential Supply Terminal with 3 digital fail-safe inputs. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 23.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/292788744>.

EL72x1-901x. 2024. Servo Motor Terminals with OCT and STO, 48 V DC. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 23.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/145474641>.

EL922x. 2024. Electronic Overcurrent Protection Terminals. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 24.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/302392311>.

EL9576. 2024. Brake Chopper Terminal with EtherCAT connection. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 25.3.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/69587958>.

ELC 100. 2024. Safety light curtain. Leuze electronic GmbH + Co. KG. Viitattu 23.3.2024. [https://files.leuze.com/Volumes/Volume0/opasdata/d100001/medias/docus/303/\\$v4/UM\\_ELC100\\_en\\_50145374.pdf](https://files.leuze.com/Volumes/Volume0/opasdata/d100001/medias/docus/303/$v4/UM_ELC100_en_50145374.pdf).

Installing passive EtherCAT Terminals. N.d. Beckhoff Information System. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 30.3.2024. [https://infosys.beckhoff.com/content/1033/cx9020\\_hw/3592409355.html?id=5142570320394256374](https://infosys.beckhoff.com/content/1033/cx9020_hw/3592409355.html?id=5142570320394256374).



SFS-EN ISO 13855:2010. Koneturvallisuus. Suojausteknisten laitteiden sijoitus ottaen huomioon kehon osien lähestymisnopeudet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Julk. 03.09.2010. Viitattu 23.3.2024. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

SFS-EN ISO 13857:2019. Koneturvallisuus. Turvaetäisyydet yläraajojen ja alaraajojen ulottumisen estämiseksi vaaravyöhykkeille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. Julk. 18.02.2020. Viitattu 23.3.2024. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

Slider Type. N.d. LEF Series. SMC Corporation. Viitattu 23.3.2024. [https://ca01.smcworld.com/catalog/Electric-en/mpv/Electric-LEF\\_en/index.html#target/page\\_no=1](https://ca01.smcworld.com/catalog/Electric-en/mpv/Electric-LEF_en/index.html#target/page_no=1).

TE5910. 2021. TC3 Motion Designer. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 11.5.2024. <https://www.beckhoff.com/en-en/download/129790851>.

TwinCAT 3 | PLC . 2024. Beckhoff Information System. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 1.6.2024. [https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc3\\_plc\\_intro/2525041803.html&id=](https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc3_plc_intro/2525041803.html&id=).

TwinCAT Quick Start. N.d. TwinCAT 3. Beckhoff Information System. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. Viitattu 31.5.2024. [https://infosys.beckhoff.com/content/1033/el2202\\_el2252/2584719371.html?id=1816427838288390485](https://infosys.beckhoff.com/content/1033/el2202_el2252/2584719371.html?id=1816427838288390485).

## Liitteet