



Teollisuuden sahalaitteen koneenrakennusprojekti

Jyri Jokela

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Automaatiotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Automaatiotekniikka

JOKELA, JYRI:
Teollisuuden sahalaitteen koneenrakennusprojekti

Opinnäytetyö 83 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Marraskuu 2023

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa teollisuuden sahakone osaksi asiakkaan komposiittitankojen valmistusprosessia. Työssä toteutettavan sahalaitteen oli täytettävä asiakkaan koneelle määrittämät suoritusarvot. Lisäksi laitteen oli pystyttävä toimimaan osana asiakkaan komposiittitankojen tuotantoprosessia. Tuotantoprosessissa sahakone teki pultrusiotuotantolinjalta tuleville komposiittitangoille jälkityöstön sekä valvoi työstettyjen tuotteiden laatua.

Opinnäytteessä suunniteltiin ja toteutettiin sahalaitteen automaatiojärjestelmä kokonaisuudessaan ohjaus- ja oheiskomponenttien valinnasta laitteen ohjelmointiin asti. Opinnäytetyö toteutettiin osana SSG Sahala Oy:n asiakasprojektia, ja asiakkaana toimi kemianteollisuuden komposiittituotteita valmistava yritys. Sahalaitteeseen toteutettiin innovatiivisia ominaisuuksia, kuten komposiittitankojen pituutta valvova mittausjärjestelmä.

Sahalaitteeseen valittiin niiden käyttötarkoitukseen soveltuvat komponentit sekä suunniteltiin laitteen piirikaaviot. Sahalaitteen komponenttien soveltuvuuden arviointi tehtiin teoreettisten laskelmien sekä esiselvityksen kautta. Komponenttivalintojen sekä piirikaavioiden suunnittelun jälkeen toteutettiin sahalaitteen PLC-ohjelma sekä fyysinen kokoonpano. Tämän jälkeen suoritettiin laitteen käyttöönottomittaukset sekä tehdastestaukset. Tehdastestauksen valmistumisen jälkeen valmis sahakone toimitettiin asiakkaalle, ja se asennettiin osaksi asiakkaan tuotantoprosessia.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin koneenrakennusprosessia laitteen esisuunnittelusta asiakkaalle luovuttamiseen asti. Työssä esiteltiin koneenrakennusprojektin eri osavaiheet sekä pyrittiin perustelemaan tehdyt tekniset ratkaisut teoreettisten mallien sekä laskelmien kautta. Työssä pohdittiin myös kehitysehdotuksia vastaavanlaisien pultrusiosahalaitteiden rakentamista varten.

Kyseiseen sahalaitteeseen kehitetty mittausjärjestelmä mahdollistaa tuotteiden jälkilajittelun kokonaisvaltaisen automatisoinnin, jonka tuotantoa tehostava hyöty olisi otettava kokonaisvaltaisesti käyttöön. Sahalaitteen mittausjärjestelmällä voitaisiin lajitella hylätyt tuotteet omaan tuotesiloonsa, jolloin ne eivät enää menisi hyväksytyjen kappaleiden sekaan.

Asiasanat: erikoiskone, suunnitteluprojekti, koneautomaatio, sahakone, ohjelmointi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering

JOKELA, JYRI:
Engineering Project for an Industrial Sawing Machine

Bachelor's thesis 83 pages, appendices 7 pages
November 2023

The purpose of the thesis was to implement an industrial sawing machine as part of the customer's composite bar manufacturing process. The saw equipment implemented in the work had to meet the performance values set for the machine by the customer's production process.

In the thesis, the automation system of the sawing machine was designed and implemented. The thesis was carried out as a part of SSG Sahala Oy's customer project. Innovative features were implemented in the sawing machine, for example, a measuring system for controlling the length of composite rods.

The components suitable for their purpose of use were selected for the sawing machine, and the circuit diagrams of the device were designed. The assessment of the applicability of the components of the sawing device was attempted through theoretical calculations and preliminary investigation. After the component selections and the implementation of the circuit diagrams, the PLC of the sawing machine was programmed and the physical version of the machine was constructed. After this, factory testing of the device was performed and the saw machine was installed as part of the customer's production process.

The work goes through the various sub-phases of the mechanical engineering project and aims to justify the technical solutions made through theoretical models and calculations. The work also reviews development proposals for the construction of similar pultrusion sawing machines. The measurement system developed for the sawing machine in question enables comprehensive automation of post-sorting of products, whose production-enhancing benefit should be implemented comprehensively.

Key words: special machine, design project, machine automation, saw machine, programming

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
1.1	SSG Sahala yrityksenä	2
2	PROJEKTIN MÄÄRITTELY	4
2.1	Suoritusvaatimukset.....	4
2.1.1	Toiminnallinen kuvaus	4
3	SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOSUUNNITTELU	6
3.1	Laitteistomääritykset	6
3.1.1	Omron	7
3.1.2	Moottorien mitoitus	8
3.1.3	Koneautomaatio-ohjain.....	12
3.1.4	Liikkeenohjaukset.....	13
3.1.5	Analogiasignaalien tyypit	16
3.2	Ohjelmistoratkaisut.....	19
3.2.1	Omron Sysmac Studio.....	19
3.2.2	Omron NB-Designer	21
3.3	Väyläratkaisut.....	22
3.3.1	EtherCAT.....	22
3.3.2	EtherNet/IP	24
4	TOTEUTUS	26
4.1	Oikosulkumoottorien mitoitus	26
4.1.1	Kuorman määrittäminen	28
4.1.2	Kiihdytystilanne.....	30
4.1.3	Jatkuvan kuormituksen käyttötilanne.....	33
4.2	Koneautomaatio-ohjaimen valinta	34
4.3	Liikkeenohjauksien valinta	36
4.4	Servojen ohjaus	38
4.5	Sahakoneen EtherCAT-väylärakenne.....	43
4.6	Pituusvalvonta.....	46
4.7	Käyttöliittymän ohjelmointi.....	50
4.8	Automaatiokeskuksien kasaus	56
5	TOIMINNALLINEN TESTAUS	59
5.1	Tehdastestaus.....	59
6	YHTEENVETO.....	63
	LÄHTEET.....	67
	LIITTEET	70
	Liite 1. Oikosulkumoottorien mitoituksen MATLAB-koodi.....	70

Liite 2. NB-Designer-näytöt.....	74
----------------------------------	----

LYHENTEET JA TERMIT

Analogiasignaali	Signaali, joka voi saada mitä tahansa arvoja vaihteluvälinsä sisällä
CIP	Common Interface Protocol; Tiedonsiirtoprotokolla
DraftSight	Sähkösuunnittelu-sovellus
EMF	Electric and Magnetic Field; Sähkömagneettinen kenttä
EtherCAT	Ethernet-pohjainen avoin kenttäväyläprotokolla
EtherNet/IP	Ethernet-pohjainen avoin kenttäväyläprotokolla
IO	Input/Output; Ohjelmoitavan logiikan sisään- ja ulostulot
Koneautomaatio-ohjain	Ohjelmoitava logiikka integroidulla liikkeenohjaimella
MATLAB	Ohjelmisto ja ohjelmistokieli numeeriseen laskentaan
NB-Designer	Ohjelmointi- ja konfigurointiympäristö Omronin käyttöliittymille
Oikosulkumoottori	Epätahtinen kolmivaiheinen sähkömoottori
OSI-malli	Open Systems Interconnection; seitsemänkerroksinen malli tiedonsiirtoprotokollien kuvaamiseen
PLC	Programmable Logic Control; Ohjelmoitava logiikka
Servo	Tarkkaan säätöön tarkoitettu takaisinkytketty säätöpiiri tai sen osa
SIL	Safety Integrity Level; Turvallisuuden eheyden taso
Sysmac Studio	Ohjelmointi- ja konfigurointiympäristö Omronin laitteille
Taajuusmuuttaja	Moottorien ohjaukseen tarkoitettu komponentti
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol; tietoliikenneprotokollapino
Tehdastestaus	Laitteiston testaaminen koneenrakentajan tiloissa
Yaskawa Wizard	Konfigurointi- ja monitorointisovellus Yaskawan taajuusmuuttajille
<i>J</i>	Hitausmomentti, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
<i>J₁</i>	Hitausmomentti välityksen yli, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
<i>J₂</i>	Kuorman hitausmomentti, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
<i>J_{kuorma}</i>	Kuorman hitausmomentti, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
<i>J_{moottori}</i>	Moottorin hitausmomentti, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

m	Massa, kg
n_1	Moottorin puoleinen välitys
n_2	Kuorman puoleinen välitys
n_{nim}	Moottorin nimellisyörimänopeus, rpm
n_T	Tavoitepyörimänopeus, rpm
r	Säde, m
T_1	Moottorin puoleinen maksimimomentti, Nm
T_2	Kuormanpuoleinen maksimi- tai kuormamomentti, Nm
T_3	Moottorin maksimimomentti tavoitenopeudessa, Nm
T_k	Moottorin keskimääräinen kiihdyttävä momentti yli moottorin nimellisnopeuden, Nm
T_{kuorma}	Kuormamomentti, Nm
T_{max}	Moottorin maksimimomenttikerroin
$T_{moottori}$	Moottorin tuottama momentti, Nm
T_{nim}	Moottorin nimellismomentti, Nm
$T_{nim,alle}$	Moottorin nimellismomentti alle moottorin nimellisnopeuden, Nm
$T_{nim,yli}$	Moottorin nimellismomentti yli moottorin nimellisnopeuden, Nm
Δn	Moottorin kierrosnopeuden muutos, rpm
Δt	Moottorin kiihdytysaika, s
Δt_{alle}	Moottorin kiihdytysaika alle moottorin nimellisnopeuden, s
Δt_{yli}	Moottorin kiihdytysaika yli moottorin nimellisnopeuden, s
η	Välityksen hyötysuhde

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö kertoo komposiittiteollisuuden erikoiskoneen koneenrakennusprojektista. Opinnäytetyössä suunniteltiin ja toteutettiin sahakone osaksi asiakkaan tuotantoprosessia. Työssä käsitellään sahakoneen sähkö- ja automaatoratkaisujen suunnittelua ja toteutusta. Koneen suunnittelusta ja toteutuksesta vastasi SSG Sahala Oy:n Joensuun yksikkö. SSG Sahala on teollisuuden kunnossapitoon ja elinkaaripalveluihin erikoistunut yritys. Joensuun yksikön päätoimialana on erikoiskoneiden suunnittelu ja toteutus. Asiakkaana projektissa oli komposiittituotteita valmistava teollisuusyritys. Projekti lähti liikkeelle asiakkaan tarpeesta saada täysin uudenlainen sahakone osaksi valmistettavan tuotteen valmistusprosessia. Asiakkaan lopputuotteen tuotantoprosessi vaati tuotantolinjan sahalta uudenlaisia ominaisuuksia, mitä ei vastaavista vanhemmista asiakkaan sahalaitteista löytynyt. Asiakkaan lopputuotteen tuotantoprosessin tarpeet toivat tarpeen täysin uudelle sahalaitteelle.

Työ käynnistyi esisuunnittelulla, jossa määritettiin asiakkaan toiminnalliset tarpeet sahakoneelle sekä tarkkuusvaatimukset, joihin kyseisellä laitteella on tarkoitus päästä. Esisuunnittelun jälkeen alkoi sahakoneen varsinainen suunnittelu ja toteutus. Tavoitteena oli saada sahalaitteesta luotettava sekä tarkka, jotta lopputuotteen tuotantoprosessi olisi mahdollisimman sujuvaa ja kustannustehokasta. Sahalaitteen rakentamista auttoi Joensuun yksikön vahva osaaminen ja kokemus vastaavien erikoiskoneiden suunnittelusta ja toteutuksesta. Sahalaitteen uudenlaiset ominaisuudet toivat tarpeen kehittää koneeseen täysin uudenlaisia järjestelmiä. Uusien ominaisuuksien toimivuudesta ei ollut konetta suunnitellessa täyttä varmuutta, mutta teoreettinen tarkastelu ratkaisujen toimivuudesta toi varmuutta koneen suunnitteluun. Sahakone toteutettiin kokonaisuudessaan suunnittelusta toteutukseen asti Joensuun yksikön toimesta.

1.1 SSG Sahala yrityksenä

SSG Sahala on teollisuuden elinkaari palveluihin erikoistunut yritys, joka on perustettu vuonna 2008. Yrityksen liiketoiminta alkoi teollisuuden kunnossapidosta Varkaudessa, josta se laajeni muille paikkakunnille, kuten Joensuuhun ja Mäntyharjulle. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Varkaudessa ja sen liikevaihto on noin 18.5 miljoona euroa. Nykyisin SSG Sahalalla työskentelee 180 työntekijää kahdeksassa eri toimipisteessä. SSG Sahalalla on toimipisteet Joensuussa, Mäntyharjulla, Kouvolassa, Myllykoskella, Laukaassa, Oulussa sekä Pirkkalassa. Yrityksen pääliiketoiminta-alueeseen kuuluvat Pohjoismaat ja muu Eurooppa. SSG Sahalan pääliiketoimintaan kuuluvat teollisuuden kunnossapito sekä asennukset, suurien teräsrakenteiden kuten lämmönvaihtimien valmistus, erikoiskoneiden suunnittelu ja valmistus, työstökoneiden kunnossapito sekä modernisointi sekä tiedonkeruujärjestelmät kuten SSG Anywhere (SSG Sahala Oy, a). Kuvassa 1 on SSG Sahala Oy:n Logo.



KUVA 1. SSG Sahala Oy:n Logo. (SSG Sahala Oy, a)

Tämä opinnäytetyö tehtiin SSG Sahalan Joensuun yksikköön asiakastyönä. Joensuun yksikkö on Heinävaarassa sijaitseva moderni konepaja. Joensuun yksikkö on erikoistunut erikoiskoneiden suunnitteluun ja valmistukseen sekä haastavien yksittäisten kappaleiden koneistukseen. Joensuun yksikkö suunnittelee ja toteuttaa erilaisia erikoiskoneita ja tuotannonlaitteita, kuten erilaisia sahalaitteita

ja pultruusiotuotantolinjoja. Kyseinen yksikkö on erikoistunut mekaniikka- sekä automaatisuunnitteluun. Joensuun yksikön suunnittelemat erikoiskoneet ja niiden osat työstetään ja kasataan Joensuussa. (SSG Sahala Oy, b)

2 PROJEKTIN MÄÄRITTELY

Työn tarkoituksena oli osallistua teollisuuden konerakennusprojektiin, jossa opin- näytetyöntekijä vastasi suunniteltavan koneen automaatio- ja sähkölaitteistojen valinnasta, suunnittelusta, ohjelmoinnista sekä laitteen lopullisesta asentami- sesta asiakkaalle. Opinnäytetyöntekijä osallistui koneenrakennusprojektiin esi- suunnittelusta asiakkaalle luovuttamiseen asti. Rakennettavana laitteena oli kom- posiittiteollisuuden sahakone, joka asennettiin tuotantolinjalle osaksi komposiitti- tankojen valmistusprosessia. Työn tavoitteena oli oppia teollisuuden erikoisko- neiden rakennus- ja suunnitteluprojekteista. Konkreettisenä lopputuloksena opin- näytetyöstä syntyi rakennettavan sahalaitteen sähkökuvat, laiteluettelot, sisään- ja ulostulo (IO) -listat, ohjelmoitava logiikka (PLC) -ohjelma, automaatiokeskukset ja toimiva sahakone.

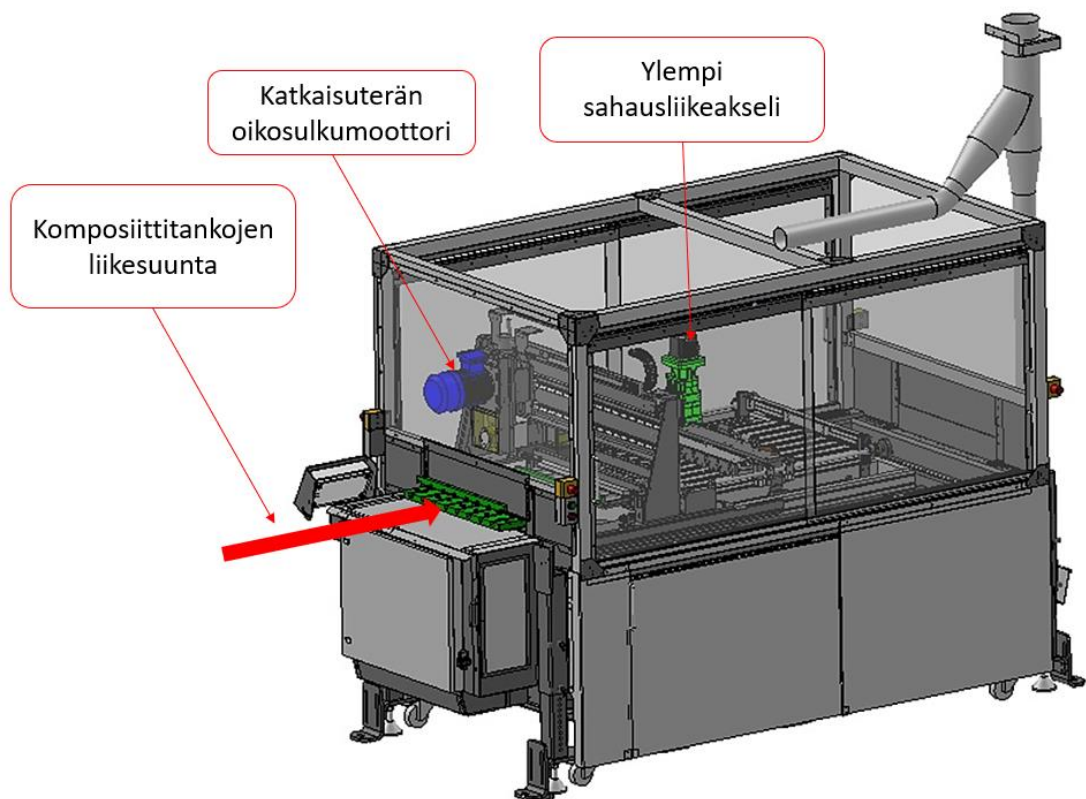
2.1 Suoritusvaatimukset

Rakennettavan sahalaitteen suunnittelua ja rakentamista määrittivät asiakkaan laitteelle määrittämät suoritusarvot. Sahalaitteen on kyettävä katkaisemaan sekä urittamaan kahdeksan komposiittitankoa vaihtelevilla tuotantolinjan tuotantono- peuksilla sekä sen on kyettävä mittamaan ja erottamaan sahatuista komposiitti- tangoista mahdolliset liian lyhyet komposiittitangot. Sahalaitteen on myös täytet- tävä säädösten ja lakien sille asettamat turvallisuusvaatimukset.

2.1.1 Toiminnallinen kuvaus

Sahattavana tuotteena on kahdeksan 15 mm komposiittitankoa, jotka saapuvat tuotantolinjalta sahalaitteelle kuvan 2 osoittamalla tavalla. Komposiittitankojen päiden saavuttaessa sahakoneen päätylevyn käynnistyy laitteen sahaussek- venssi. Komposiittitankojen saavuttaessa sahalaitteen päätylevyn alkaa saha- kelkka liikkua komposiittitankojen mukana sahan peräpäätä kohti. Sahaussek- venssin aikana sahalaitteen kaksi teräkelkkaa liikkuvat poikittain yli komposiitti- tankojen ja kelkoissa olevat teräpaketit katkaisevat ja urittavat komposiittitangot. Sahaussekvenssin aikana sahauslaite mittaa sahattavien tankojen pituuden ja

indikoi koneen käyttäjälle mahdollisista lyhyistä kappaleista merkkivaloin. Sahausten jälkeen sahakone siirtää sahatut tuotteet laitteen päässä sijaitseviin kouruihin. Koneen käyttäjä asettaa sahalaitteen sahaaman tuotteen pituuden haluttuun arvoon ja kone säätää automaattisesti sahaussekvenssiään asetetun arvon sekä tuotantolinjan nopeuden mukaan. Koneen käyttäjä pystyy ajamaan manuaalisesti sahalaitteen eri akseleita ja venttiilejä. Koneen käyttäjä pystyy säätämään sahalaitteen terien pyörimisnopeuksia sekä komposiittitankojen pituusvalvonnan toleranssia. Koneen käyttäjä pystyy käynnistämään sekä pysäyttämään sahakoneen sahaussekvenssin manuaalisesti.



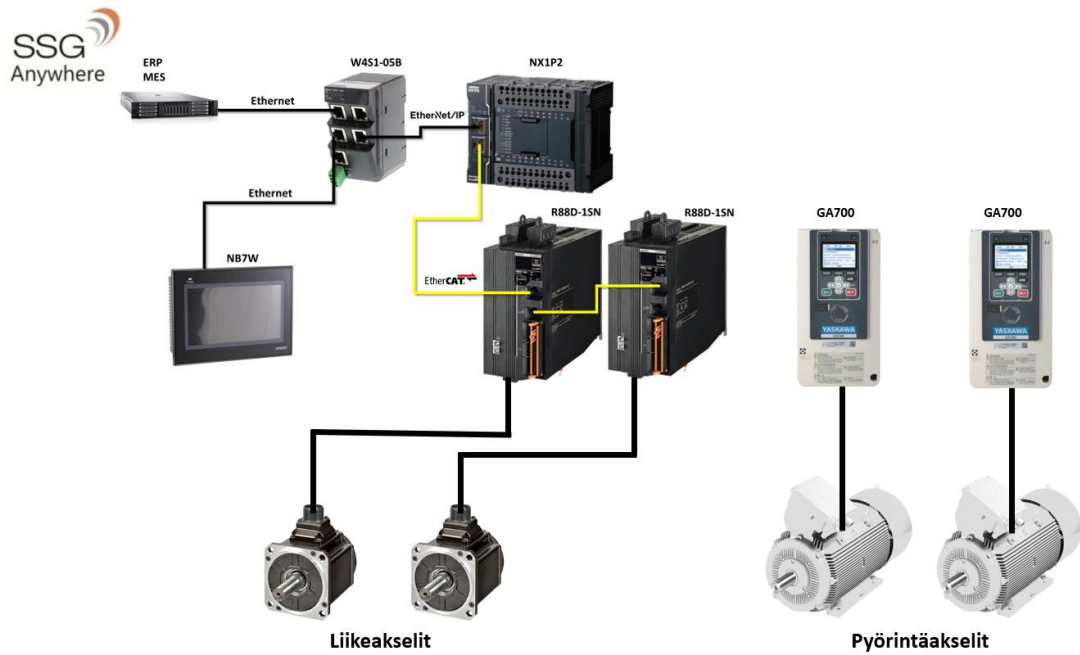
KUVA 2. Rakennettavan sahalaitteen mallinnuskuva.

3 SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOSUUNNITTELU

Sahalaitteen suunnittelussa käytettiin monenlaisia suunnittelu- ja ohjelmointiohjelmiä. Sahalaitteen oikosulkumoottorien mitoituksessa käytettiin MATLAB-laskentaohjelmaa, jolla mallinnettiin ja laskettiin moottoreiden eri käyttötilanteita. Sähkökuvien piirtämisessä käytettiin DraftSight-sähkösuunnittelusovellusta, jolla luotiin sahalaitteen sähkökuvat, keskuskaaviot sekä kaapelilistaukset. Sahalaitteen ohjelmoinnissa käytettiin Omron Sysmac Studio -nimistä automaatiojärjestelmien ohjelmointi- ja konfigurointisovellusta. Sahalaitteen käyttöliittymän ohjelmoinnissa käytettiin Omronin NB-Designer-ohjelmointisovellusta. Sahalaitteen taajuusmuuttajien konfigurointiin käytettiin Yaskawa Wizard konfigurointi- ja monitorointisovellusta.

3.1 Laitteistomääritykset

Sahalaitteen ohjauksessa käytettävän laitteiston valintaan vaikuttivat olennaisesti työkohteen laajuus, asiakkaan sahalaitteelle määrittämät suoritusarvot sekä laitteistovaatimukset. Sahalaitteen pääohjauskomponentiksi valikoitui Omronin valmistama koneautomaatio-ohjain, joka soveltuu erinomaisesti yksittäisen tuotannonlaitteen pääohjauskomponentiksi. Sahalaitteen teränsiirtoakselien ohjauksessa käytettiin Omronin S1-sarjan servokäyttöjä sekä katkaisuterien pyöritysmoottorien ohjauksessa Yaskawa GA700-sarjan taajuusmuuttajia. Sahalaitteen käyttöliittymänä käytettiin Omronin NB-sarjan käyttöliittymää. Havainnollistus sahalaitteen laitteistorakenteesta on kuvassa 3.



KUVA 3. Sahalaitteen laitteistorakenne.

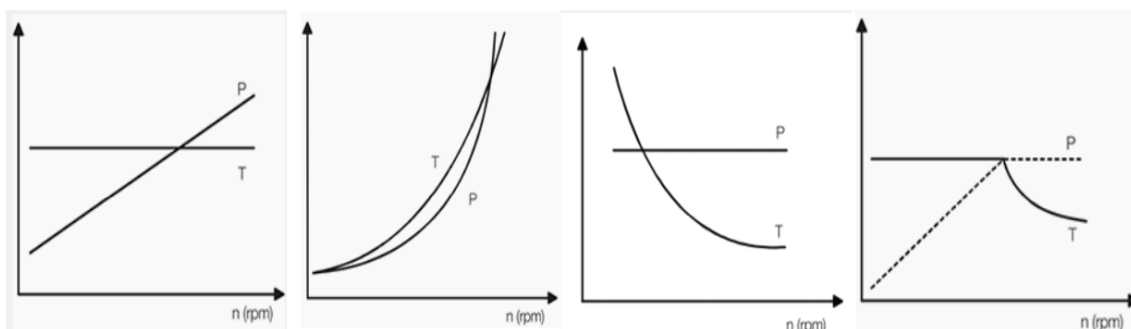
3.1.1 Omron

Omron on japanilainen vuonna 1933 perustettu kansainvälinen elektroniikkayritys, joka toimii noin 120 maassa neljällä eri mantereella. Yrityksessä työskentelee maailmanlaajuisesti yli 36 000 työntekijää. Yrityksen pääliiketoimintaryhmiin kuuluvat teollisuusautomaatio, elektroniset komponentit, sosiaaliset järjestelmät sekä terveydenhuolto. (Omron Corporation, a) Teollisuusautomaatio on Omronin pääliiketoimintaryhmä, jonka tuotteisiin kuuluvat esimerkiksi automaatio-ohjausjärjestelmät, automaatiokomponentit sekä teollisuusrobotit. Teollisuusautomaatio muodostaa noin 40 % Omronin liiketoiminnasta. Omronin liikevaihto oli vuonna 2015 noin kahdeksan miljardia dollaria. (Omron Corporation, b)

3.1.2 Moottorien mitoitus

Oikosulkumoottorien mitoittaminen perustuu kuorman moottorille asettamiin vaatimuksiin. Keskeisiä suureita moottorin mitoituksen kannalta ovat vaadittu pyörimisnopeusalue, sekä vaadittu teho tai momentti pyörimisnopeuden funktiona. Moottorin mitoituksessa on keskeistä, että moottorin momentintuotto on riittävä moottorin halutulla nopeusalueella (Hietalahti 2012). Liian pienellä momentintuotolla varustettu moottori ylikuormittuu jatkuvassa käytössä, mikä voi johtaa oikosulkumoottorin tuhoutumiseen.

Oikosulkumoottorin mitoituksessa on keskeistä määrittää kuorman tyyppi, jolle moottori mitoitetaan. Erilaisia kuormatyyppejä on muun muassa vakiomomenttikäyttö, neliöllinen momenttikäyttö, vakiotehokäyttö sekä vakioteho- ja vakiomomenttikäyttö. (Hietalahti 2012) Kuvassa 4 on esitettyä erilaisten kuormamomenttityyppien teho ja momentti pyörimisnopeuden funktiona.



KUVA 4. Kuvassa vasemmalta oikealle luettuna vakiomomenttikäyttö, neliöllinen momenttikäyttö, vakiotehokäyttö ja vakioteho- ja vakiomomenttikäyttö.

Oikosulkumoottorin mitoituksessa on keskeistä tehdä tarkastelu moottorikäytölle kiihdytystilanteen sekä jatkuvan kuormituksen käyttötilanteen näkökulmasta. Kiihdytyskäyttötilanteen tarkastelussa tehdään moottoritarkastelu kuormakiihdytyksen näkökulmasta. Kiihdytystilanteessa pyritään tarkastelemaan, että moottori pystyy tuottamaan tarvittavan kuormaa kiihdyttävän momentin, jotta kuorma kiihtyy halutussa ajassa haluttuun loppunopeuteensa. (ABB Industry Oy 2020)

Jatkuvan kuormituksen käyttötilanteessa tarkastellaan, että moottori pystyy tuottamaan tarvittavan momentin kuorman pyörittämiseen halutulla pyörimisnopeudella. Keskeistä on, että moottori pystyy tuottamaan tarvittavan momentin kaikissa moottorin käyttötilanteissa. Moottorin mitoituksessa siis tarkastellaan tuotetun momentin sekä kuorman tuottaman vastamomentin erosuuretta erilaisin laskennoin. (Hietalahti 2012)

Oikosulkumoottorin eri käyttötilanteissa on määritettävä ensin kuorman tyyppi, haluttu pyörimisnopeusalue, käytetty välitys, kuorman hitausmassa sekä kuormamomentti. Kuormamomentilla tarkoitetaan momenttia, jolla pyörivä kappale vastustaa pyörimistä. Välityksellä tarkoitetaan fyysistä kokoonpanoa, jolla voima välitetään moottorin akselilta kuormalle. Moottorikäytössä käytetty välitys vaikuttaa väännön sekä hitausmassan suuruuteen, joka vaikuttaa moottorin akselilla käytetyn välityksen yli. Pyörimisnopeusalueella tarkoitetaan nopeusaluetta, jolla mitoitettavaa moottoria on tarkoitus pyörittää.

Hitausmassalla tarkoitetaan suuretta, joka vastaa pyörivässä liikkeessä etenemisliikkeen massaa. Mitä suurempi kappaleen hitausmomentti on, sitä suurempi momentti vaaditaan, jotta kappale saadaan kiihtymään halutulla kulmakiihtyvyydellä. (Inkinen & Tuohi 2002). Hitausmassan määrittäminen käytetylle kuormalle on keskeistä kuorman kiihdytystilanteessa. Tällöin hitausmassa on yksi kuormamomenttia kasvattava komponentti.

Sahakoneen teräpakettien hitausmomentin määrittämisessä käytettiin yleistä sylinterimäisen kappaleen hitausmomentin J kaavaa (1). Kaavassa m on kappaleen massa ja r on kappaleen säde.

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (1)$$

Sahakoneen moottorien mitoituksessa oli keskeistä määrittää hitausmomentti, joka vaikutti moottorien akseleilla käytetyn välityksen yli. Kaavassa (2) on kuvattuna hitausmassan määrittäminen erilaisten välitysten yli. Kaavassa (2) J_1 on hitausmomentti välityksen yli, J_2 on kuorman hitausmomentti, n_2 on kuorman puoleinen välitys ja n_1 on moottorin puoleinen välitys.

$$J_1 = J_2 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (2)$$

Sahakoneen oikosulkumoottorien mitoituksessa täytyi määrittää kuorma- ja maksimimomentit, jotka vaikuttivat moottorien akseleilla käytettyjen välitysten yli. Moottorien akseleilla vaikuttavat kuorma- ja maksimimomentti T_1 saatiin laskettua kaavan (3) mukaan (Hietalahti 2012). Kaavassa (3) η on välityksen hyötysuhde, T_2 on kuorman puoleinen maksimi- tai kuormamomentti, n_2 on kuorman puoleinen välitys ja n_1 on moottorin puoleinen välitys.

$$T_1 = \frac{T_2}{\eta} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Sahakoneen oikosulkumoottorien mitoituksessa oli tärkeää saada sahan teräpaketit kiihtymään haluttuun loppunopeuteensa riittävän nopeasti. Tämän vuoksi laskettiin oikosulkumoottorien kiihdytysajat käytetyille moottoreille. Sahakoneen moottorien kokonaiskiihdytysajan laskemiseksi oli laskettava moottorien kiihdytysajat alle ja yli moottorien nimellispöörinnopeuksien. Kokonaiskiihdytysajan muodostaa näiden kiihdytysaikojen summa.

Moottorien kiihdytysajat Δt saatiin laskettua kaavaa (4) soveltamalla (Hietalahti 2012). Kiihdytysajan kaavassa (4) J_{kuorma} on kuorman hitausmomentti, $J_{moottori}$ on moottorivalmistajan ilmoittama moottorin hitausmomentti, Δn on kierrosnopeuden muutos, $T_{moottori}$ on moottorin tuottama kiihdyttävä momentti sekä T_{kuorma} kuormamomentti.

$$\Delta t = (J_{kuorma} + J_{moottori}) \cdot 2\pi \cdot \frac{\frac{\Delta n}{60}}{T_{moottori} - T_{kuorma}} \quad (4)$$

Sahakoneen terien halutun pyörimisnopeuden saavuttaminen vaati käytetyiltä moottoreilta pyörimistä yli nimellinopeutensa. Tämän takia oli laskettava moottorin kuormaa kiihdyttävä keskimääräinen momentti halutun loppunopeuden sekä moottorin nimellispöörinnopeuden välillä. Tämä tehtiin siksi, että voitiin laskea

moottorin kiihtymisnopeus moottorin nimellisnopeudesta tavoitenopeuteen. Keskimääräisen kiihdyttävän momentin laskemiseksi oli laskettava kiihdyttävä momentti moottorin tavoitenopeudessa.

Oikosulkumoottorien kuormaa kiihdyttävä momentti tavoitenopeudessa yli nimellispyörintänopeuden on kuvattuna kaavassa (5). Kaavassa (5) n_{nim} on oikosulkumoottorin nimellispyörimisnopeus, n_T on tavoitepyörimisnopeus, T_{max} on moottorivalmistajan ilmoittama moottorin maksimimomenttikerroin ja T_{nim} on moottorin nimellismomentti.

$$T_3 = 0.7 \cdot \left(\frac{n_{nim}}{n_T} \right)^2 \cdot \frac{T_{max}}{1} \cdot T_{nim} \quad (5)$$

Moottorien kiihdytysaikojen laskemiseksi nimellisnopeudesta loppunopeuteen oli laskettava keskimääräinen kiihdyttävä momentti näiden toimintapisteiden välillä. Sahakoneen moottorien kuormaa kiihdyttävä keskimääräinen momentti T_k saatiin laskettua kaavalla (6). (Hietalahti 2012) Kaavassa (6) T_{max} on moottorin tuottama maksimimomenttikerroin, T_{nim} on nimellismomentti ja T_3 on maksimimomentti tavoitenopeudessa.

$$T_k = \frac{1}{3} \cdot (T_{max} \cdot T_{nim} \cdot 0.7 - T_3) + T_3 \quad (6)$$

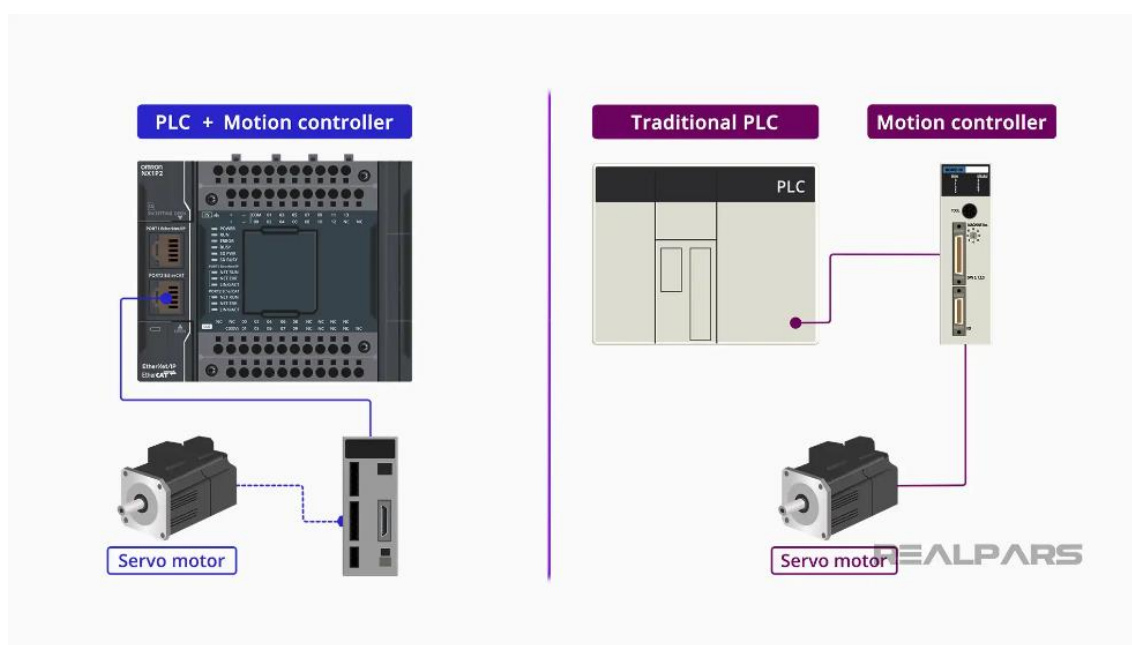
Moottorien kiihdytysaikojen laskemisen jälkeen oli varmistettava moottorin riittävä momentin tuotto moottorin pyöriessä loppunopeudessaan jatkuvan kuormituksen käyttötilanteessa. Moottorit pyörivät loppunopeudessaan yli nimellisnopeutensa, joten oli laskettava moottorin nimellismomentin tuotto halutussa moottorin loppunopeudessa. Kaavassa (7) on kuvattu moottorin nimellismomentin $T_{nim,yli}$ laskeminen yli moottorin nimellisnopeuden. (Hietalahti 2012) Kaavassa (7) n_{nim} on oikosulkumoottorin nimellisnopeus, n_T on tavoitenopeus ja $T_{nim,alle}$ on moottorin nimellismomentti toimintapisteessä, jossa nopeus on alle nimellisnopeuden.

$$T_{nim,yli} = \frac{n_{nim}}{n_T} \cdot T_{nim,alle} \quad (7)$$

3.1.3 Koneautomaatio-ohjain

Koneautomaatio-ohjaimella tarkoitetaan normaalista ohjelmoitavasta logiikasta kehittyneempää automaatio-ohjainta. Koneautomaatio-ohjaimissa on enemmän laskentatehoa vaativampien automaatio-ohjauksien suorittamiseen kuin normaaleissa ohjelmoitavissa logiikoissa. Suurta laskentatehoa vaativia ohjauksia ovat esimerkiksi erilaiset nopeat, suurta tarkkuutta vaativat liikkeenohjaukset.

Omronin koneautomaatio-ohjaimissa yhdistyvät ohjelmoitava logiikka sekä liikkeenohjaus. Siinä missä normaali ohjelmoitava logiikka on kehitetty käsittelemään erilaisia binäärisiä ja analogisia signaaleja sekä toteuttamaan yksinkertaisia loogisia ohjauksia, ovat kehittyneemmät koneautomaatio-ohjaimet kykeneviä suorittamaan useita suurta laskentatehoa vaativia tehtäviä samanaikaisesti. Koneautomaatio-ohjain sisältää normaalin ohjelmoitavan logiikan sekä liikkeenohjaimen integroituna toisiinsa. Perinteisellä ohjelmoitavalla logiikalla toteutettu servojärjestelmä vaatii erillisen liikkeenohjaimen servojen ohjaukseen. Kuvassa 5 on kuvattuna koneautomaatio-ohjaimen sekä perinteisen ohjelmoitavan logiikan ero liikkeenohjauksessa.

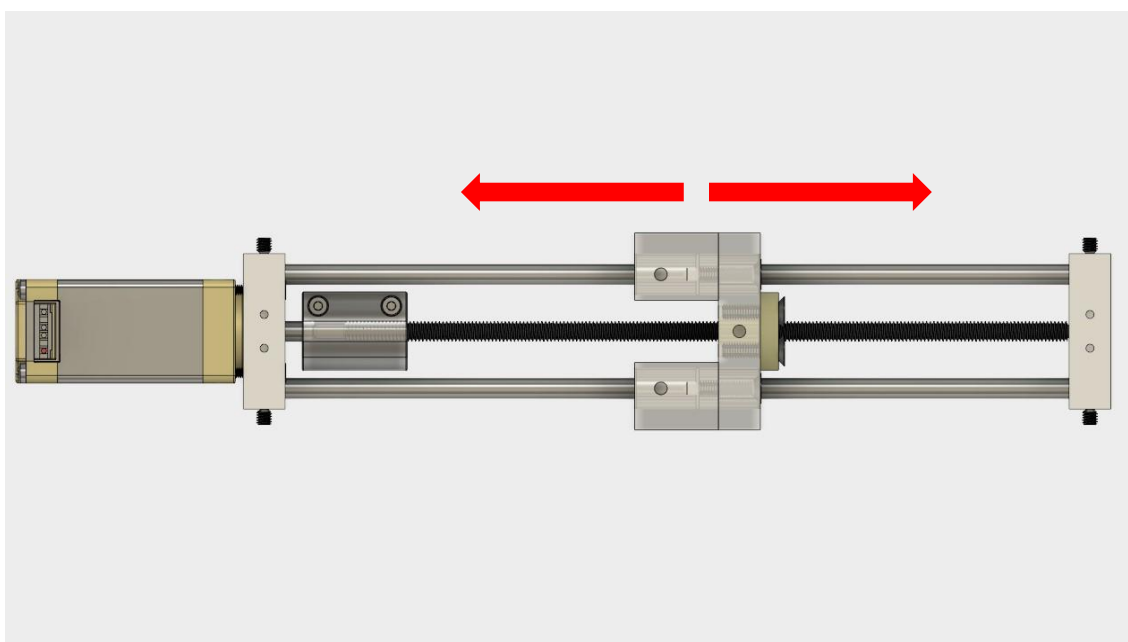


KUVA 5. Kuvassa vasemmalla nykyaikainen koneautomaatio-ohjain servojärjestelmän ohjauksessa ja oikealla perinteinen erillisellä liikkeenohjaimella toteutettu servojärjestelmä. (Mortenson 2021)

Tavalliset ohjelmoitavat logiikat pystyvät ohjaamaan myös erilaisia liikeakseleita, mutta koneautomaatio-ohjaimet ovat optimoituneempia liikkeen ohjaukseen sillä ne sisältävät sisäisen liikkeenohjaimen integroituna. Omronin automaatio-ohjausjärjestelmien tuoteperheestä löytyy normaaleja ohjelmoitavia logiikkoja, koneautomaatio-ohjaimia sekä teollisuus-PC:itä. Omronin koneautomaatio-ohjaimet jakaantuvat NJ- sekä NX- sarjan ohjaimiin. Omronin ohjausjärjestelmien suorituskykyisempään päähän kuuluvat Omronin valmistamat teollisuustietokoneet, jotka ovat soveltuvia käytettäväksi laajoissa, suurta laskentatehoa vaativissa automaatiojärjestelmissä. (Mortenson 2021)

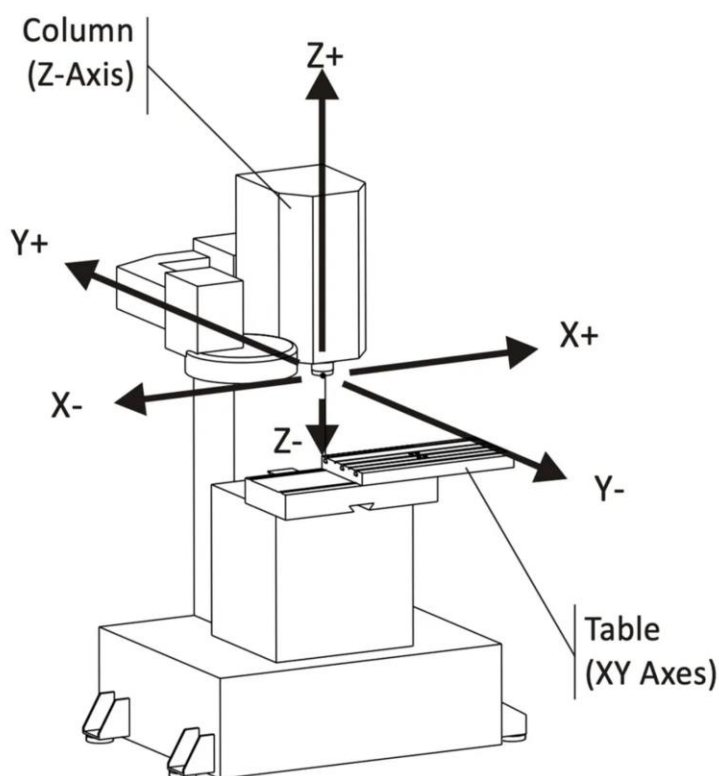
3.1.4 Liikkeenohjaukset

Erilaisissa mekatronisissa koneissa esiintyy yleensä erilaisia liikeakseleita, joiden positiota tai kiertokulmaa halutaan säätää. Hyvä akseleiden liikkeenhallinta asettaa suuret vaatimukset koneen toimilaitteille. Yksinkertaisimpia liikkeenohjausjärjestelmiä ovat yhden akselin paikoitusjärjestelmät, jossa yhden yksittäisen akselin positiota tai kiertokulmaa halutaan säätää. Kuvassa 6 on kuvattuna yhden akselin paikoitusjärjestelmä.



KUVA 6. Yhden akselin paikoitusjärjestelmä, jossa säädetään yksittäisen akselin lineaarista positiota.

Vaativimpia liikkeenohjausjärjestelmiä ovat erilaiset monien akselien pisteestä pisteeseen -paikotusjärjestelmät, joissa monen akselin positiota säädetään synkronoidusti samanaikaisesti (Airila 1999). Monien akselien ohjausjärjestelmät asettavat suuria vaatimuksia koneen toimilaitteille sekä ohjaukselle (Airila 1999). Monien akselien paikoitusjärjestelmiä ovat esimerkiksi erilaiset työstökoneet ja sorvit. Kuvassa 7 on kuvattuna kolmeakselinen jyrsinkone, jonka akseleiden synkronoitu ohjaus vaatii ohjausjärjestelmältä suurta tarkkuutta sekä laskentatehoa.



KUVA 7. Kolmeakselinen jyrsinkone. (Muokattu lähteestä: Deans 2021)

Yleisimpiä liikkeenohjausjärjestelmiä ovat erilaiset servojärjestelmät. Servojärjestelmällä tarkoitetaan suljetulla säätöpiirillä toteutettua järjestelmää, jossa säädetään mekaanista suuretta kuten liikeakselin asemaa, nopeutta, kiihtyvyyttä tai vääntömomenttia. Servojärjestelmän keskeiset peruskomponentit ovat toimilaitte, anturi sekä vahvistin. Toimilaitteella tarkoitetaan laitetta, joka tuottaa määrätyn liikkeen laitteen ohjaussignaalin funktiona. Toimilaitteita ovat esimerkiksi erilaiset servomootorit sekä säätöventtiilit. Servotoimilaitteet muistuttavat normaaleja toimilaitteita, mutta ne ovat tarkempia sekä paremmin säädettäviä kuin normaalit toimilaitteet (Airila 1999).

Anturi on automaatiojärjestelmän osa, jolla mitataan jotain prosessin kannalta oleellista suuretta, kuten liikkeenohjauksessa akselin kulmaa ja pyörimisnopeutta. Vahvistin on laite, joka säätää toimilaitteen ohjaussignaalia halutun asetusarvon sekä anturin tuottaman mittaussignaalin avulla. Servovahvistin on säädettävä tasajännitelähde, joka säätää servomootorin ankkurivirtaa ja pyörimisnopeutta asetusarvon mukaan.

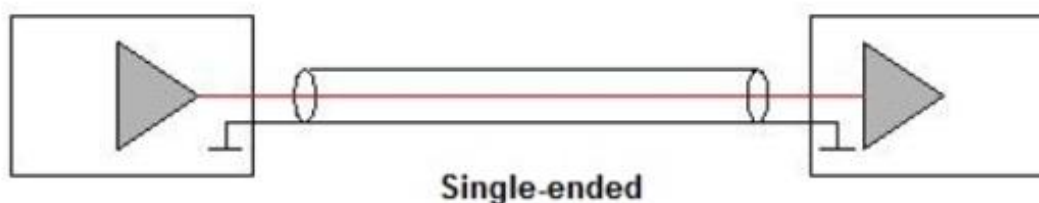
Erilaisia servojärjestelmiä voidaan toteuttaa monilla eri kokoonpanoilla. Yleisimpiä servojärjestelmiä ovat sähköiset sekä hydrauliset servojärjestelmät. Sähköiset servojärjestelmät on yleensä toteutettu erilaisilla sähkömoottoreilla, joiden akselien pyörimisnopeutta, kiertokulmaa tai kiihtyvyyttä halutaan säätää. Hydraulisia servojärjestelmiä käytetään yleisesti suuria voimia vaativissa järjestelmissä. Hydraulisissa järjestelmissä säädetään yleensä hydraulikkatoimilaitteiden toimielinten, kuten proportionaaliventtiin asentoa.

Liikkeenohjauksissa säätöjärjestelmän valintaan vaikuttavat järjestelmän dynaamiset ominaisuudet. Liikkeenohjauksissa vaaditaan järjestelmän hyviä dynaamisia ominaisuuksia. Järjestelmän on oltava luonteeltaan stabiili eli sen on kyettävä seuraamaan ohjearvoa tarkasti ilman värähtelyä. Lisäksi sen on kyettävä reagoimaan ohjearvon muutokseen nopeasti, jotta saavutetaan lyhyt vasteaika (Airila 1999).

3.1.5 Analogiasignaalien tyypit

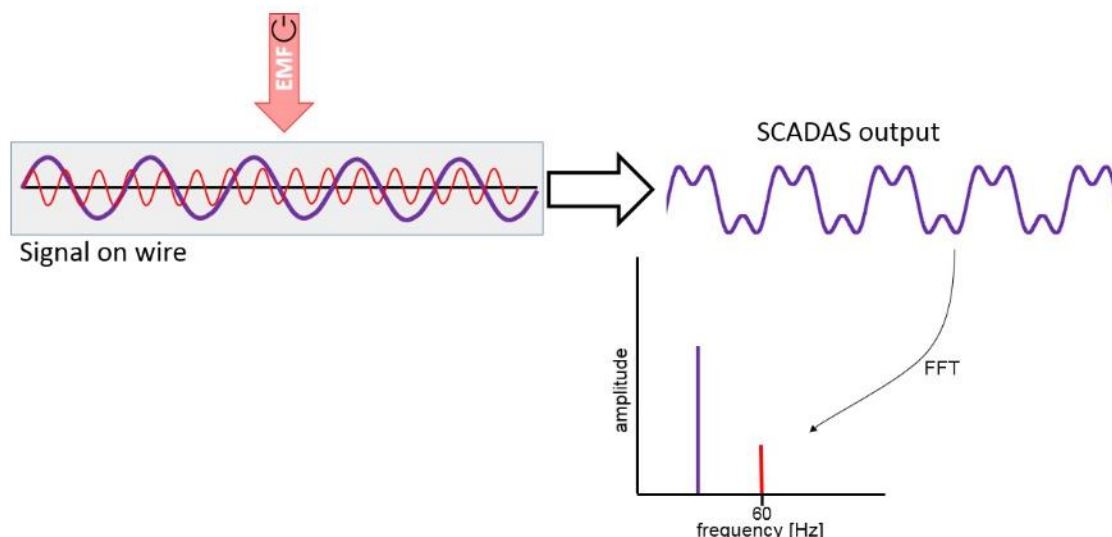
Analogiasignaalit voidaan jakaa kahteen erityyppiseen signaaliin. Analogiasignaalien kaksi päätyyppiä on Single ended -tyyppinen signaali sekä Differential-tyyppinen signaali. Nämä kaksi signaalityyppiä eroavat toisistaan kytkennältään sekä häiriönkestokyvyltään.

Single ended -tyyppisellä signaalilla tarkoitetaan yhdessä yksittäisessä johtimessa kulkevaa signaalia. Signaali muodostetaan mittaamalla signaali maadoitusta vasten, ja signaalia vahvistetaan ulostulon aikaansaamiseksi. Single ended -tyyppisen signaalin kytkentä on havainnollistettu kuvassa 8.



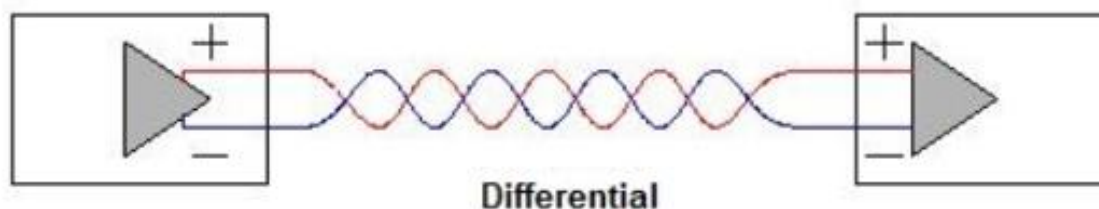
KUVA 8. Single ended -tyyppisen signaalin kytkentä. (Siemens AG 2019)

Single ended -tyyppiset analogiasignaalit ovat herkempiä sähkömagneettisille häiriöille kuin Differential-tyyppiset signaalit. Sähkömagneettisia häiriöitä aiheuttavat esimerkiksi sähkömagneettiset kentät (EMF). Kuvassa 9 on esitetty miten sähkömagneettinen häiriö saa Single ended -tyyppisen signaalin ulostulon vääristymään. Kuvasta nähdään kuinka EMF:n aikaansaama häiriösignaali summautuu sinimuotoiseen sisäänmenosignaaliin ja saa aikaan vääristyneen ulostulosignaalin.



KUVA 9. Sähkömagneettisen häiriön vaikutus Single ended -tyyppiseen virtasignaaliin. (Siemens AG 2019)

Differential-tyyppinen analogiasignaali kulkee kahdessa toistensa ympäri kierretyssä johtimessa ja ne muodostavat kierretyn parijohtimen. Differential-tyyppisen signaalin kytkentä on kuvattuna alla olevassa kuvassa 10.

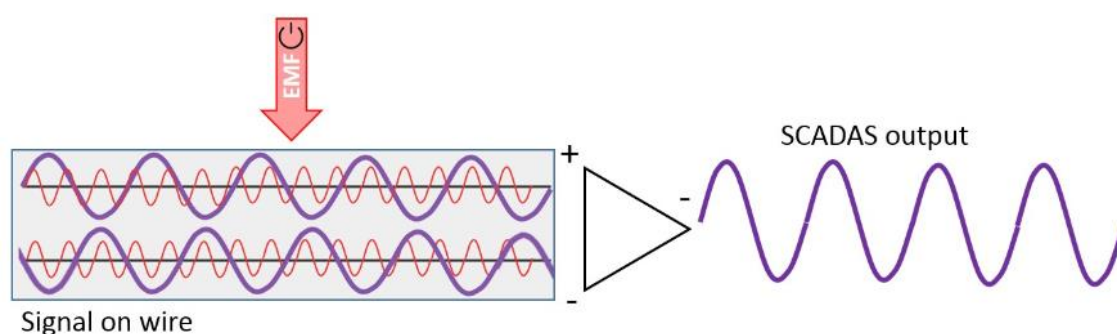


KUVA 10. Differential-tyyppisen signaalin kytkentä. (Siemens AG 2019)

Differential-tyyppinen signaali muodostuu positiivisesta ja negatiivisesta signaalitasosta. Näiden signaalien erotuksesta muodostetaan signaalin ulostulo. Differential-tyyppisen signaalin positiivinen signaalitaso on vastakkaisuuntainen kuin negatiivinen signaalitaso.

Differential-tyyppiset signaalit ovat häiriökestävämpiä kuin Single ended- tyyppiset signaalit. Differential-tyyppisessä signaalissa sähkömagneettinen häiriö aiheuttaa samanlaisen häiriön signaalin molempiin signaalitasoihin. Differential-tyyppisen analogiasignaalin signaalitasot ovat vastakohtia toisilleen, ja ulostulosignaali muodostetaan näiden kahden signaalitason erotuksena. Tämä saa aikaa

sähkömagneettisen häiriön kumoutumisen signaalin ulostulossa. Signaalitasojen vähentäminen toisistaan saa aikaan myös ulostulosignaalin kaksinkertaistumisen (Siemens AG 2019). Sähkömagneettisen häiriön vaikutus Differential-tyyppiseen signaaliin on esitetty kuvassa 11. Kuvasta 11 nähdään, kuinka EMF saa aikaan häiriösignaalin Differential-signaalin molemmissa signaalitasoissa. Signaalitasojen vastakkaissuuntaisuus kumoaa häiriösignaalin vaikutuksen ulostulosignaalin ja saa sen kaksinkertaistumaan.



KUVA 11. Sähkömagneettisen häiriön vaikutus Differential-tyyppiseen virtasignaaliin. (Siemens AG 2019)

Sahakoneen lineaaripotentiometrien mittamuuntimien sekä koneautomaatio-ohjaimen sisääntulojen välillä käytettiin Differential-tyyppistä 4–20 mA virtasignaalia. Tämä tehtiin, koska lineaaripotentiometreiltä saaduista mittaussignaaleista haluttiin saada mahdollisimman tarkat sekä häiriönkestävät.

Sahakoneen teriä pyörittävien oikosulkumoottoreiden ohjauksessa käytettiin taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttajien nopeusohjeen signaalityypiksi valittiin 0–10 V Single ended -tyyppinen jännitesignaali. Näin tehtiin, koska taajuusmuuttajat sijaitsevat niitä ohjaavan logiikan ulostulojen lähellä ja nopeusohjesignaalin siirtoetäisyys on hyvin lyhyt, jolloin sähkömagneettisten häiriöiden vaikutus ohjesignaaliin on hyvin pieni. Lisäksi nopeusohjesignaalien lähellä ei kulje korkeajännitteisiä johtimia, jotka saisivat aikaan voimakkaita sähkömagneettisia kenttiä.

3.2 Ohjelmistoratkaisut

Sahakoneen ohjelmoinnissa ja eri laitteiden konfiguroinnissa käytettiin monia erilaisia ohjelmointi- ja konfigurointisovelluksia. Sahakoneen koneautomaatio-ohjaimen sekä servojen konfiguroinnissa käytettiin Omron Sysmac Studio -ohjelmointisovellusta. Sahakoneen käyttöliittymän ohjelmoinnissa käytettiin Omronin NB-Designer-käyttöliittymien ohjelmointisovellusta.

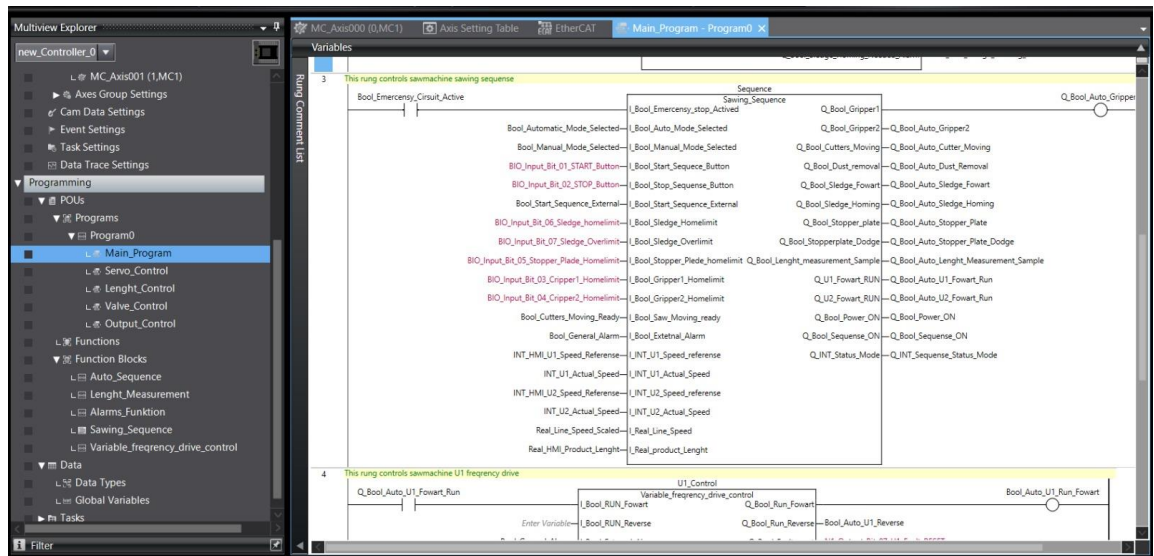
3.2.1 Omron Sysmac Studio

Sysmac Studio on Omronin kehittämä automaatio-ohjelmointiympäristö. Omron Sysmac Studiossa yhdistyvät kaikki automaatiojärjestelmän konfigurointiin tarvittavat työkalut yhdessä sovelluksessa. Sysmac Studiolla voi esimerkiksi ohjelmoida ja konfiguroida Omronin PLC:itä, koneautomaatio-ohjaimia, robotteja, liikkeenohjaimia ja HMI-käyttöliittymiä. Omron Sysmac Studio tukee tikapuukaavio- ja rakenteinen teksti- ohjelmointikieliä sekä turvaohjelmoinnissa toimintalohkokaavio-ohjelmointikieltä. Ohjelmassa on sisäänrakennettu ohjelmamonitori, joten erillistä ohjelmamonitorisovellusta ei tarvita (Omron Corporation, c). Kuvassa 12 on esitetty Sysmac Studion aloitussivu.



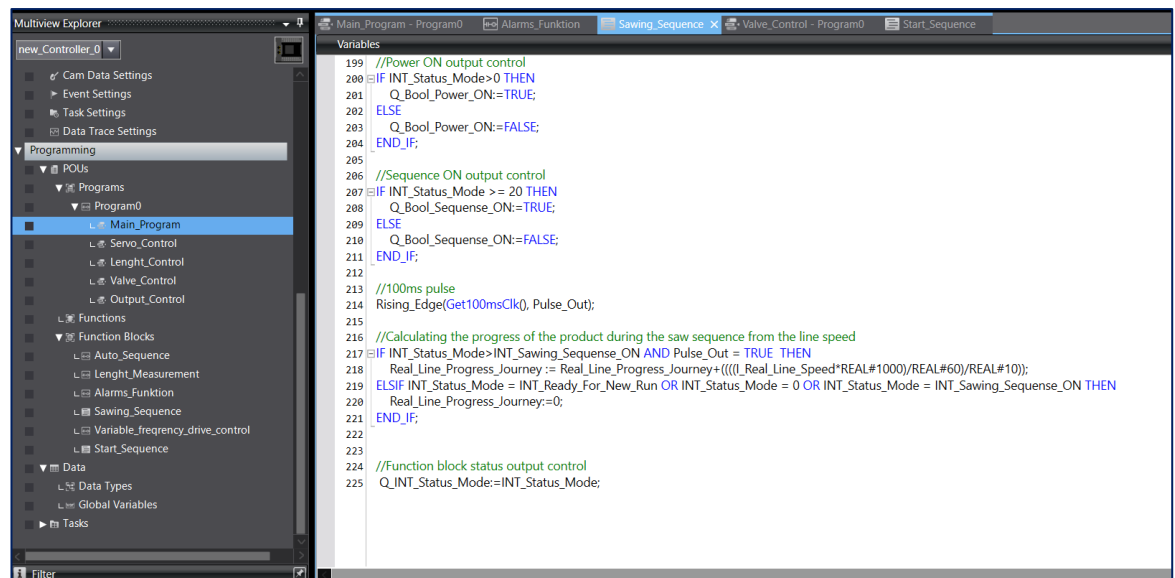
KUVA 12. Omron Sysmac Studion aloitussivu.

Omronin Sysmac Studiossa ohjelmointi tehdään ohjelman Programming-välilehdellä, jonne voi luoda halutun määrän eri ohjelmia. Ohjelmat koostuvat Section-tasoista, joilla ohjelman pilkkominen haluttuihin kokonaisuuksiin onnistuu hyvin. Sectioneihin voidaan ohjelmoida erilaisia toiminnallisuuksia tikapuukaavio- tai rakenteinen teksti -ohjelmointikielellä. Sysmac Studion ohjelmointiosio on esitetty kuvassa 13.



KUVA 13. Sysmac Studion ohjelmarakenne.

Sysmac Studiossa voidaan luoda erilaisia funktioita ja toimilohkoja, jotka selkeyttävät ohjelman rakennetta. Kuvassa 14 on kuvattu sahalaitteen sekvenssin luominen rakenteinen teksti -ohjelmointikielellä.

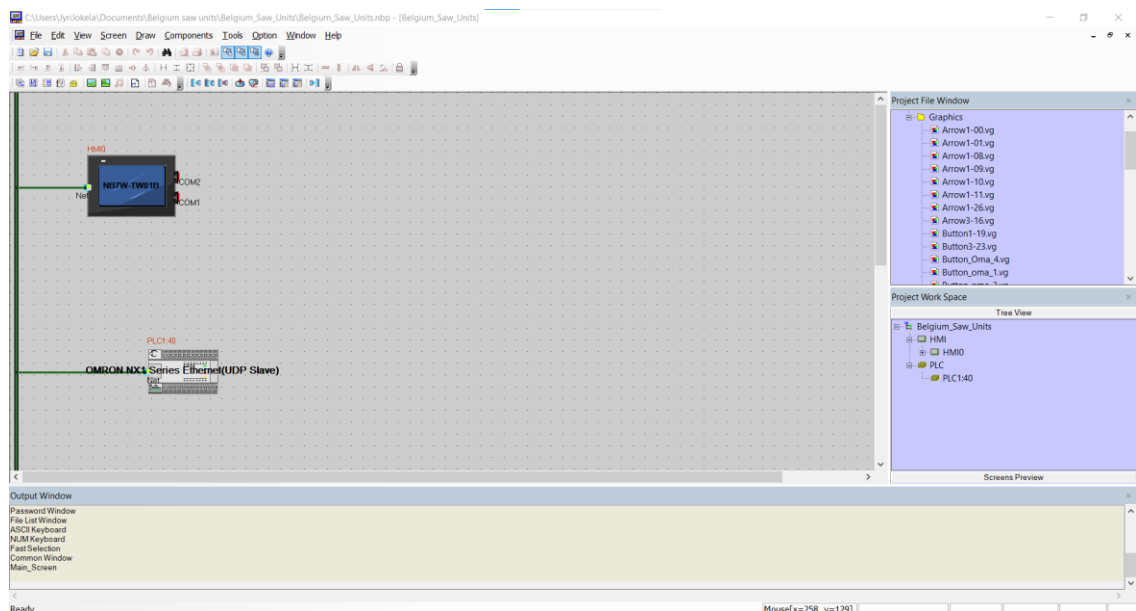


KUVA 14. Sahalaitteen sahaussekvenssin toimintalohkon ohjelmointi rakenteinen teksti -ohjelmointikielellä.

3.2.2 Omron NB-Designer

Omron NB-Designer on Omronin NB-sarjan käyttöliittymien ohjelmointiin tarkoitettu sovellus. Omronin NB-sarjan käyttöliittymiä voidaan käyttää monien muunmerkkisten ohjelmoitavien logiikoiden ja automaatiojärjestelmien kanssa. Omronin NB-Designer-sovelluksessa pystyy määrittelemään kommunikointitavan sekä portin, jonka kautta kommunikointi ohjattavan laitteen kanssa tapahtuu. Valittavina kommunikointitapoina ovat Ethernet I/F tai sarjaliikenne. Ethernet I/F -kommunikointitavassa kommunikointi tapahtuu Ethernetin kautta, ja näytön sekä ohjattavan laitteen välissä voidaan käyttää standardin mukaisia Ethernet-kytkimiä. Sarjaliikenteessä kommunikointi ohjattavan laitteen kanssa tapahtuu käyttöliittymän RS-RS-232C-, 422A- tai 485-sarjaportin kautta.

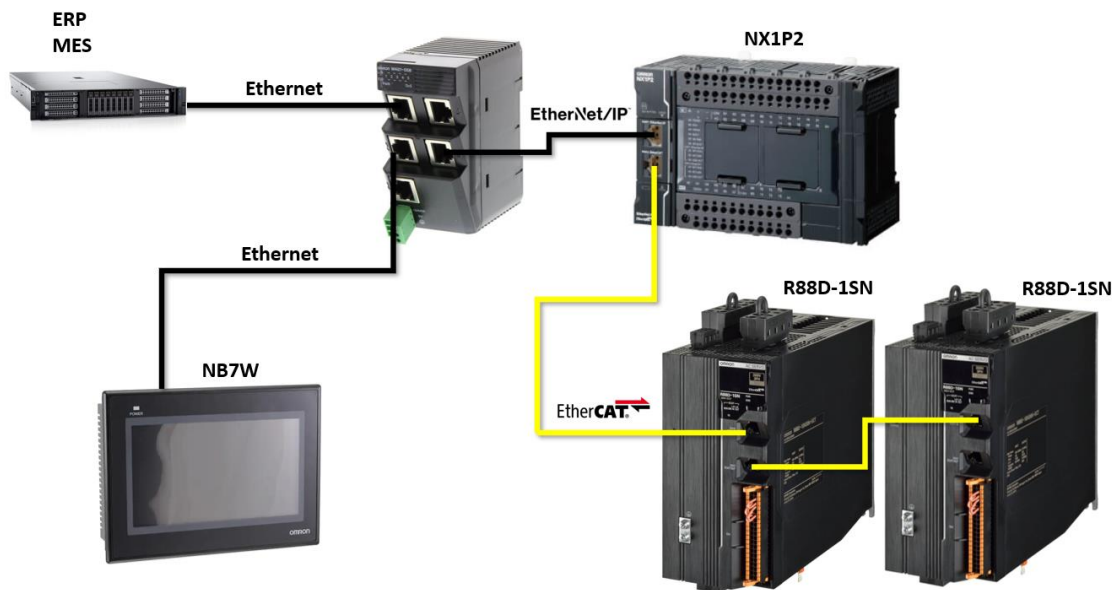
NB-Designer-sovelluksessa pystyy luomaan Omronin NB-sarjan käyttöliittymään eri näkymiä, painonappeja, teksti- ja numerokenttiä, trendinäyttöjä, valoindikaattoreita sekä määrittelemään eri turvallisuustasoja käyttöliittymän eri toiminnoille (Omron Corporation, d). Kuvassa 15 on kuvattuna NB-Designerin aloitussivu.



KUVA 15. NB-Designer-sovelluksen aloitussivu.

3.3 Väyläratkaisut

Sahakoneen laitteiden ohjaukseen ja konfigurointiin käytettiin kahta eri automaatioväylää. Sahakoneen liikeakselien ohjaukseen käytettyjen servo-ohjaimien ohjaukseen käytettiin EtherCAT-koneautomaatioväylää. Koneautomaatio-ohjaimen ja käyttöliittymän väliseen kommunikointiin käytettiin Ethernet-väylää. Sahalaitteen tiedonkeruussa käytettiin Ethernetia. Sahalaitteen väylärakenne on esitetty kuvassa 16.

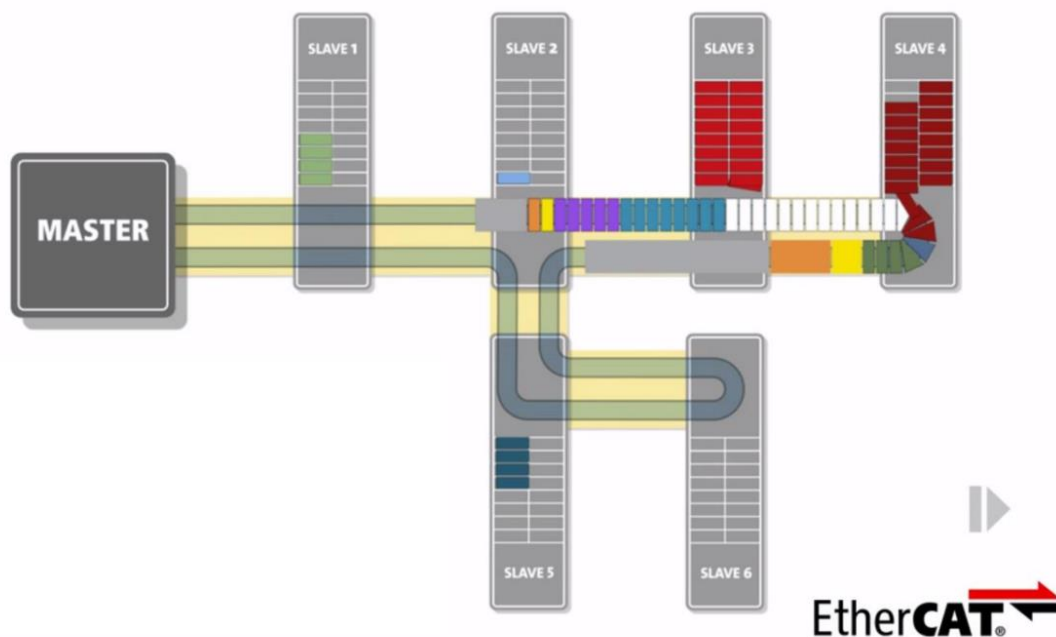


KUVA 16. Väyläverkon rakenne sahalaitteen ohjauksessa.

3.3.1 EtherCAT

EtherCAT on Beckhoff Automationin kehittämä Ethernet-pohjainen avoin kenttäväyläprotokolla. EtherCAT on yksi nopeimmista markkinoilla olevista kenttäväyläprotokollista. Kenttäväylän suuri nopeus perustuu jatkokehitettyyn Ethernet-tekniikkaan, jossa verkkoon kytketyt orjalaitteet lukevat ohjaimen lähettämän sanoman ilman, että viesti pysähtyy yksittäisen orjalaitteen käsiteltäväksi. Viesti kulkee kaikkien orjalaitteiden kautta pysähtymättä, jolloin viestin käsittelyyn yksittäisessä laitteessa ei kulu ylimääräistä aikaa. Ohjain lähettää yksittäisen viestin, joka sisältää kaikkien orjalaitteiden viestit. Yksittäinen orjalaitte voi kirjoittaa ja lu-

keä ohjaimen lähettämää viestiä samanaikaisesti, jolloin orjalaitteiden aiheuttamat viiveet väylässä minimoituvat. Tämä mahdollistaa käytännössä reaaliaikaisen kommunikoinnin eri laitteiden välillä. EtherCAT-protokollan toimintaa on havainnollistettu kuvassa 17.



KUVA 17. EtherCAT-protokollassa ohjain lähettää kaikkien orjalaitteiden viestit samassa viestissä, ja orjalaitteet lukevat ja kirjoittavat viestiin samanaikaisesti. (Kauppila 2019)

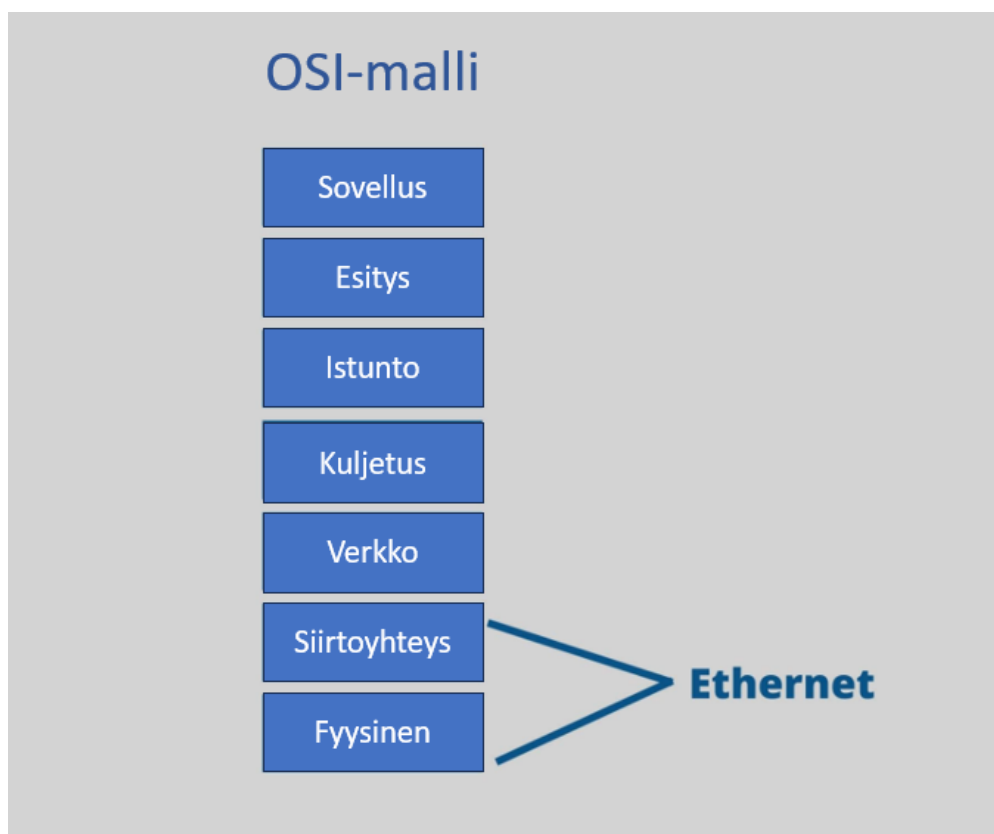
EtherCAT ei aseta mitään rajoitteita verkon rakenteelle. Verkko voi olla rakenteeltaan tähti-, puu-, rengas- tai väylärakenteinen tai se voi olla myös yhdistelmä erilaisia väylärakenteita (Sen 2014). EtherCAT-verkon rakenne ei vaikuta väylän tiedonsiirtonopeuteen. EtherCAT-kenttäväylässä ei ole Multimaster-tukea, jolloin yhdessä EtherCAT-verkossa voi olla ainoastaan yksi ohjainlaite sekä maksimissaan 65 535 orjalaitetta.

EtherCAT-väylä voidaan rakentaa standardikokoisilla Ethernet-kaapeleilla tai valokuidulla. Käytettäessä Ethernet-kaapeleita EtherCAT-verkossa niiden suojausten on oltava vähintään tasoa Cat 5. EtherCAT-verkko voidaan rakentaa rakenteeltaan reduktanssiseksi, jolloin yksittäiset kaapelirikot eivät estä väylän toimintaa. (Sen 2014)

EtherCAT-kenttäväylää voidaan käyttää turvaväylänä, ja se täyttää koneturvallisuudirektiivin korkeimman turvallisuuden tason SIL 3 (SFS-EN IEC 62061 2021, 18, 41–42). EtherCAT-verkko ei tarvitse erillistä turvaväyläverkkoa rinnalleen. EtherCAT-verkossa voi olla turvalaitteita sekä normaaleja automaatiolaitteita kytkettynä samaan verkkoon ilman rajoitteita verkon rakenteelle. (Kauppila 2019)

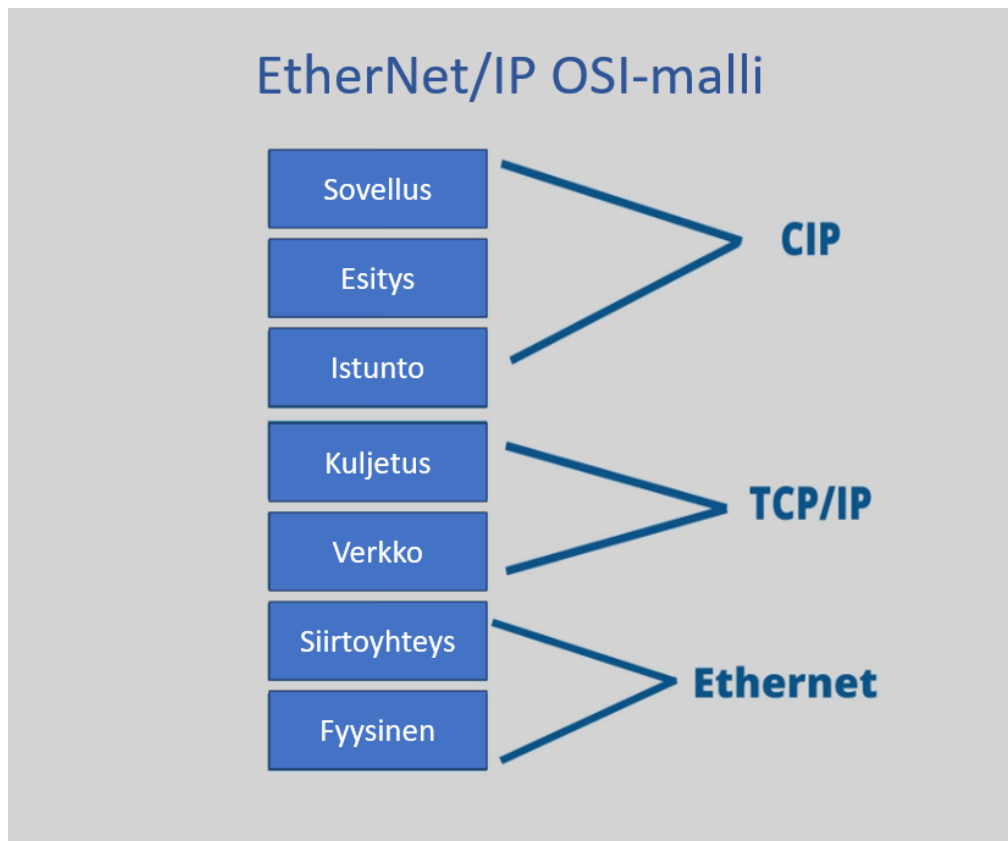
3.3.2 EtherNet/IP

Ethernet/IP on tiedonsiirtoprotokolla, jonka on kehittänyt RockWell-yhtiö. Nykyisin Ethernet/IP:n hallinnoinnista ja kehityksestä vastaa ODVA-järjestö. Ethernet/IP on maailman käytetyin avoin kenttäväyläratkaisu, joka pohjautuu Ethernet-teknologiaan. Ethernet/IP käyttää Ethernetin OSI-mallin mukaista tiedonsiirtoprotokollaa. OSI-malli koostuu seitsemästä eri tiedonsiirtotasosta, jotka ovat sovelluskerros, esityskerros, istuntokerros, kuljetuskerros, verkkokerros, siirtoyhteyskerros sekä fyysinen kerros. Kuvassa 18 on esitetty OSI-mallin tiedonsiirtotasot.



KUVA 18. OSI-mallin tiedonsiirtotasot.

Päätoimintaprotokollana EtherNet/IP:ssä on CIP, joka mahdollistaa kommunikoinnin eri tekniikoiden välillä. EtherNet/IP etenee kerrosprotokollien välityksellä CIP-kerroksen kautta TCP/IP-kerrokseen ja lopulta IP:hen (Pyramid Solutions 2023). Kuvassa 19 on havainnollistettu EtherNet/IP:n OSI-malli.



KUVA 19. EtherNet/IP:n OSI-malli.

EtherNet/IP-verkko voi olla rakenteeltaan tähti-, puu-, rengas- tai väylärakenteinen tai se voi olla myös yhdistelmä erilaisia väylärakenteita (Sen 2014). Ohjain- ja orjalaitteet voivat kommunikoida Ethernet/IP-verkossa samanaikaisesti ja kyt-kin huolehtii, etteivät paketit törmää verkossa. Ethernet/IP-verkossa käytettävien Ethernet-kaapelien täytyy olla luokitukseltaan vähintään tasolla Cat 5. (ODVA 2023)

4 TOTEUTUS

Sahakoneen fyysiseen toteutukseen kuului sahalaitteen automaatiokeskuksien kasaus, sahakoneen kaapelointi ja johdotus sekä automaatiokeskuksien asennus. Automaatiolaitteistojen asentamisen jälkeen sahakoneelle suoritettiin käyttöönottomittaukset ja tehdastestaus. Käyttöönottomittauksilla varmistettiin sahalaitteen sähkökytkentöjen kunto ja oikeanlainen kytkentä. Tehdastestauksella varmistettiin sahakoneen oikeanlainen toiminta, jotta kone voitiin toimittaa asiakkaalle tuotantoon. Sahakoneen rakentaminen aloitettiin oikosulkumoottorien mitoituksella.

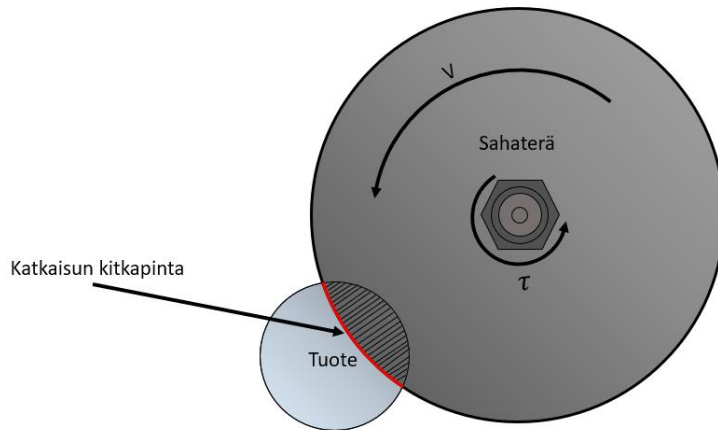
4.1 Oikosulkumoottorien mitoitus

Sahakoneen suunnittelussa keskeistä oli sahanteriä pyörittävien oikosulkumoottorien mitoittaminen. Oikosulkumoottorien mitoitukseen vaikutti käytettävän kuorman tyyppi, suuruus sekä käyttötapa. Oikosulkumoottorien ohjaukseen käytettiin taajuusmuuttajia, jotka osaltaan vaikuttivat moottorien mitoitukseen. Taajuusmuuttajaohjaus mahdollisti sahausterien nopeuden säätämisen, sekä oikosulkumoottorien pyörittämisen yli nimellinopeutensa. Oikosulkumoottoreilta vaadittiin suurta pyörintänopeutta asiakkaan vaatimukset täyttävän leikkuujäljen saavuttamiseksi. Oikosulkumoottorien mitoituslaskennassa käytettiin MATLAB-laskentaohjelmaa.

Kuorma oli tyypiltään syklisesti muuttuva kuorma, sillä kuorman suuruus jatkuvassa tilassa riippui siitä, onko sahausterä leikkaamassa katkaistavaa tuotetta vai pyöriikö sahausterä vapaasti sahauksien välissä. Sahausterien muodostaman kuormamomentin vaihtelu hankaloitti moottorien mitoitusta. Oikosulkumoottorien mitoitus tehtiin sahakoneen tuotteen katkaisutoimintapisteessä.

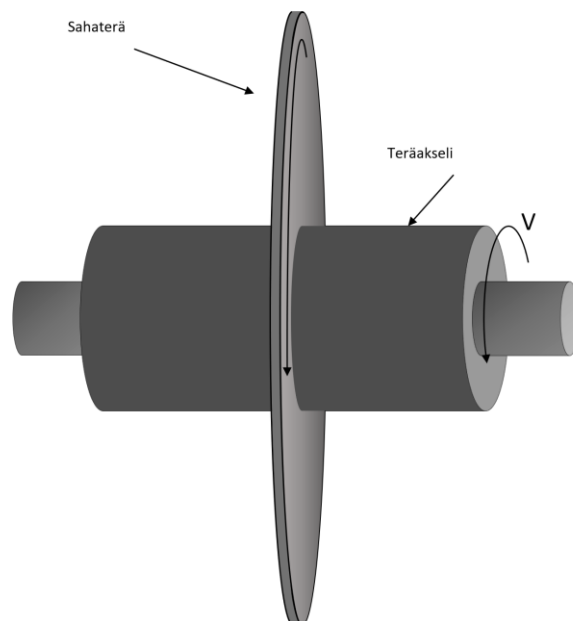
Jatkuvan tilan käyttötilanteessa sahanterän oikosulkumoottorin oli tuotettava riittävä momentti terän pyörittämiseen sahaustilanteessa. Sahaustilanteessa suurimmaksi kuormamomenttia tuottavaksi vastusvoimaksi muodostui sahausterän

ja katkaistavan tuotteen välille syntyvä kitkapinta, joka sai aikaan teränakselille pyörintää vastustavan kitkamomentin. Lisäksi tehtiin katkaisukokeita, joiden avulla saatiin selville sahauksessa sahausterän akselille vaikuttava kuormamomentti sekä maksimimomentti. Sahausterän ja katkaistavan tuotteen välille muodostuva kitkapinta on havainnollistettu kuvassa 20.



KUVA 20. Sahakoneen terän ja katkaistavan tuotteen välille muodostuva kitkapinta.

Sahaterä ja teräakseli muodostivat yhdessä teräpaketin, jota sahakoneen terämoottorin oli pystyttävä pyörittämään. Kuvassa 21 on havainnollistettu sahakoneen teräpaketti.



KUVA 21. Sahakoneen teräpaketin havainnollistus.

Katkaisukokeiden suorittamisen jälkeen saatiin selville sahausteriä pyörittävien moottorien mitoitukseen vaadittavat raja-arvot. Sahausteriä oli pystyttävä pyörittämään kierrosnopeudella 4400 rpm. Sahausten oikosulkumoottorin akselille tuottama sahausten kuormamomentti oli 1 Nm ja sahausten maksimimomentti oli 2 Nm. Sahausterien oli kiihdyttävä nollosnopeudesta tavoitenopeuteensa alle seitsemässä sekunnissa. Oikosulkumoottoreilta vaadittavien raja-arvojen selvityä mitoitetiin moottoreita kaksinapaparisista oikosulkumoottoreista, joiden nimellisenopeus oli noin 3000 rpm. Oikosulkumoottorien mitoitusta tarkasteltiin kuorman kiihdytyksen sekä jatkuvan tilan kuormituksen näkökulmasta.

4.1.1 Kuorman määrittäminen

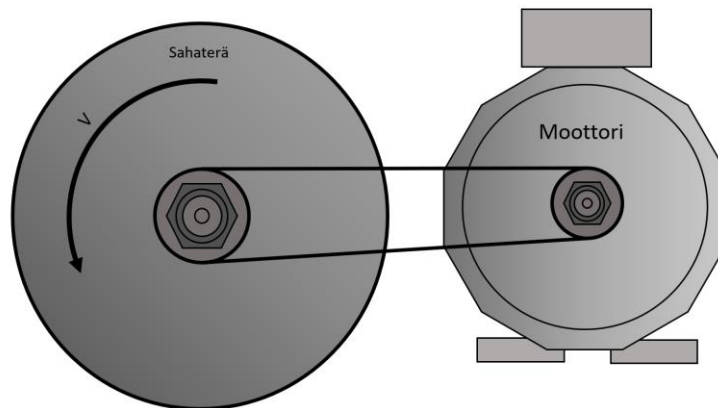
Sahanterien oikosulkumoottorien mitoitus aloitettiin määrittämällä sahanteräpakettien kuormamomentti sekä hitausmomentti. Kokeellisesti testaamalla sahanterän katkaisun aiheuttamaksi kuormamomentiksi saatiin 1 Nm ja maksimimomentiksi 2 Nm. Sylinterimäisen kappaleen hitausmomentin kaavaa käyttämällä laskettiin teräkselin sekä terän hitausmomentit. Teräkselin hitausmomentti saatiin laskettua kaavan (1) mukaan.

$$J_{akseli} = \frac{1}{2} \cdot 5.6 \text{ kg} \cdot (0.035 \text{ m})^2 = 0.00034 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Terän hitausmomentti saatiin laskettua kaavan (1) mukaan.

$$J_{terä} = \frac{1}{2} \cdot 11 \text{ kg} \cdot (0.125 \text{ m})^2 = 0.00895 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Sahanteränakselien sekä oikosulkumoottorien voimansiirrossa käytettiin hihnavälitystä, joka osaltaan vaikutti oikosulkumoottorien mitoitukseen. Välityksen vaikutusta mitoitukseen tarkasteltiin oikosulkumoottorien akseleille aiheuttamien kuorma- ja maksimimomenttien sekä hitausmomentin mukaan. Kuvassa 22 on havainnollistettu sahakoneen terämoottorin hihnavälitys.



KUVA 22. Sahanterän ja oikosulkumoottorin 4/3-hihnavälitys.

Oikosulkumoottorien akseleilla vaikuttavat kuorma- ja maksimimomentti T_1 saatiin laskettua kaavan (3) mukaan, kun välityksen hyötysuhde η oli 95 %.

$$T_{kuorma} = \frac{1 \text{ Nm}}{0.95} \cdot \frac{4}{3} = 1.4 \text{ Nm}$$

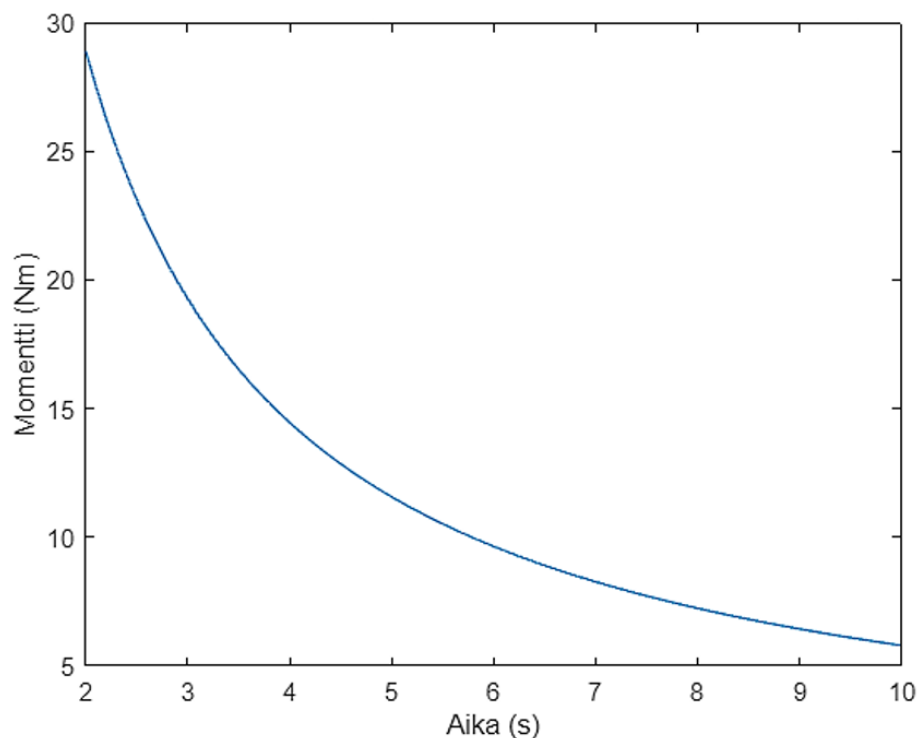
$$T_{maksimi} = \frac{2 \text{ Nm}}{0.95} \cdot \frac{4}{3} = 2.8 \text{ Nm}$$

Oikosulkumoottorin akselilla vaikuttavan hitausmomentin muodostivat terän ja akselin hitausmassojen summa. Tällöin kuorman kokonaishitausmomentiksi saatiin kaavalla (2)

$$J_1 = (0.00034 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 0.00895 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^2 = 0.1589 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

4.1.2 Kiihdytystilanne

Jotta sahalaite ehti suorittaa sahaussyklin tuotantolinjan vaatimalla nopeudella, sahausterien oli kiihdyttävä loppunopeuteensa riittävän nopeasti. Tämän vuoksi sahausteriä pyörittävien oikosulkumoottorien mitoitus lähdettiin tarkastelemaan ensisijaisesti sahaterien kiihdytyksen näkökulmasta. Oikosulkumoottoreilta vaadittavan kuormaa kiihdyttävän momentin tarve kasvaa kiihdytysajan funktiona. Kuvassa 23 on kuvattu kiihdyttävän momentin tarve sahateräpaketille kiihdytysajan funktiona.



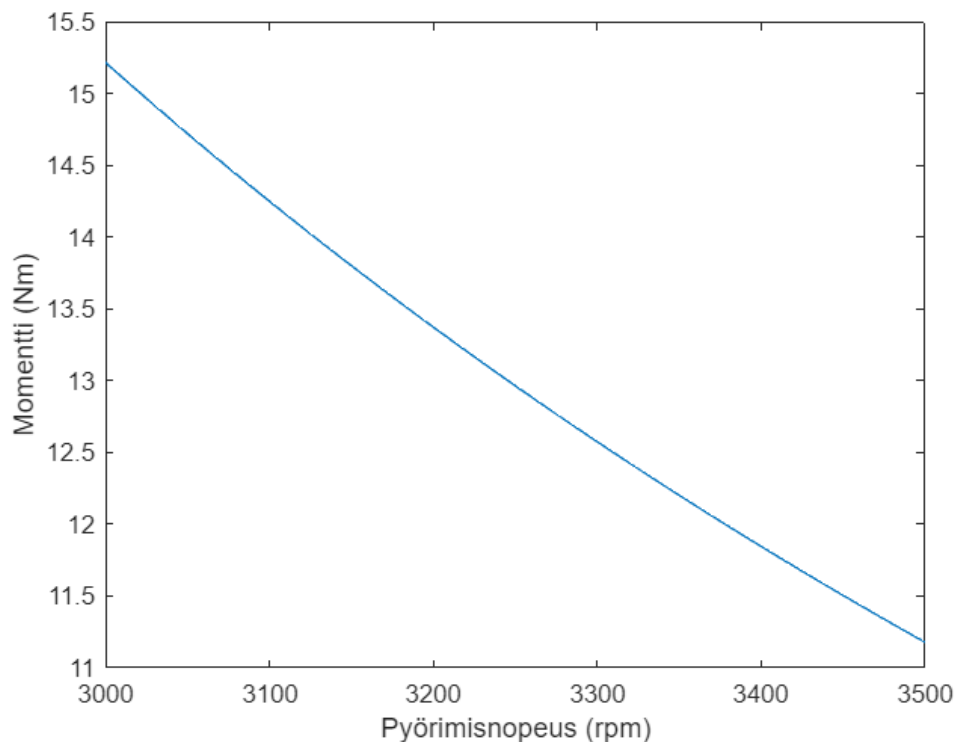
KUVA 23. Kuorman kiihdytykseen vaadittu kiihdyttävä momentti kiihdytysajan funktiona.

Laskentaa suoritettiin MATLAB-laskentaohjelmalla. Laskentaan luotu koodi on nähtävillä Liitteessä 1. Ohjelmassa tehtiin vertailua monien eri oikosulkumoottorien välillä, ja lopulta päädyttiin 1.5 kW oikosulkumoottoriin. 1.5 kW oikosulkumoottorin tekniset tiedot ovat listattuna alla:

- Nimellisnopeus = 3000 rpm
- Nimellismomentti = 4.94 Nm
- Maksimimomenttikerroin = 4.4

Kiihdytystilanteessa oikosulkumoottorien akseleilla ei vaikuta muita kuormamomenteja kuin kuorman kiihdytykseen vaadittava dynaaminen momentti sekä teräkselin laakerien kitkamomentti. Teräkselin laakerien kitkamomentti oli vähäinen, joten se jätettiin pois tarkastelusta. Oikosulkumoottorien oli pystyttävä kiihdyttämään nopeutensa nollanopeudesta kierrosnopeuteen 3500 rpm alle seismässä sekunnissa. Oikosulkumoottorien kiihdytysajat Δt saatiin laskettua kaavaa (4) soveltamalla.

Sahakoneen oikosulkumoottorien kiihdytysaikojen tarkastelu tehtiin oikosulkumoottorin kahdessa eri toimintapisteessä. Oikosulkumoottorin maksimi- ja nimellismomentti alkavat laskea oikosulkumoottorin ylittäessä nimellisnopeutensa. Oikosulkumoottorin maksimimomentti laskee neliöllisesti ja nimellismomentti lineaarisesti. 1.5 kW oikosulkumoottorin momenttien käyttäytyminen yli nimellisnopeuden on esitetty kuvassa 24.



KUVA 24. Oikosulkumoottorin maksimimomenttien käyttäytyminen moottorin pyöriessä yli nimellisnopeuden.

Sahakoneen oikosulkumoottorien kiihdytysaikojen tarkastelu tehtiin oikosulkumoottorien pyöriessä alle nimellisuopeutensa sekä yli nimellisuopeutensa. Kokonaiskiihdytysajan muodostavat näiden eri kiihdytysaikojen summa. Moottorien kiihdytysajat alle nimellisuopeuden saatiin laskettua kaavan (4) mukaan. Oikosulkumoottorien kiihdytys tehtiin moottorien 70 % maksimimomentilla. Teräkselin pyörintä oletettiin kitkattomaksi, joten kaavan (4) T_{kuorma} -termi oletettiin nolaksi. Kiihdytysajaksi 1.5 kW oikosulkumoottorille saatiin

$$\Delta t_{alle} = (0.1589 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 0.0017 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot 2\pi \cdot \frac{3000 \text{ rpm}}{60} \cdot \frac{1}{15.2 \text{ Nm}} = 3.3 \text{ s},$$

kun nopeudet olivat alle nimellisuopeuden.

Oikosulkumoottorien kiihdytysajan laskenta yli nimellisuopeuden oli tehtävä laskemalla moottorin keskimääräinen kiihdyttävä momentti nimellisuopeuden ja halutun tavoitenuopeuden välillä. Keskimääräisen kiihdyttävän momentin laskenta aloitettiin laskemalla moottorin kuormaa kiihdyttävä momentti T_3 halutussa kierrosnopeudessa 3500 rpm kaavan (5) avulla

$$T_3 = 0.7 \cdot \left(\frac{3000 \text{ rpm}}{3500 \text{ rpm}} \right)^2 \cdot \frac{4.4}{1} \cdot 4.94 \text{ Nm} = 11.2 \text{ Nm}.$$

Oikosulkumoottorin kuormaa kiihdyttävä keskimääräinen momentti T_k saatiin laskettua kaavalla (6). Alla oikosulkumoottorin kuormaa kiihdyttävä keskimääräinen momentti T_k moottorin nimellisuopyörinänuopeuden 3000 rpm ja halutun loppunuopeuden 3500 rpm välillä

$$T_k = \frac{1}{3} \cdot (4.4 \cdot 4.94 \text{ Nm} \cdot 0.7 - 11.2 \text{ Nm}) + 11.2 \text{ Nm} = 12.5 \text{ Nm}.$$

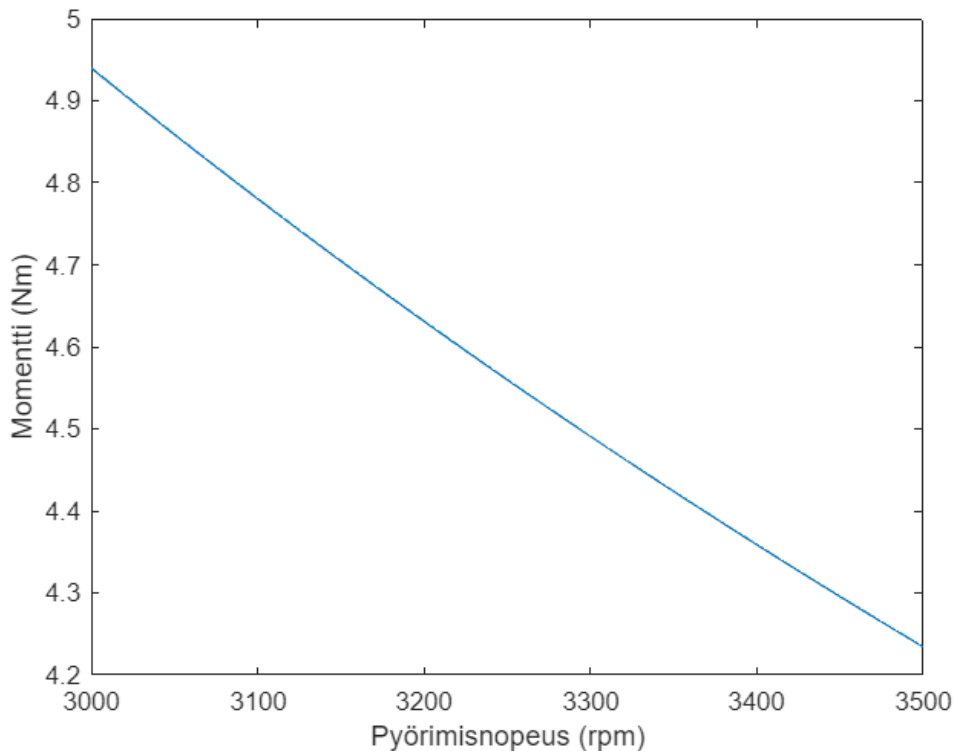
Seuraavaksi laskettiin moottorin kiihdytysaika nimellisuopeudesta tavoitenuopeuteen. Alla on laskettu oikosulkumoottorin kiihdytysaika yli nimellisuopeuden kaavalla (4)

$$\Delta t_{yli} = (0.1589 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 0.0017 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot 2\pi \cdot \frac{3000}{60} \cdot \frac{1}{12.5 \text{ Nm}} = 0.7 \text{ s}$$

Oikosulkumoottoreiden kokonaiskiihdytysaika saatiin laskemalla moottorin kiihdytysaikojen Δt_{alle} ja Δt_{yli} summa. Oikosulkumoottorin kokonaiskiihdytysajaksi saatiin 4 s.

4.1.3 Jatkuvan kuormituksen käyttötilanne

Oikosulkumoottorin mitoitus tehtiin tuotteen katkaisutoimintapisteessä. Oikosulkumoottorien akselleille kohdistuva kuormamomentti oli 1.4 Nm ja maksimimomentti 2.8 Nm. Sahakoneen sahausterien pyörittämiseen valittujen 1.5 kW oikosulkumoottorien nimellismomentti oli 4.94 Nm. Oikosulkumoottorin momentintuotto riittää hyvin kuorman pyörittämiseen alle moottorin nimellisenopeuden. Oikosulkumoottoreiden nimellismomentin tuotto tippuu lineaarisesti moottorin kierrosnopeuden ylittäessä nimellisenopeuden. Moottorien riittävä momentintuotto varmistettiin laskemalla arvot halutussa nopeudessa 3500 rpm. 1.5 kW oikosulkumoottorin nimellismomentin putoaminen on esitetty kuvassa 25.



KUVA 25. 1.5 kW oikosulkumoottorin nimellismomentin käyttäytyminen yli nimellisenopeuden.

Oikosulkumoottorien nimellismomentti $T_{nim,yli}$ halutussa tavoitenopeudessa yli nimellisnopeuden saatiin laskemalla kaavan (7) mukaan



$$T_{nim,yli} = \frac{3000 \text{ rpm}}{3500 \text{ rpm}} \cdot 4.94 \text{ Nm} = 4.2 \text{ Nm}.$$

Saadusta moottorin nimellismomentista huomataan, että moottorin momentintuotto on riittävä kaikissa moottorin käyttötilanteissa. Moottorien tuottama momentti halutussa toimintapisteessä on suurempi kuin tuotteen katkaisun moottorin akselille tuottama vastamomentti, joten moottorin momentintuotto on riittävä.

4.2 Koneautomaatio-ohjaimen valinta

Sahalaitteen ohjausjärjestelmäksi valikoitui Omronin NX-sarjan koneautomaatio-ohjain NX1P2-1140DT1. Omronin koneautomaatio-ohjaimen valikoitumiseen tähän projektiin vaikutti laitteen riittävä laskentateho, kenttäväylätuki, helppo laajennettavuus sekä riittävä sisäänrakennettujen IO-pisteiden määrä. Kyseinen koneautomaatio-ohjain kykenee ohjaamaan neljää liikeakselia synkronoidusti sekä suorittamaan perinteisempiä loogisia ohjauksia (Omron Corporation, e). Tämä vaikutti osaltaan laitteen valintaan, sillä laitesarjan alkeellisemmat mallit, kuten NX1P-9024DTI, eivät pysty ohjaamaan eri akseleita synkronoidusti. Kuvassa 26 on esitetty NX1P2-koneautomaatio-ohjaimien tekniset tiedot.

NX-series NX1P2 CPU Units

Product Name	Program capacity	Memory capacity for variables	Maximum number of used real axes			Total number of built-in I/O points		Model	
				Used motion control servo axes *1	Used single-axis position control servo axes *1	Number of input points	Number of output points		
 NX1P2 CPU Unit	1.5 MB	32 KB (Retained during power interruptions) or 2 MB (Not retained during power interruptions)	8 axes	4 axes	4 axes	40 points	24 points	16 points, NPN transistor	NX1P2-1140DT
								16 points, PNP transistor *2	NX1P2-1140DT1
			6 axes	2 axes	4 axes			16 points, NPN transistor	NX1P2-1040DT
								16 points, PNP transistor *2	NX1P2-1040DT1
 NX1P2 CPU Unit			4 axes	0 axes	4 axes	24 points	14 points	10 points, NPN transistor	NX1P2-9024DT
							10 points, PNP transistor *2	NX1P2-9024DT1	

KUVA 26. NX1P2-koneautomaatio-ohjaimien tekniset tiedot.

Omronin koneautomaatio-ohjaimessa NX1P2-1140DT1 on itsessään sisäänrakennettuna 24 Digital input -pistettä, joita voidaan käyttää PNP- tai NPN- tyyppiä laitteiden kytkennän mukaan. Kyseisessä koneautomaatio-ohjaimessa on myös sisäänrakennettuna 16 PNP-tyyppistä Digital output -pistettä. Kyseisen koneautomaatio-ohjaimen sisäänrakennettujen IO-pisteiden määrä vaikutti laitteen valintaan. NX1P2-1140DT1 on laajennettavissa kahdeksalla Omronin NX-sarjan tulo- sekä lähtöyksiköllä. Omronin NX-sarjan tuoteperheen laitteisiin on saatavilla laajasti erilaisia laajennuskortteja moniin eri käyttötarkoituksiin. NX-sarjan laajennuskorttien saatavuudessa oli ongelmia, joten sisäänrakennetut IO-pisteet poistivat tarpeen useilta lisäkorteilta. Omronin koneautomaatio-ohjain NX1P2-1140DT1 on esitetty kuvassa 27.



KUVA 27. Omronin koneautomaatio-ohjain NX1P2-1140DT1.

Koneautomaatio-ohjaimeseen voidaan lisätä kaksi Option board -lisäkorttia, jotka asennetaan laitteen kanteen, niille tarkoitettuihin aseimiin. Option board -lisäkorttien lisättävyys vaikutti laitteen valikoitumiseen. Kyseiset lisäkortit säästivät tilaa keskuksesta, sekä vähensivät tarvetta laiteen kylkeen asennettaville lisäkorteille. Omronin koneautomaatio-ohjaimessa NX1P2-1140DT1 on sisäänrakennetut liitäntäportit EtherCAT- sekä EtherNet/IP- kenttäväylille. Kyseinen koneautomaatio-

tio-ohjain kykenee ohjaamaan 16 EtherCAT-väylälaitetta samanaikaisesti. Laitteen automaatioväylätuki vaikutti laitteen valintaan. Servo-ohjaimien ohjaukseen tarvittiin EtherCAT-väylää, sekä käyttöliittymän ja tiedonkeruun mahdollistamiseen EtherNet/IP-väylää.

4.3 Liikkeenohjauksien valinta

Sahalaitteessa haluttiin säätää sahauskelkkojen lineaarista positiota sekä liikkeenopeutta. Sahalaitteen teräakselien liikkeen täytyi olla nopeaa ja yhtäaikaista. Sahalaitteen lineaariakselien liikkeenohjaukseen valittiin servomoottorit, koska teräakseleiden liikuttamiseen vaadittiin nopeaa ja tarkkaa liikkeenohjausta.

Sahalaitteen servomoottoreiksi valittiin Omronin 1S-sarjan 400 W kolmivaihteiset R88M-1M40020C-S2-servomoottorit. Servomoottoreihin on integroitu absoluuttipulssianturit, jotka mittaavat servomoottorin kiertokulmaa ja pyörimisnopeutta servomoottorin pyöriessä. Servomoottoreiden tekniset tiedot ovat listattuna alla.

- Nimellisjännite: 400 V
- Nimellisteho: 0.4 kW
- Nimellispyörimisnopeus: 2000 rpm
- Nimellismomentti: 1.91 Nm
- Maksimimomentti: 5.73 Nm

Servomoottoreita ohjaamaan valittiin Omronin 1S-sarjan R88D-1SN06F-ECT-servo-ohjaimet. Kyseistä servo-ohjainta pystyy ohjaamaan EtherCAT-automaatioväylän kautta tai ohjaimen sisäänrakennettujen IO-liittimien kautta. Servo-ohjaimessa R88D-1SN06F-ECT on ulkoinen turvapiiri, jolla päästään turvallisuuden eheyden tasolle SIL 3. SIL-vaatimustasolla kuvataan laitteen kykyä turvatoiminnon suorittamiselle, ja taso 3 on näistä korkein. (SFS-EN IEC 62061 2021, 18, 41–42) Kyseisellä servo-ohjaimella pystyy ohjaamaan Omronin S1-sarjan kolmivaiheservomoottoreita 600 W servomoottoreihin asti (Omron Corporation, f). Kuvassa 28 on esitetty sahalaitteessa käytetty Omronin servo-ohjain.



KUVA 28. Omronin servo-ohjain R88D-1SN06F-ECT.

Omronin Sysmac Studio -koneautomaatioympäristö mahdollistaa servoakseleille kaksi erilaista käyttötapaa. Valittavia käyttötapoja ovat yksittäisten akselien ohjaukseen tarkoitettu single axis -toiminto, jolla voidaan ohjata yksittäisiä akseleita halutun toiminnallisuuden mukaan. Multi axis -toiminnolla voidaan ohjata kahta tai useampaa akselia samanaikaisesti ja synkronoidusti. Yksittäisistä akseleista voidaan muodostaa akseliryhmiä, jolloin servoakselit liikkuvat synkronoidusti yhdessä. Synkronoidussa liikkeenohjauksessa kaksi servoakselia liikkuu samanaikaisesti tavoitepisteeseen. (Omron Corporation, g)

4.4 Servojen ohjaus

Omron Sysmac Studiossa Omronin servojen ohjaus on tehty helpoksi. Omronin 1S-servojen parametointi ja ohjelmointi onnistuvat Sysmac Studiolla, joten erillistä parametointisovellusta ei tarvita. Sysmac Studiossa on valmiit toimilohkot servoakselien ohjaukseen, joten itsetehtyjä toimilohkoja ei tarvita. Omronin Sysmac Studiossa Omronin servo-ohjaimia ohjataan akseleina tai akseliryhminä, jolloin niiden ohjaaminen on yksinkertaista.

Omronin 1S-servojen ohjaus aloitettiin määrittämällä akselit, joita eri servo-ohjaimet ohjaavat. Akseleiden määrittäminen onnistuu Sysmac Studio Motion Control Setup -välilehden alta löytyvästä Axis Settings -valikosta. Kyseisen välilehden takaa löytyy Axis Setting Table, jossa projektin servoakselien parametrit määritetään. Servoakselien määrittäminen aloitetaan Axis Basic Settings -parametreista, joissa määritetään yksilöivä numero, joka kertoo, mikä akseli on kyseessä. Axis type -parametrilla määritetään akselin tyyppi. Sahakoneen akseleiden tyypeiksi määritettiin servoakseli sahakoneen fyysisen kokoonpanon mukaan.

Seuraavaksi määritettiin ulostulolaitteet, jotka ohjaavat kyseisiä akseleita. Ulostulolaitteiden määrittäminen tehtiin Axis Setting Table -valikon Output device 1 -rivistä, josta määritettiin EtherCAT-orjalaitteet eli määritetyt servo-ohjaimet, jotka ohjasivat kyseisiä akseleita. Kuvassa 29 on esitetty servoakselien Axis Basic Settings -parametrien määrittäminen. Määritetyt parametrit ovat korostettuina kuvassa punaisella. Kuvasta huomataan, että akselille 0 asetettiin ulostulolaitteeksi servo-ohjain 1 ja akselille 1 asetettiin ulostulolaitteeksi servo-ohjain 2.

Axis Name	1 MC_Axis000	2 MC_Axis001
Axis Basic Settings		
Axis number	0	1
Motion control	MC1: Primary periodic task	MC1: Primary periodic task
Axis use	Used axis	Used axis
Axis type	Servo axis	Servo axis
Control function	All	All
Feedback control	No control loop	No control loop
Input device 1	-	-
Channel	-	-
Input device 2	-	-
Channel	-	-
Input device 3	-	-
Channel	-	-
Output device 1	Node : 1	Node : 2
Channel	CH1	CH1
Output device 2	-	-
Channel	-	-
Output device 3	-	-
Channel	-	-
Unit Conversion Setting		
Unit of display	mm	mm
Command pulse coun	8388608 pulse/rev	8388608 pulse/rev
Gearbox usage	Use gearbox	Use gearbox
Work travel distance	10000 mm/rev	10000 mm/rev
Work travel distance	7.83 mm/rev	7.83 mm/rev
Work gear ratio (Nu	1	1
Motor gear ratio (De	1	1

KUVA 29. Servoakseliä Axis Basic Settings -parametrien määrittäminen.

Servoakseliä Basic-parametrien määrittämisen jälkeen ladattiin projektiin servo-moottoreiden tiedot EtherCAT-verkon kautta. Moottoreiden tiedot ladattiin Sysmac Studio Axis Settings -välilehden alta löytyvästä Apply drive data to axis settings -asetuksesta. Kyseisellä toiminnolla Sysmac Studio lukee servo-ohjaimen ja käytetyn servomoottorin tiedot automaattisesti ja lisää ne akseliä ase- tuksiin. Kyseinen toiminto lukee esimerkiksi käytetyn pulssianturin pulssimäärän, moottorin maksiminopeuden, maksimiryömintänopeuden sekä moottorin vääntö- rajat.

Servomoottoreiden parametrien projektiin lataamisen jälkeen määritettiin akse- liä parametrit vastamaan sahalaitteen fyysistä toteutusta. Sahakelkkojen ja niitä liikuttavien servomoottoreiden voiman välityksessä käytettiin alennusvaihdetta sekä hihnavälitystä, joiden tiedot syötettiin Sysmac Studioon. Sahalaitteen ser- vomoottoreiden liikuttamien sahakelkkojen fyysiset tiedot syötettiin Sysmac Stu- dion Unit Conversion Settings -parametreihin. Sysmac Studioon syötettiin yk- sikkö, jossa sahakelkkojen positio haluttiin antaa. Sahakelkkojen position yksi- köksi valittiin millimetri.

Servomoottoreiden voiman välityksessä käytettiin alennusvaihdetta, jonka vaiku- tus sahakelkkojen ja servomoottoreiden voimavälitykseen otettiin huomioon.

Sysmac Studiosta valittiin servomootoreille käyttöön vaihdelaatikko, jonka välitys syötettiin Work travel distance -parametriin. Kyseiseen parametriin syötettiin millimetreinä matka, jonka teräkelkka liikkui yhdellä servomootorin pyörähdyksellä. Sahauskelkan siirtymä yhdellä servomootorin pyörähdyksellä laskettiin käytetyn alennusvaihteen välityksestä, ja tulokseksi saatiin 7.83 mm. Laskettu millimetrikokona syötettiin Sysmac Studioon kuvan 30 osoittamalla tavalla. Kuvassa 30 on korostettuina punaisella parametreihin syötetty liikeyksikkö, vaihdelaatikon valinta sekä sahauskelkan siirtymä yhdellä servomootorin pyörähdyksellä.

Axis Name	1 MC_Axis000	2 MC_Axis001
Channel	-	-
Output device 1	Node : 1	Node : 2
Channel	CH1	CH1
Output device 2	-	-
Channel	-	-
Output device 3	-	-
Channel	-	-
▼ Unit Conversion Setting		
Unit of display	mm	mm
Command pulse count	8388608 pulse/rev	8388608 pulse/rev
Gearbox usage	Use gearbox	Use gearbox
Work travel distance	10000 mm/rev	10000 mm/rev
Work travel distance	7.83 mm/rev	7.83 mm/rev
Work gear ratio (Nu)	1	1
Motor gear ratio (De)	1	1
▼ Operation Settings		

KUVA 30. Sahalaitteen sahauskelkkojen liikkeenohjauksen fyysisten suureiden syöttäminen Sysmac Studioon.

Sahalaitteen sahauskelkkojen fyysisten suureiden syöttämisen jälkeen määritettiin Sysmac Studioon servo-ohjauksien toiminta-asetukset. Toiminta-asetuksissa määritetään esimerkiksi servokäyttöjen maksimiliikenopeudet, maksimaaliset liikkeellelähtö- ja jarrutuskihtyvyydet, sekä positio- ja nollasspositioalueet. Sahauskelkkojen maksimaalinen liikenopeus syötettiin Sysmac Studioon Maximum velocity -parametriin ja maksimiryömintänopeus syötettiin Maximum jog velocity -parametriin.

Sahauskelkkojen maksimaaliset liikkeellelähtö- ja jarrutuskihtyvyydet syötettiin omiin parametreihinsä. Positio- ja nollasspositioalueiksi asetettiin 0.2 mm. Kyseisillä positioalueilla tarkoitetaan etäisyyttä, jonka servo-ohjaus hyväksyy poikettavaksi halutusta positioista. Kyseisellä 0.2 mm:n asetuksella servo-ohjaus hyväksyy kaikki positiot, jotka jäävät ± 0.2 mm:n päähän halutusta positioista. Kyseiset

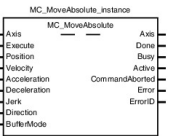
parametrit tuovat ohjaukseen hystereesiä, joka pienentää säätöpiirin huojuntaa. Servo-ohjain ei siis lähde korjaamaan sahakelkan positiota, jos sahauskelkan positio eroaa halutusta positiosta alle asetetun arvon. Suuri säätöalue stabiloi säätöpiiriä, kun servo-ohjain ei pyri jatkuvasti korjaamaan sahakelkan positiota. Kuvassa 31 on punaisella korostettuina Sysmac Studion syötetyt servoparametrit.

Parameter	Value	Value
Maximum velocity	61 mm/s	61 mm/s
Velocity warning value	0 %	0 %
Start velocity	0 mm/s	0 mm/s
Maximum jog velocity	50 mm/s	50 mm/s
Maximum acceleration	9999 mm/s ²	9999 mm/s ²
Acceleration warning value	0 %	0 %
Maximum deceleration	9999 mm/s ²	9999 mm/s ²
Deceleration warning value	0 %	0 %
Acceleration/deceleration over	Use rapid acceleration/deceleration (Blending is	Use rapid acceleration/deceleration (Blen
Operation selection at Reversing	Deceleration stop	Deceleration stop
Positive torque warning value	0 %	0 %
Negative torque warning value	0 %	0 %
In-position range	0.2 mm	0.2 mm
In-position check time	0 ms	0 ms
Actual velocity filter time constant	0 ms	0 ms
Zero position range	0.2 mm	0.2 mm

KUVA 31. Sahakelkkojen liikkeenohjauksen toimintaparametrien asettaminen.

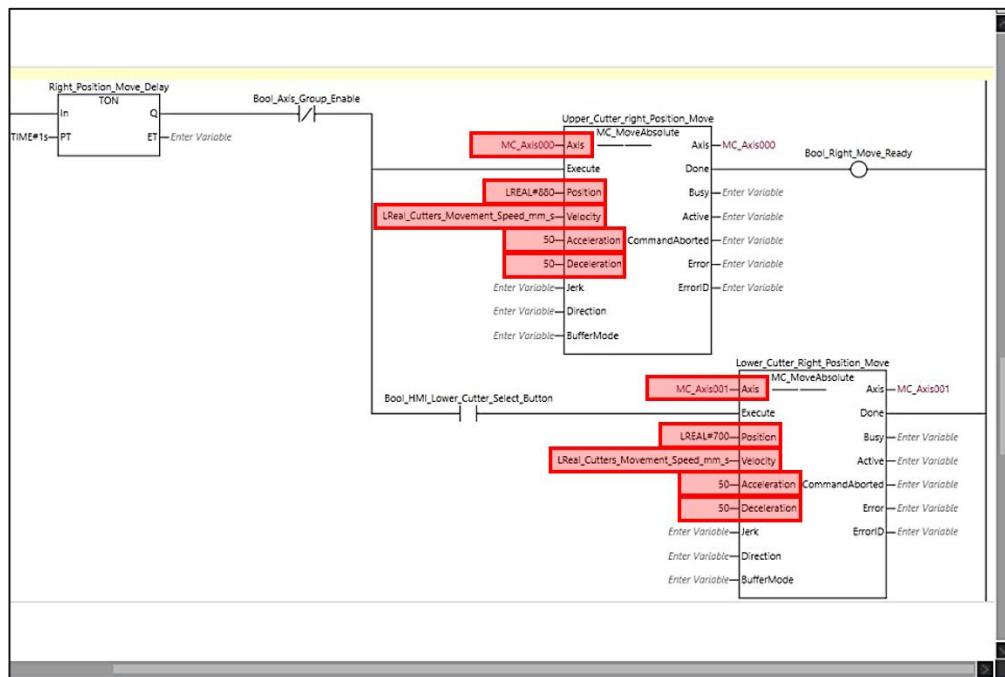
Servo-ohjaimien parametrien asettamisen jälkeen aloitettiin servokäyttöjen logiikkaohjelman ohjelmoiminen. Omronin Sysmac Studiosta löytyy valmiita toimilohkoja servokäyttöjen ohjaukseen. Sysmac Studiosta löytyy ohjaustoimilohkoja esimerkiksi servomoottoreiden nopeuden, position, nollapisteen sekä väännön ohjaukseen.

Sahakelkkojen positiota haluttiin ohjata absoluuttisesti haluttuun positioon, joten akseleiden ohjaukseen valittiin MoveAbsolute-toimilohkot. MoveAbsolute-toimilohkolla haluttu akseli liikkuu ennalta määritettyyn positioon, kun kyseinen toimilohko suoritetaan. MoveAbsolute-toimilohkon parametreillä määritetään esimerkiksi haluttu liikenopeus, kiihtyvyys sekä jarrutuskiihtyvyys, jolla haluttu servoakseli liikkuu. Kuvassa 32 on esitetty MoveAbsolute-toimilohkon kuvaus sekä esitysmuodot tikapuukaavio- ja rakenteinen teksti -ohjelmointikielillä Sysmac Studion Help-tietokannassa.

MC_MoveAbsolute				
The MC_MoveAbsolute instruction moves the axis to a specified absolute target position.				
Instruction	Name	FB/ FU N	Graphic expression	ST expression
MC_MoveAbsolute	Absolute Positioning	FB		<pre>MC_MoveAbsolute_instance (Axis := parameter, Execute := parameter, Position := parameter, Velocity := parameter, Acceleration := parameter, Deceleration := parameter, Jerk := parameter, Direction := parameter, BufferMode := parameter, Done => parameter, Busy => parameter, Active => parameter, CommandAborted => parameter, Error => parameter, ErrorID => parameter);</pre>

KUVA 32. MoveAbsolute-toimilohkon kuvaus Sysmac Studion Help-tietokannassa.

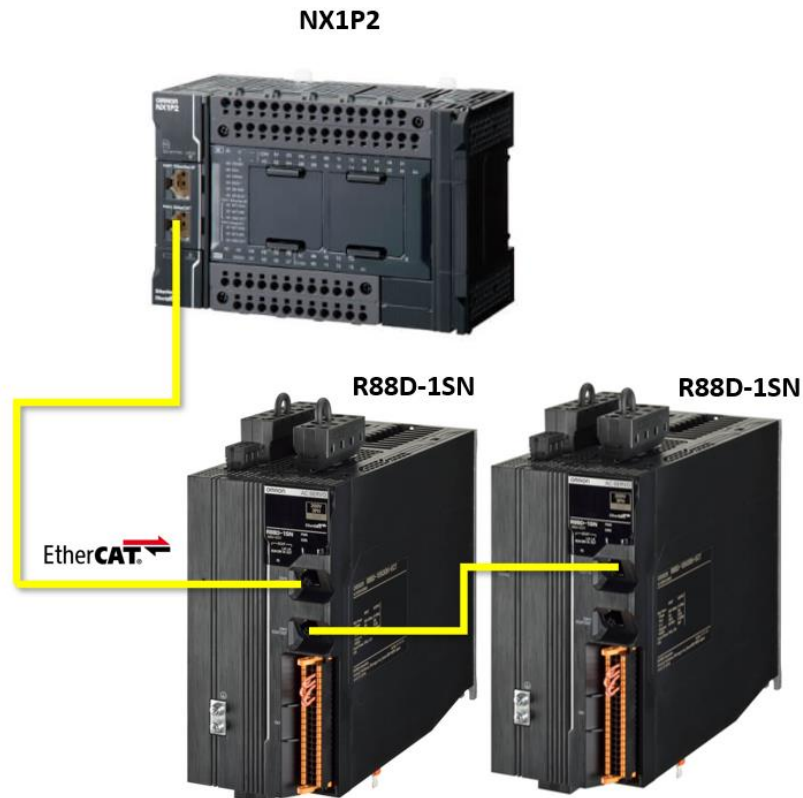
Sahakelkkojen liikkeen ohjaukseen käytettyjen MoveAbsolute-toimilohkon parametreihin määritettiin halutut akselit, jota kyseiset toimilohkot ohjasivat. Tämän lisäksi määritettiin positio eli paikka, johon kyseinen akseli toimilohkoa suoritettaessa liikkuu, liikenopeus, kiihtyvyys sekä jarrutuskihtyvyys. Kuvassa 33 on esitetty sahakelkkojen ohjaukseen luotu liikkeenohjausohjelma sekä punaisella korostettuna parametrit, jotka liikkeenohjauksen toimilohkoille määritettiin.



KUVA 33. Sahakelkkojen liikkeenohjaukseen Sysmac Studiassa luotu ohjelma sekä MoveAbsolute-toimilohkojen parametrien määrittäminen korostettuna punaisella.

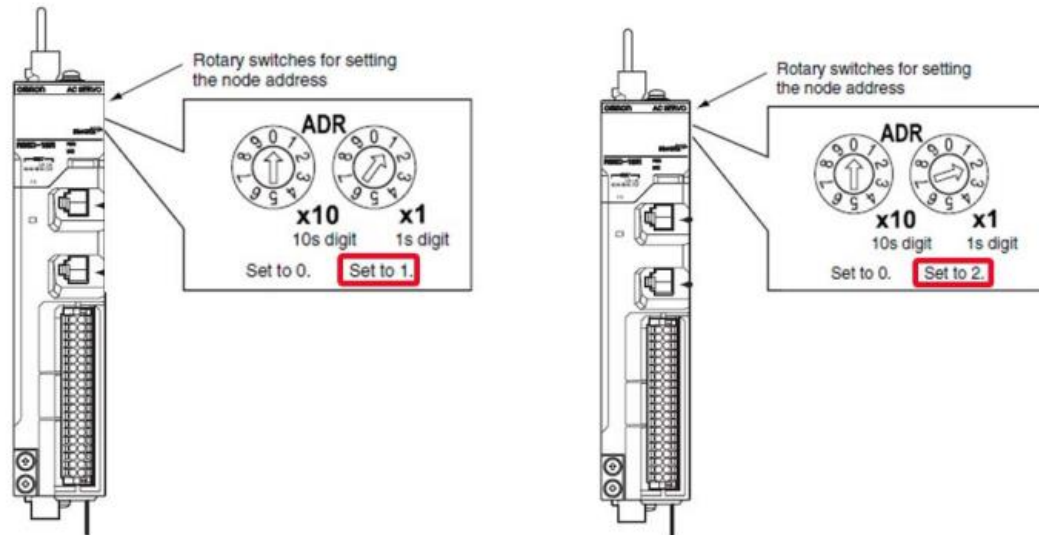
4.5 Sahakoneen EtherCAT-väylärakenne

Sahakoneen saha-akselien liikkeenohjaukseen käytettyjen Omronin 1S-sarjan servo-ohjaimien ohjaukseen käytettiin EtherCAT-koneautomaatioväylää. Servo-ohjaimien ohjauksessa käytettiin kuvan 34 mukaista väylämallista väylärakennetta. EtherCAT-väylän kaapeloinnissa käytettiin suojattuja Cat 6 -verkkokaapeleita.



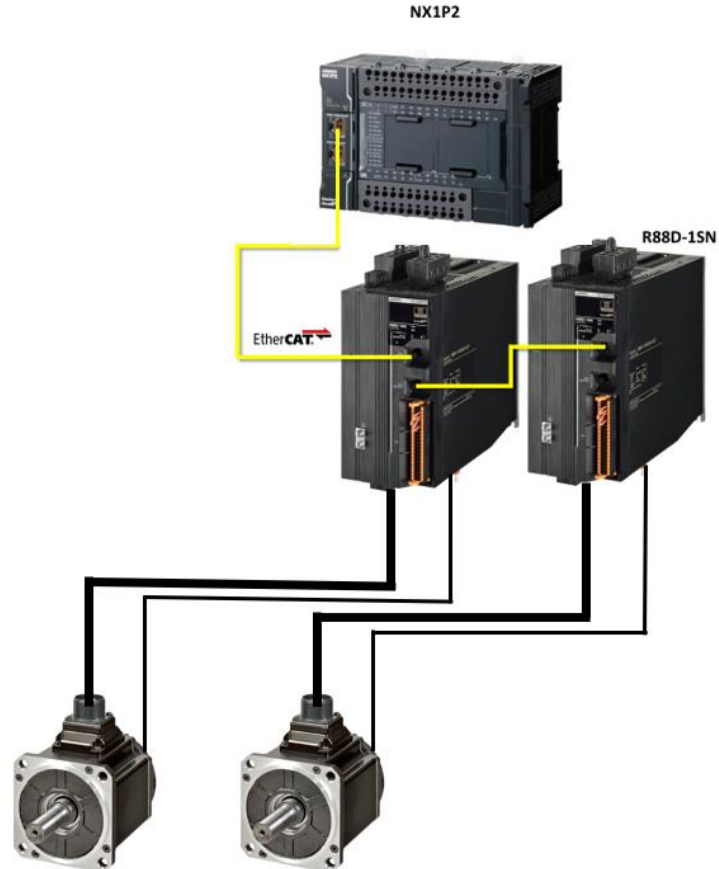
KUVA 34. Sahakoneen EtherCAT-verkon rakenne.

Sahakoneen EtherCAT-verkon määrittäminen aloitettiin määrittämällä servo-ohjaimien laiteosoitteet servo-ohjaimien kytkimistä kääntämällä. Sahakoneen ylemmää liikeakselia ohjaavan servo-ohjaimen osoitteeksi asetettiin yksi ja sahakoneen alemmaa liikeakselia ohjaavan servo-ohjaimen osoitteeksi asetettiin kaksi kuvan 35 mukaisesti.



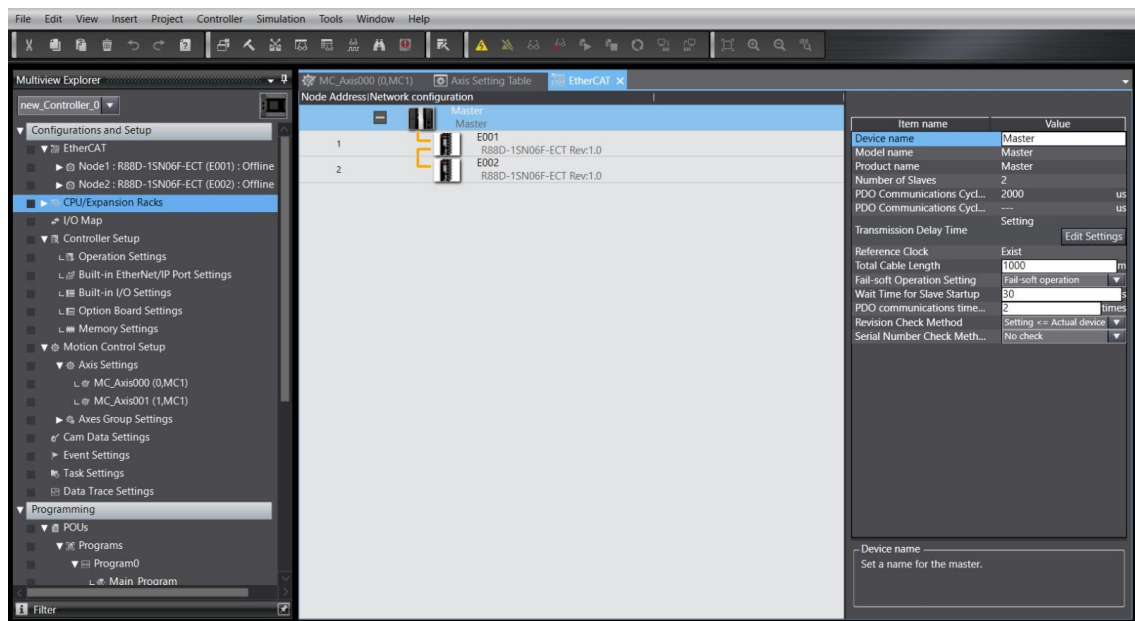
KUVA 35. Sahakoneen servo-ohjaimien EtherCAT-osoitteiden määrittäminen servo-ohjaimien konfigurointikytkimistä. (Omron Corporation, g)

Servo-ohjaimien osoitteiden asettamisen jälkeen kytkettiin servomootoreiden tehonsyöttö- ja pulssianturikaapelit servo-ohjaimiin kuvan 36 osoittamalla tavalla.



KUVA 36. Servomootoreiden kytkentä servo-ohjaimiin.

Servo-ohjaimien fyysisen asentamisen sekä osoitteiden asettamisen jälkeen suoritettiin EtherCAT-verkon konfigurointi Omronin Sysmac Studio -koneautomaatioympäristössä. Konfigurointi aloitettiin kytkemällä järjestelmään sähköt, jotta saatiin käytettyä Sysmac Studion automaattista EtherCAT-verkon rakenteen tunnistusominaisuutta. Verkon konfigurointi onnistuu Sysmac Studiossa EtherCAT-välilehdessä, jossa näkyy verkon rakenne. Kuvassa 37 on kuvattuna Sysmac Studion EtherCAT-välilehti.



KUVA 37. Sysmac Studion EtherCAT-verkon konfigurointivälilehti.

Laitteiston konfiguraation lataamisen jälkeen servo-ohjaimien EtherCAT-verkon konfigurointi oli valmis.

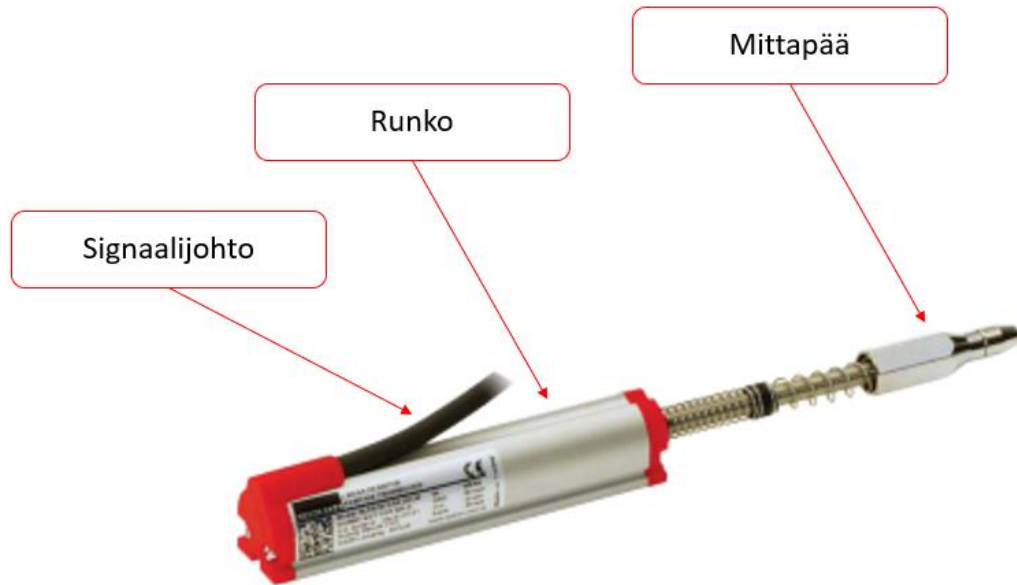
4.6 Pituusvalvonta

Sahakoneen sahaamien komposiittitankojen pituutta haluttiin valvoa komposiittitankojen sahausajan aikana. Sahalaitteen sahaamien komposiittitankojen pituutta mitattiin komposiittitankojen päistä fyysisesti mittaamalla mekaanisilla mittausantureilla. Tämä haluttiin tehdä siksi, että kyseinen mittaustapa soveltui parhaiten kyseiseen käyttöympäristöön. Mittausantureiden käyttöympäristö oli erittäin pölyinen, mikä sulki pois kosketuksettomat anturimallit, kuten laseretäisyysmittarit ja ultraäänianturit. Kuvassa 38 on esitetty sahalaitteen tuotteiden pituusvalvontaan asennettujen pituusvalvonta-anturien mittapäät.



KUVA 38. Sahalaitteen päätylevy ja siihen asennettujen pituusvalvonta-anturien mittapäät.

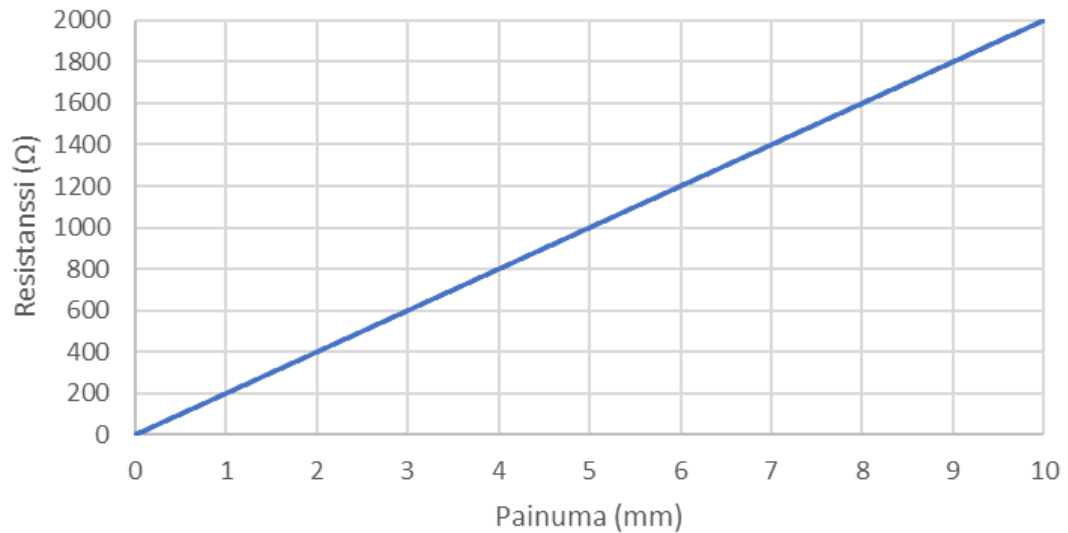
Sahakoneen sahaamien komposiittitankojen pituuden mittaukseen valittiin lineaaripotentiometrit. Lineaaripotentiometri on potentiometri, jonka toimintasuunta on lineaarinen. Lineaaripotentiometri koostuu mittapästä, potentiometrin rungosta sekä signaalijohdosta. Lineaaripotentiometrin fyysinen rakenne on havainnollistettu kuvassa 39.



KUVA 39. Lineaaripotentiometrin rakenne.

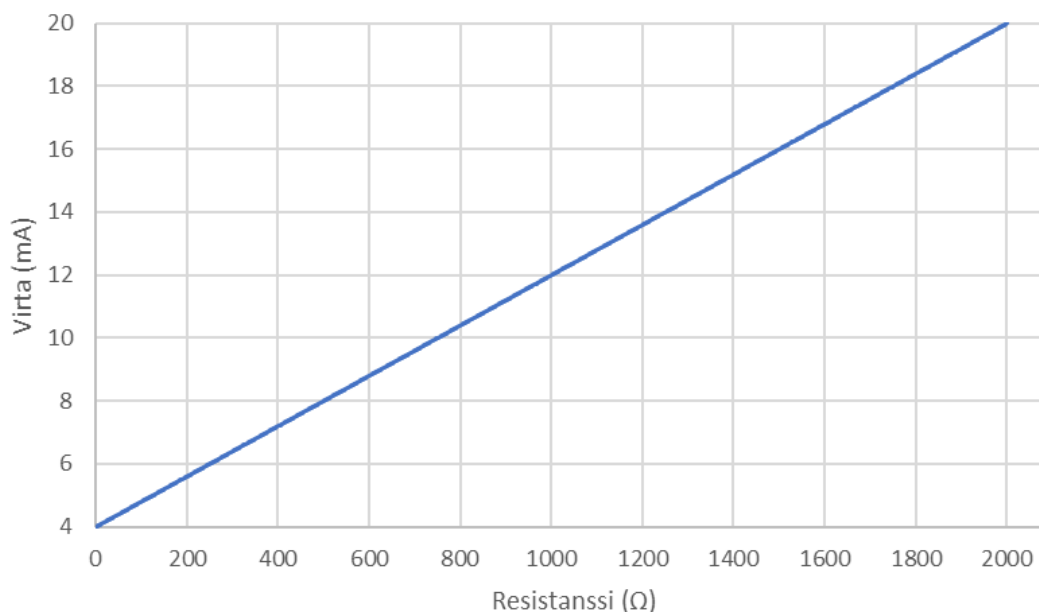
Lineaaripotentiometrin mittapään painuessa potentiometrin rungon sisään muuttuu lineaaripotentiometrin vastusarvo. Lineaaripotentiometrin vastusarvo muuttuu lineaarianturin mittapään positiona funktiona. Lineaaripotentiometriä mittaustarkkuuteen vaikuttaa lineaaripotentiometrin liikepituus sekä lineaaripotentiometrin lähtösignaalin tyyppi (Airila 1999). Lineaaripotentiometrin liikepituudella tarkoitetaan liikealuetta, jonka lineaaripotentiometrin mittapää liikkuu lineaaripotentiometrin rungon sisällä. Lineaaripotentiometreistä saatiin resistanssisignaali lineaaripotentiometriä signaalijohtojen välityksellä.

Sahakoneen sahaamien komposiittitankojen pituusvalvontaan valittiin jousipalautteinen lineaaripotentiometri, jonka liikepituus oli 10 mm ja lähtösignaalin oloarvo vaihtui välillä 0–2000 Ω . Sahakoneessa käytettyjen lineaaripotentiometriä vastusarvon muutos mittapään painuman funktiona on esitetty kuvassa 40.



KUVA 40. Lineaaripotentiometrien vastusarvo mittapään painauman funktiona.

Sahakoneen sahaamien komposiittitankojen pituuden mittaavien lineaaripotentiometrien ja koneautomaatio-ohjaimen välillä käytettiin mittamuuntimia. Mittamuunnin on komponentti, joka muuntaa muuntimen sisäntulosignaalin tyyppin haluttuun mittamuuntimen ulostulon signaalityyppiin. Sahakoneen mittamuuntimilla muunnettiin lineaaripotentiometrien resistanssilähtöviesti Differential-tyypiseksi 4–20 mA virtaviestiksi. Mittamuuntimien ulostulon virtaviesti muuttui suoraan verrannollisesti mittamuuntimien sisäntulon resistanssiarvoon. Sahakoneen mittamuuntimien ulostulon virtaviestin muuttuminen lineaaripotentiometrien resistanssin funktiona on esitetty kuvassa 41. Kuvasta huomataan, miten mittamuuntimien ulostulon virtaviestin suuruus kasvaa lineaaripotentiometrien resistanssiarvon kasvaessa.



KUVA 41. Sahakoneen mittamuuntimien ulostulon virtaviestin käyttäytyminen sisääntulon resistanssin funktiona.

Lineaaripotentiometriä signaalin muunnos virtaviestiksi tehtiin, koska haluttiin saada lineaaripotentiometriä mittaustuloksesta mahdollisimman tarkka ja häiriökestävä. Virtaviesti on häiriökestävämpi tapa siirtää signaaleja kuin resistanssi- ja jänniteviestit. Virtaviesti on häiriökestävämpi analogiasignaalin siirtotapa siksi, että virran suuruus suljetussa silmukassa on samansuuruinen silmukan joka kohdassa. Tämä perustuu Kirchhoffin virtalakiin, jonka mukaan solmupisteeseen tulevien virtojen summa on yhtä suuri kuin siitä lähtevien virtojen summa. Näin ollen virtaa ei häviä eikä synny suljetussa sähköpiirissä, jolloin virtasignaali on aina samansuuruinen mittapisteessä kuin koko mittauspiirissä (Tarkka et al. 2002).

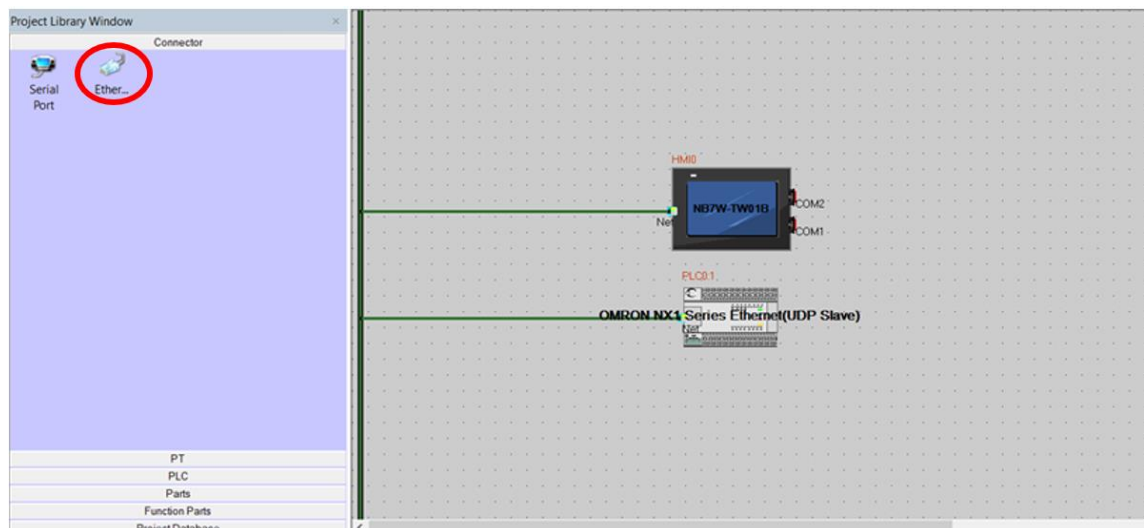
Resistanssisignaali on herkempi erilaisille häiriöille kuin virtasignaali. Mittauspiirin resistanssi voi muuttua mittapiirin ulkoisten häiriöiden seurauksena, kuten piirin liitoksien löystymisen tai komponenttien ja mittajohtimien lämpenemisen seurauksena. Mittajohtimien lämmitessä muuttuvat myös niiden resistanssit.

Jännitesignaali on myös alttiita häiriöille ja vääristymiselle. Jännitemittauspiirissä mittauspiirin resistanssin muuttuminen saa aikaan jännitesignaalin vääristymisen. Jännitemittauspiirissä esimerkiksi mittausjohtimien liitoksien löystyminen

saa aikaan jännitesignaalin vääristymisen. Tämä johtuu siitä, että jännitemittauspiirin osakomponenttien resistanssien muuttuessa muuttuvat myös jännitteet niiden yli. Pitkät jännitesignaalin siirtoetäisyydet vääristävät signaalin suuruutta. Tämä johtuu siitä, että jännitepiirissä mittajohtimet muodostavat mittauspiirin resistiivisen komponentin, jonka kasvaminen saa aikaan mittaustuloksen vääristymisen. Kirchhoffin jännitelain mukaan piirin osajännitteiden summa on nolla. Jännitemittauspiirissä mittausjohtimet muodostavat mittauspiirin yhden osakomponentin, jonka yli vaikuttavan jännitteen muuttuminen vaikuttaa piirin muihin jännitteisiin. Mittauspiirin osajännitteiden summa on yhtä suuri kuin piirin kokonaisjännite (Inkinen et al. 2012).

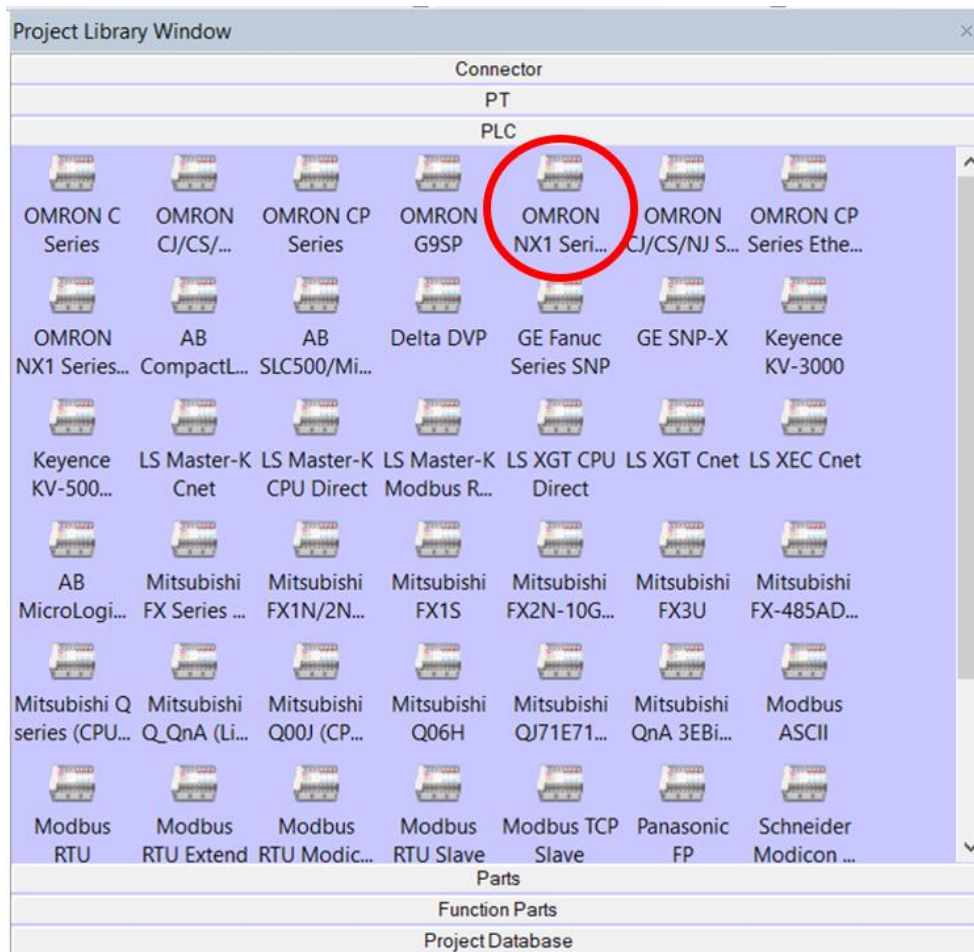
4.7 Käyttöliittymän ohjelmointi

Sahakoneen käyttöliittymän ohjelmointi aloitettiin määrittämällä kommunikointitapa, jolla käyttöliittymä viestii koneautomaatio-ohjaimen kanssa. Sahakoneen käyttöliittymän ja koneautomaatio-ohjaimen välisenä tiedonsiirtoväylänä käytettiin Ethernetia, joka valittiin tiedonsiirtotavaksi kuvan 42 osoittamalla tavalla Connector-välilehdeltä.



KUVA 42. Sahakoneen käyttöliittymän tiedonsiirtotavan valinta Connector-välilehdeltä.

Valitussa tiedonsiirtotavassa käyttöliittymä toimii Ethernet-väylän ohjaimena ja koneautomaatio-ohjain orjalaitteena. Tiedonsiirtotavan määrittämisen jälkeen valittiin haluttu käyttöliittymä, jota halutaan ohjelmoida. Haluttu käyttöliittymä valittiin NB-Designerin PT-välilehdeltä, josta löytyvät kaikki Omronin NB-sarjan käyttöliittymät. Tämän jälkeen valittiin haluttu ohjelmoitava logiikka, jonka kanssa käyttöliittymä liitettiin yhteen. Logiikaksi valittiin NX-sarjan logiikka NB-Designerin PLC-välilehdeltä. Kuvassa 43 on esitetty ohjattavan laitteen määrittäminen NB-Designerin PLC-välilehdeltä.



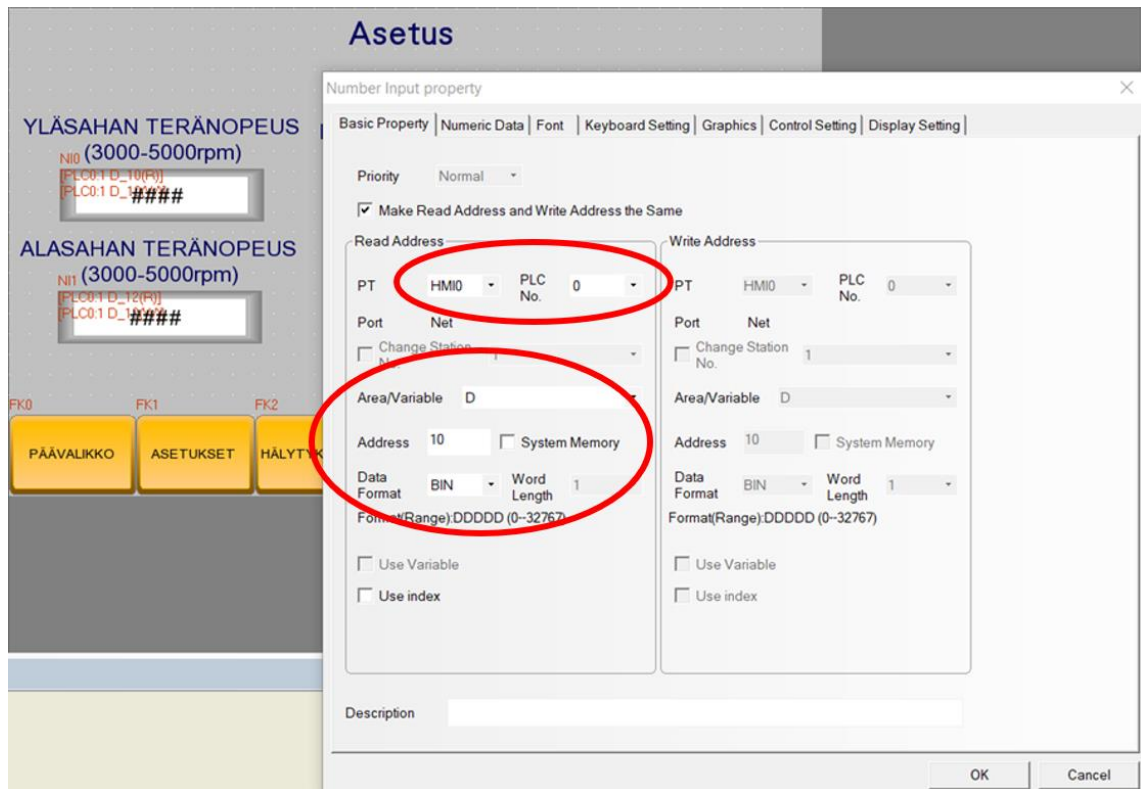
KUVA 43. Ohjattavan laitteen määrittäminen NB-Designerin PLC-välilehdeltä.

Laitteiden määrittämisen jälkeen koneautomaatio-ohjaimelle ja käyttöliittymälle asetettiin IP-osoitteet, verkkomaskit sekä oletusyhdyskäytävä, jotta Ethernetin yli kommunikointi onnistuisi. Kuvassa 44 on havainnollistettu käyttöliittymän verkkoasetusten määrittäminen.

The image shows a 'PT property' configuration window with several tabs and sections. The 'Network Setting' section is active, showing IP Address (192 . 168 . 250 . 2), Subnet Mask (255 . 255 . 255 . 0), and Default Gateway (192 . 168 . 0 . 254). Other sections include Display Setting (Horizontal/Vertical), VNC settings (Monitor Mode Password: 888888, Operation Mode Password: 888888), FTP settings (Password: 888888), and Save Screenshot to External Memory (USB1). The window also has 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

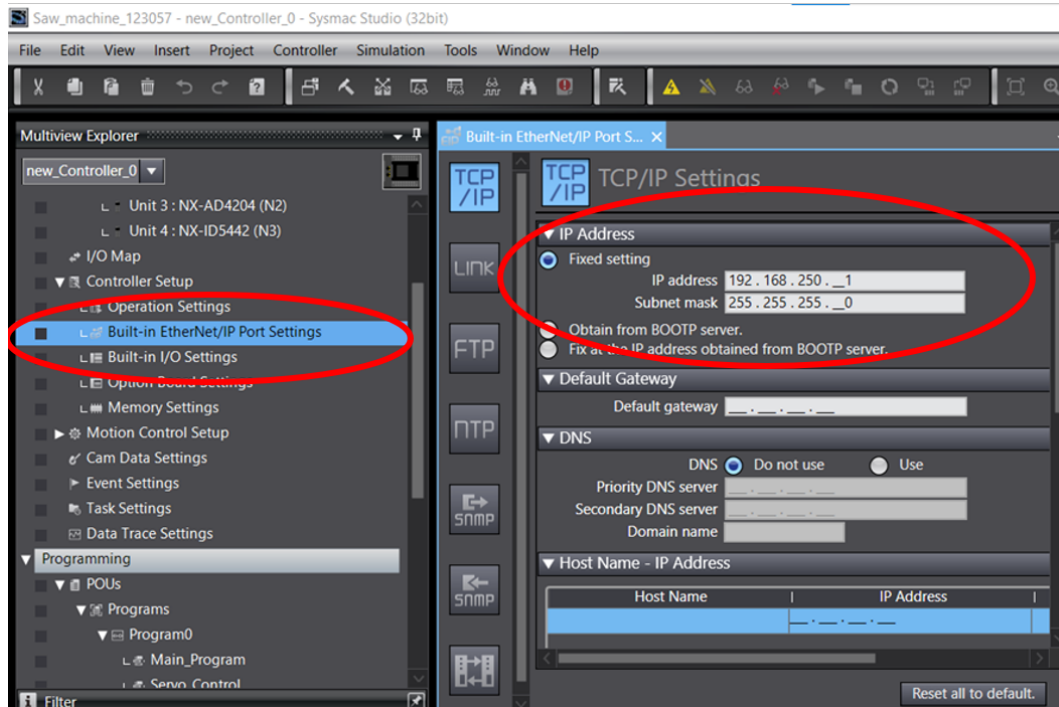
KUVA 44. Käyttöliittymän verkkoasetusten määrittäminen.

Verkko- ja laitteistoasetusten määrittämisen jälkeen aloitettiin luomaan sahakoneen näytön toiminnallisuuksia. Käyttöliittymään luotiin haluttu määrä eri näyttöjä, painikkeita sekä teksti- ja numerokenttiä, joiden avulla onnistui sahakoneen asetusten määrittäminen sekä erilaiset käsiohjaukset. Sahakoneeseen luodut käyttöliittymän näytöt löytyvät Liitteestä 2. Erilaisia painikkeita ja numerokenttiä käytettäessä oli määritettävä muistialue, datamuoto, formaatti sekä laite, jolle kyseinen tieto oli osoitettu. Kuvassa 45 on esitetty ylemmän sahaterän numerokentän asetusten määrittäminen tiedonsiirron onnistumiseksi. Kuvassa on valittu haluttu laite, jolle kyseinen tieto halutaan lähettää ja lukea, eli PLC No 0. Muistialueeksi valittiin D-muistialue, osoitteeksi 10 sekä dataformaatiksi binaari.



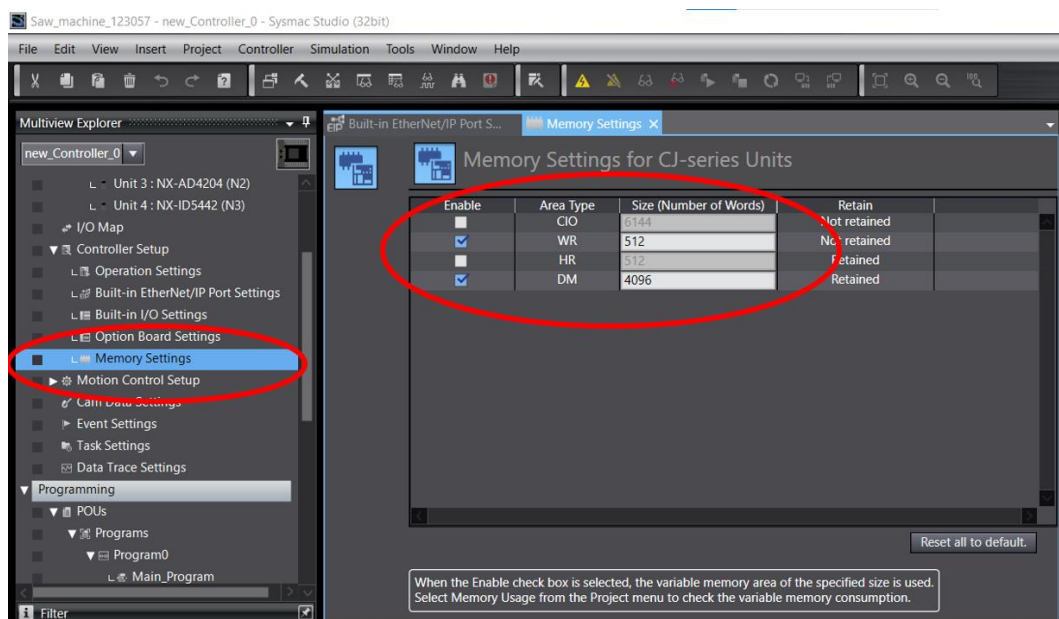
KUVA 45. Sahakoneen ylempään sahterän nopeussäätökentän asetusten valinta.

Käyttöliittymän asetusten määrittämisen jälkeen koneautomaatio-ohjaimelle oli valittava verkko- ja laitteistoasetukset Omronin Sysmac Studiolla. Verkkoasetusten määrittäminen aloitettiin asettamalla koneautomaatio-ohjaimelle NB-Designerissä määritetyt IP-osoite sekä verkkomaski. IP-osoitteen määrittäminen tehtiin Sysmac Studio Built-in Ethernet/IP Port Settings -välilehden kautta. Koneautomaatio-ohjaimen verkkoasetusten määrittäminen Sysmac Studiossa on esitetty kuvassa 46.



KUVA 46. Sahakoneen koneautomaatio-ohjaimen IP-osoitteen ja verkkomaskin asettaminen.

IP-osoitteen sekä verkkomaskin asettamisen jälkeen oli varattava näytön käyttämät koneautomaatio-ohjaimen D- sekä W-muistialueet käyttöliittymän käyttöön. Muistialueiden varaaminen tehtiin Sysmac Studion Memory Settings -välilehden kautta. Muistialueiden varaaminen Memory Settings -välilehdellä on havainnollistettu kuvassa 47.



KUVA 47. Muistialueiden varaaminen Omronin Sysmac Studiassa.

Haluttujen muistialueiden varaamisen jälkeen oli linkitettävä haluttu tieto haluttuun muuttujaan. Linkittäminen tehtiin Sysmac Studion muuttujat-välilehdeltä. Kyseisen välilehden AT-sarakkeesta asetettiin muistialue ja osoite, josta kyseisen muuttujan oloarvo haluttiin lukea ja kirjoittaa. Kuvassa 48 on esitetty sahakoneen yläterän nopeusohjeen oloarvon linkittäminen haluttuun muistialueeseen.

The screenshot displays the Sysmac Studio interface. At the top, the 'Variables' table is visible, showing a list of variables with their data types and attributes. A red box highlights the 'AT' (Address Table) column for two variables: 'INT_HMI_U1_Speed_Reference' and 'INT_U2_Speed_Reference'. The 'AT' column contains the addresses '%D10' and '%D12' respectively. The 'Retain' column for these variables is checked, indicating they are to be retained in memory.

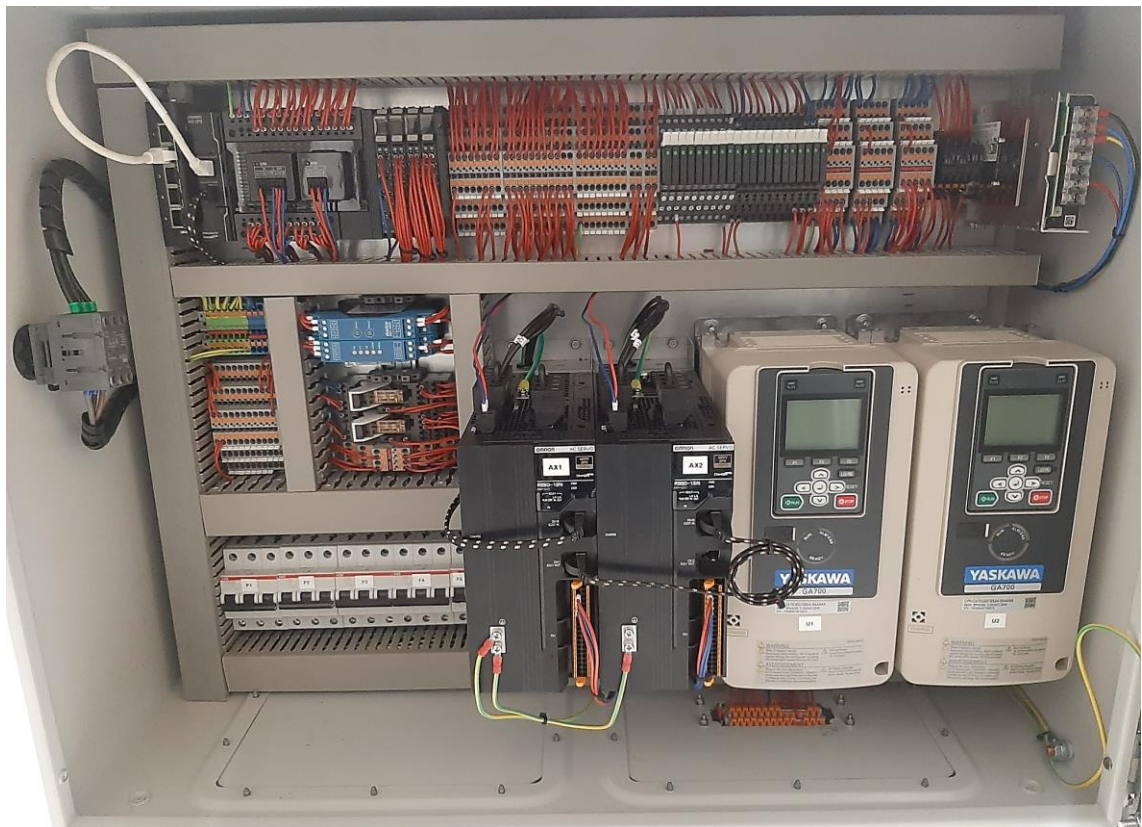
Below the table, the 'Rung Comment List' shows three rungs of a ladder logic program:

- Rung 0:** This rung controls the emergency circuits. It features a normally open contact labeled 'BIO_Input_Bit_00_Control_Power' leading to a TON (Timer On Delay) block. The TON block has 'TIME#2s' in the 'PT' (Preset Time) field. The output 'Q' of the TON block is connected to a coil labeled 'Bool_Emergency_Circuit_Active'.
- Rung 1:** This rung control Sawmachine automatic/manual mode status. It has two normally open contacts: 'Bool_HMI_Auto_Button' and 'Bool_Automatic_Mode_Selected'. These are connected to a coil labeled 'Bool_Automatic_Mode_Selected'.
- Rung 2:** This rung controls sawmachine alarms mode status. It has two normally open contacts: 'Bool_HMI_Manual_button' and 'Bool_General_Alarm'. These are connected to a coil labeled 'Bool_Manual_Mode_Selected'.

KUVA 48. Sahakoneen yläterän nopeusohjeen linkittäminen haluttuun muuttujaan.

4.8 Automaatiokeskusten kasaus

Automaatiokeskuksiin asennettiin komponentit hyvien asennustapojen, standardien sekä valmistajien asennusohjeiden mukaan. Sahalaitteen pääkeskukseksi valittiin kaappikeskus, johon sahalaitteen komponentit mahtuivat. Sahalaitteen pääkeskuksen kokoa rajoitti pääkeskuksen asennuspaikka, joka ei mahdollistanut suurempaa sähkökeskusta. Sahalaitteen pääkeskus on esitetty kuvassa 49.



KUVA 49. Sahalaitteen pääkeskus ja komponentit.

Sahalaitteen pääkeskuksen suunnittelussa otettiin huomioon sähkökomponenttien riittävä jäähdytys erityisesti lämpöä tuottavien komponenttien, kuten käytettyjen servo-ohjaimien sekä taajuusmuuttajien osalta. Sahalaitteen pääkeskuksen jäähdytyksessä ei voitu käyttää ilmaa sahakeskuksen ulkopuolelta kierrättäviä tuulettimia käyttöympäristön pölyisyyden vuoksi. Sahakoneen pääkeskuksen riittävä jäähdytys varmistettiin asentamalla pääkeskus avoimeen ympäristöön sekä lisäämällä pääkeskuksen oveen jäähdytysrivat. Jäähdytysriivoilla lisättiin pääkeskuksen sisä- ja ulkopuolen pinta-alaa, joka mahdollisti pääkeskuksen paremman

jäähdytyksen. Kuvassa 50 on esitetty sahalaitteen pääkeskuksen oveen asennetut jäähdytysrivat.

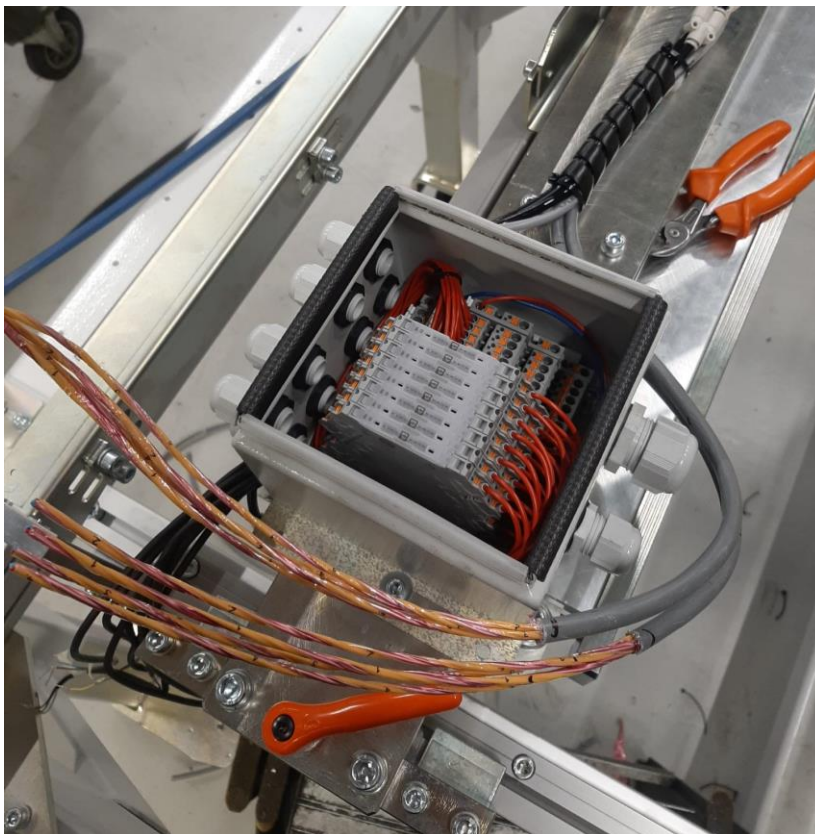


KUVA 50. Sahakoneen pääkeskuksen jäähdytysrivat.

Sahakoneen rungon kasauksen ja automaatiokeskusten asennuksen jälkeen kaapeloitiin sahalaitteen toimilaitteet sekä anturit sahalaitteen pääkeskuksen riskiyhtäliittimille. Sahalaitteen kaapeloinnissa otettiin huomioon kaapeleiden pienimmät sallitut taivutussäteet, kaapeleiden poikkipinta-alat sekä niiden soveltuvuus käyttötarkoitukseensa sekä käyttöympäristöönsä. Sahalaitteen kaapeleiden oli kestettävä fyysinen rasitus, jota sahalaitteen eri akselien liikkeet sekä ympäristön pölyisyys aiheuttivat.

Sahalaitteen liikeakseleiden kaapeleiden oli kestettävä fyysinen rasite, jonka akselien jatkuva liikkuminen aiheutti. Sahalaitteen kaapeloinnissa oli otettava huomioon kaapeleiden poikkipinta-alojen riittävyys käytetyille suojalaitteille. Laitteen tehonsyöttökaapeleiden oli kestettävä suurin mahdollinen kuormitus sekä oikosulkuvirta, jonka toimilaitteiden ja moottoreiden suojalaitteet mahdollistivat (Tarkkinen 2022). Sahalaitteen kaapeloinnin suunnittelussa otettiin huomioon

myös kaapeleiden käyttötarkoitus. Esimerkiksi komposiittitankojen pituusvalvontakytkentäkotelon ja sahalaitteen pääkeskuksen välillä käytettiin parisuojattua kaapelia mittasignaalin häiriökestävyyden vuoksi. Sahalaitteen mittamuuntimien kytkentäkotelo sekä mittaussignaalin siirtoon käytetty parisuojattu kaapeli on esitetty kuvassa 51.



KUVA 51. Pituusmittausanturien mittamuuntimien kytkentäkotelo ja käytetty parisuojattu kaapeli.

5 TOIMINNALLINEN TESTAUS

Toiminnallisella testauksella pyrittiin varmistamaan sahalaitteen oikeanlainen toiminta ennen laitteen liittämistä osaksi asiakkaan tuotantoprosessia. Sahalaitteen testauksessa pyrittiin varmistamaan sahalaitteen kaikkien komponenttien sekä toimintojen oikeanlainen toiminta ja varmistamaan koneen turvallinen käyttö.

5.1 Tehdastestaus

Sahalaitteen kytkentöjen sekä fyysisten asennusten valmistumisen jälkeen aloitettiin sahakoneen tehdastestaus. Tehdastestauksessa testataan tehtyä laitteistoa koneenrakentajan tiloissa simuloiden laitteiston oikeaa toimintaympäristöä. Toimintaympäristön simuloinnissa voidaan käyttää testilaitteistoa sekä testiohjelmistoa, jotka simuloivat laitteen lopullista toimintaympäristöä. Tehdastestauksella varmistetaan laitteiston oikeanlainen toiminta. Tehdastestauksessa pyritään testaamaan kaikki mahdolliset koneen toiminnot, jotka ovat testattavissa ennen laitteen asiakkaalle toimittamista. (Ajo et al. 2001)

Ennen sahalaitteen automaattitoimintojen toiminnan testausta varmistettiin sahalaitteen turvapiirin oikeanlainen toiminta. Turvapiirin testauksessa testattiin sahalaitteen turvallinen pysähtyminen hätä-seis-piirin katketessa. Hätä-seis-piirin testauksessa varmistettiin sahalaitteen pysähtyminen painettaessa hätä-seis-painiketta tai avatessa sahalaitteen turvaovi. Sahalaitteen hätä-seis-piirin oikeanlaisen toiminnan varmistamisen jälkeen aloitettiin sahalaitteen eri toimintojen testaaminen.

Sahalaitteen toimintojen testaamisessa varmistettiin sahalaitteen anturien ja painonappien oikeanlainen toiminta. Sahalaitteen anturien sekä painonappien testaaminen suoritettiin, jotta voitiin varmistaa oikean tiedon välittyminen koneautomaatio-ohjaimen oikeaan IO-pisteeseen. Testaaminen tehtiin painamalla tiettyä painonappia tai vaikuttamalla tiettyyn anturiin, jolloin varmistettiin oikean sisään-tulo-osoitteen tilan muuttuminen Sysmac Studion muuttujalistauksessa. Kuvassa

52 on esitetty muuttujalistaus, jossa Value-sarakkeessa punainen väri sekä teksti TRUE indikoivat tulon vaikuttumista.

Position	Port	Description	R/W	Data Type	Value	Variable	Variable Comment	Variable Type
EtherCAT Network Configuration								
Node1	R88D-1SN06F-ECT							
Node2	R88D-1SN06F-ECT							
CPU/Expansion Racks								
Built-in I/O Settings								
	Input Bit 00	Input Bit 00	R	BOOL	TRUE	BIO_Input_Bit_00_Control_Power		Global Variables
	Input Bit 01	Input Bit 01	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_01_START_Button		Global Variables
	Input Bit 02	Input Bit 02	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_02_STOP_Button		Global Variables
	Input Bit 03	Input Bit 03	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_03_Cripper1_Homeli		Global Variables
	Input Bit 04	Input Bit 04	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_04_Cripper2_Homeli		Global Variables
	Input Bit 05	Input Bit 05	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_05_Stopper_Plate_H		Global Variables
	Input Bit 06	Input Bit 06	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_06_Sledge_homelimi		Global Variables
	Input Bit 07	Input Bit 07	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_07_Sledge_Overlimi		Global Variables
	Input Bit 08	Input Bit 08	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_08_Upper_Cutter_Ri		Global Variables
	Input Bit 09	Input Bit 09	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_09_Upper_Cutter_Le		Global Variables
	Input Bit 10	Input Bit 10	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_10_Lower_Cutter_Ri		Global Variables
	Input Bit 11	Input Bit 11	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_11_Lower_Cutter_Le		Global Variables
	Input Bit 12	Input Bit 12	R	BOOL	TRUE	BIO_Input_Bit_12_Air_pressure_sen		Global Variables
	Input Bit 13	Input Bit 13	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_13_External_START		Global Variables
	Input Bit 14	Input Bit 14	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_14_Pulling_ON_from		Global Variables
	Input Bit 15	Input Bit 15	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_15_Fault_From_the_I		Global Variables
	Input Bit 16	Input Bit 16	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_16_Control_Power_C		Global Variables
	Input Bit 17	Input Bit 17	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_17_Fault_U1		Global Variables
	Input Bit 18	Input Bit 18	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_18_Fault_U2		Global Variables
	Input Bit 19	Input Bit 19	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_19_Product_Condes		Global Variables
	Input Bit 20	Input Bit 20	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_20_Reject_Lights_H1		Global Variables
	Input Bit 21	Input Bit 21	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_21_Reject_Lights_H1		Global Variables
	Input Bit 22	Input Bit 22	R	BOOL	FALSE	BIO_Input_Bit_22_Reject_Lights_H1		Global Variables

KUVA 52. Sahakoneen Sysmac Studio -projektin IO-muuttujalistaus.

Sahalaitteen IO-testauksen jälkeen aloitettiin sahalaitteen eri toimintojen testaaminen. Ensimmäisenä varmistettiin sahalaitteen manuaalisten toimintojen oikeanlainen toiminta. Sahalaitteen käyttöliittymän kautta tehtyjen käsikäyttöpainikkeiden avulla testattiin sahalaitteen eri akseleiden sekä paineilmasylinterien oikeanlainen toiminta.

Sahalaitteen manuaalisen testaamisen jälkeen aloitettiin laitteen automaattitoimintojen testaaminen. Sahalaitteen automaattiajon testauksessa varmistettiin laitteen sahaussekvenssin oikeanlainen toiminta. Sahalaitteen sahaussekvenssin aikana kone suorittaa komposiittitankojen katkaisun, urituksen, pölynpoiston, pituuden mittauksen sekä tuotteiden siirtämisen tuotesiiloihin. Laitteen sahaussekvenssin toimintaa yhdessä tuotantolinjan kanssa simuloitiin asentamalla sahauslaitteeseen erillinen testauslaite, joka syötti sahalaitteelle komposiittitankoja tuotantolinjan tapaan. Sahalaitteen testaukseen rakennettu testauslaite on esitetty kuvassa 53. Sahalaitteen testauslaite simuloi myös tuotantolinjalta tulevia signaaleja, kuten tuotantolinjanopeutta sekä tilatietoja.



KUVA 53. Sahalaitteen testaukseen rakennettu testauslaite.

Sahalaitteen toiminnallisuuden toiminnan varmistamisen jälkeen testattiin laitteen pituusvalvonta-anturien oikeanlainen toiminta tekemällä mittaustestejä. Mittaustesteissä anturien mittapäät painettiin sahalaitteen päätylevyn pintaan, ja anturien näyttämät mittaustulokset kirjattiin ylös. Tämän jälkeen annettiin anturien mittapäiden palautua lepoasentoonsa. Mittaus toistettiin viisi kertaa luotettavan mittaustuloksen varmistamiseksi. Pituusvalvonta-anturien mittaustulokset ovat koottuna taulukkoon 1.

TAULUKKO 1. Pituusvalvonta-anturien tehdastestauksen mittaustulokset millimetreinä sekä suurin hajonta eri mittauskertojen välillä.

Mittaus (nro)	Anturi (nro)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,6387	5,7112	5,9412	4,4425	5,875	6,3312	4,5487	4,9924
2	5,6462	5,71	5,927	4,421	5,8699	6,3425	4,5412	4,9987
3	5,6525	5,7237	5,9312	4,4299	5,875	6,3362	4,5475	5,0062
4	5,6462	5,7187	5,9349	4,4375	5,8737	6,3249	4,5549	5
5	5,6441	5,7216	5,9305	4,4357	5,8728	6,3378	4,5436	4,999
Max-Min (mm)	0,0138	0,0137	0,0142	0,0215	0,0051	0,0113	0,0075	0,0138

Saaduista mittaustuloksista nähtiin, että lineaarianturit antoivat vähintään kolmen sadasosamillimetrin tarkkuudella saman mittaustuloksen eri mittauskerroilla. Li-

neaarianturien valmistaja ilmoitti lineaarianturien tarkkuudeksi yhden sadasosa-millimetrin (Opkon 2023). Mittaustuloksien eroavaisuus ilmoitettuun tarkkuuteen voidaan selittää mittapiirin muiden komponenttien tarkkuudella. Lisäksi virhettä mittaustuloksiin aiheuttaa mittaussignaalin siirto ja muuntaminen. Mittausvirhettä mittaustapahtumassa voivat aiheuttaa myös laitteistosta riippumattomat olosuh-teet ja työskentelytavat.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa sahakone osaksi asiakkaan komposiittitankojen valmistusprosessia. Työssä opinnäytetyöntekijä vastasi rakennettavan koneen sähkö- ja automaatiolaitteistojen suunnittelusta sekä toteuttamisesta. Sahalaitteen suunnittelu piti sisällään käytettävien komponenttien valinnan sekä mitoituksen. Sahalaitteen komponenttien soveltuvuuden arviointi tehtiin teoreettisten laskelmien ja esiselvityksen kautta. Keskeisiä komponenttivalintoja olivat esimerkiksi sahakoneen terämoottorien mitoitus, teräakselien liikkeenohjauksien valinta sekä sahakoneen pääohjauskomponentin valinta. Komponenttivalintojen onnistuminen todettiin koneen tehdastestauksessa koneen toimintojen oikeanlaisena toimintana. Esimerkiksi sahakoneen terämoottorien mitoituksen onnistuminen todettiin käytännössä teräakselien riittävänä kiihtyvyytenä.

Sahakoneeseen toteutettiin PLC-ohjelma Omronin Sysmac Studiolla. Ohjelmaan luotiin sahakoneen automaattinen sahaussekvenssi, joka ohjasi konetta automaattitilassa. Sahaussekvenssiin luotiin säätöalgoritmi, joka sääti koneen sahauksen toimintaa tuotantolinjanopeuden mukaan. Näin saatiin tuotannosta sujuvaa ja vältettiin ylimääräisiä häiriötilanteita. Koneen ohjaamiseen valittiin käyttöliittymä, johon luotiin erilaisia toiminnallisuuksia koneen ohjaamiseen. Käyttöliittymästä säädettiin koneen asetuksia sekä toimintatilaa. Koneen ohjelmointi ja konfigurointi vaati tutustumista Omronin PLC- sekä käyttöliittymän ohjelmointisovelluksiin.

Sahakoneeseen kehitettiin mittausjärjestelmä, jolla mitattiin sahattujen komposiittitankojen pituutta. Mittausantureiksi valittiin mekaaniset lineaaripotentiometrit, joilla mitattiin komposiittitankojen päiden etäisyys sahakoneen perälevystä. Mittanturien signaalin siirrossa päätettiin käyttää Differential-tyyppistä virtasignaalia, jotta mittalaitteistosta saatiin häiriökestävä ja luotettava. Toteutetusta mittalaitteistosta saatiin riittävän tarkka komposiittitankojen pituusvalvontaan. Mittalaitteisto pystyi erottamaan liian lyhyet tuotteet suuressakin tuotantonopeudessa.

Työ oli kokonaisuudessaan erittäin mielenkiintoinen sekä haastava. Työ sisälsi teoreettista työtä, tuotekehitystä, ohjelmointia sekä fyysistä sähkötyötä. Työ oli laaja, ja siinä pääsi osallistumaan koneenrakennusprojektiin koneen esisuunnittelusta asiakkaalle toimittamiseen asti. Erittäin mielenkiintoisen projektista teki se, että siinä kehitettiin täysin uudenlainen mittausjärjestelmä sekä säätöalgoritmi tuotantoprosessia tehostamaan. Työssä palkitsi se, että teoreettisesti ja laskennallisesti suunnitellut ratkaisut toimivat myös käytännössä.

Haastavaa työssä oli uusien järjestelmien kehittäminen sekä aikataulu. Esimerkiksi pituusvalvontalaitteiston toimivuudesta ei ollut täyttä varmuutta ennen tehdastestausta. Laitteiden ja komponenttien saatavuus oli myös ongelma, joka osaltaan vaikutti suunnitteluratkaisuihin. Erityisesti koneautomaatio-ohjaimen IO-korttien saatavuudessa oli haasteita, mikä vaikutti laitteistovalintoihin.

Opinnäytetyön aikana opin erikoiskoneiden rakennusprojekteista sekä työskentelystä osana projektiorganisaatiota. Pääsin kehittämään omia ohjelmointi- ja suunnittelutaitojani projektin aikana. Ohjelmoinnissa kehitin osaamistani rakenteinen teksti -ohjelmointikielessä sekä erilaisten servoakselien ohjaamisessa. Sain laajennettua osaamistani erilaisista laitevalmistajista sekä niiden laitteiden ohjelmoinnista. Kehityin myös käyttöliittymäohjelmoinnissa sekä väyläteknikassa. Työn lopputuloksena saatiin toimiva sahalaite osaksi asiakkaan tuotantoprosessia. Työn tavoitteet saavutettiin, ja työ oli kokonaisuudessaan onnistunut. Kuvassa 54 on esitetty työn lopputuloksena rakennettu sahakone edestäpäin.



KUVA 54. Sahakone kuvattuna edestäpäin.

Sahakoneen jatkokehitysehdotuksena olisi lisätä sahalaitteeseen hylättyjen kappaleiden lajitteluluukut, josta hylätyt kappaleet siirtyisivät hylättyjen kappaleiden tuotesiiloon. Tämä parantaisi prosessin tehokkuutta, kun koneen käyttäjän ei tarvitsisi enää käsin lajitella hylättyjä kappaleita hyväksytyjen joukosta. Kuvassa 55 on esitettyinä sahakone tuotantolinjan päästä katsottuna.



KUVA 55. Sahakone tuotantolinjan päästä kuvattuna.

LÄHTEET

ABB Industry Oy. 2020. Sähkökäytön mitoitus. Tekninen opas nro 7. Viitattu 11.11.2023. https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf

Airila, M. 1999. Mekatroniikka. 5. korjattu painos. Helsinki: Otatieto.

Ajo, R., Hakonen, S., Harju, H. & Järvi, J. 2001. Laatu automaatiassa. Viitattu 1.11.2023. <https://www.automatioseura.fi/site/assets/files/1426/laatuautomaatiassa.pdf>

Deans, M. 2021. CNC Milling Coordinate System Made Easy. Autodesk. Verkkosivu. Viitattu 24.6.2023. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/cnc-coordinate-system-made-easy/>

Hietalahti, L. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy.

Inkinen, P. & Tuohi, J. 2002. Momentti 1, Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

Inkinen, P., Tuohi, J. & Maninen, R. 2012. Momentti 2, Insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

Kauppila, J. 2019. EtherCAT – The Ethernet Fieldbus. Luento. 26.10.2022. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Mortenson, T. 2021. Introduction to Omron NX PLC and NJ PLC. Realpars. Verkkosivu. Viitattu 23.6.2023. <https://realpars.com/omron-nx-plc/>

ODVA. 2023. EtherNET/IP. Viitattu 17.5.2023. <https://www.odva.org/technology-standards/key-technologies/ethernet-ip/>

Omron Corporation, a. Basic Corporate Information. Viitattu 6.5.2023.
<https://www.omron.com/global/en/about/corporate/outline/>

Omron Corporation, b. Company info. Viitattu 6.5.2023. <https://industrial.omron.fi/fi/company-info>

Omron Corporation, c. Sysmac studio. Viitattu 15.5.2023.
https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/en/sysmac_studio_ver.1._automation_software_datasheet_en.pdf?v=16

Omron Corporation, d. NX1P series machine controller. Viitattu 3.6.2023.
https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/en/i179e_nx1p-series_machine_controller_datasheet_en.pdf?v=8

Omron Corporation, e. NB-Designer Operation Manual. Viitattu 14.5.2023.
https://assets.omron.eu/downloads/latest/manual/en/v106_nb-designer_software_operation_manual_en.pdf

Omron Corporation, f. 1S servo drive. Viitattu 14.5.2023. https://assets.omron.eu/downloads/latest/datasheet/en/i188e_r88d-1sn_-ect_1s-series_servo_drive_datasheet_en.pdf?v=14

Omron Corporation, g. Startup Guide for Multi-axis Setup and Tuning. Viitattu: 5.5.2023. https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v3/i827_1s_series_multi-axis_setup_and_tuning_getting_started_guide_en.pdf

Opkon. SLPS. Viitattu: 7.11.2023. <https://www.klinger.fi/wp-content/uploads/2016/09/Opkon-SLPS.pdf>

Pyramid Solutions. 2023. What is EtherNET/IP? Viitattu 6.8.2023. <https://pyramidsolutions.com/network-connectivity/blog-nc/what-is-ethernet-ip/>

Sen, S. 2014. Fieldbus and Networking in Process Automation. 1. painos. Boca Raton: CRC Press.

SFS-EN IEC 62061:2021. 2021. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvien ohjauksjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus. Helsinki: Suomen Standardiliitto SFS. Luettu 25.11.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/1089077.html.stx>

Siemens AG. 2019. Single Ended vs Differential Inputs. Viitattu 6.8.2023. <https://community.sw.siemens.com/s/article/single-ended-vs-differential-inputs>

SSG Sahala Oy, a. SSG Sahalan historia. Viitattu: 7.5.2023. <https://sahala.fi/historia/>

SSG Sahala Oy, b. SSG Sahalan toimipisteet. Viitattu: 7.5.2023. <https://sahala.fi/toimipisteet/>

Tarkka, P., Määttänen, K. & Hietalahti, L. 2002. Piirianalyysi 1. 1. painos. Helsinki: Edita.

Tarkkinen, H. 2022. Ylivirtasuojaus. Luento. 24.11.2022. Tampereen ammattikorkeakoulu.

LIITTEET

Liite 1. Oikosulkumoottorien mitoituksen MATLAB-koodi.

1 (4)

Sahaterän moottorin mitoitus

Akseli:

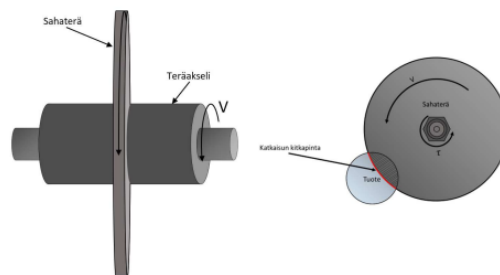
```
Akselinmassa = 5.6;
Akselinsade = 0.035;
Akselinhitausmomentti = 1/2*Akselinmassa*(Akselinsade)^2
```

```
Akselinhitausmomentti = 0.0034
```

Teräpaketti:

```
Teräpaketinmassa = 11;
Teräpaketinsade = 0.125;
Teräpaketinhitausmomentti = 1/2*Teräpaketinmassa*(Teräpaketinsade)^2
```

```
Teräpaketinhitausmomentti = 0.0859
```



Kokonaiskuorma teräkseliltä tarkasteltuna:

```
Loppunopeurpm = 4400;
Loppukulmanopeus = Loppunopeurpm*(2*pi/60)
```

```
Loppukulmanopeus = 460.7669
```

```
Kiihdytysaika = 4;
Kulmakiihtyvyyys = Loppukulmanopeus/Kiihdytysaika
```

```
Kulmakiihtyvyyys = 115.1917
```

```
Kuormanhitausmomentti = Akselinhitausmomentti+Teräpaketinhitausmomentti
```

```
Kuormanhitausmomentti = 0.0894
```

```
Dynaamisen_momentin_tarve_kuormalta_katsottuna = Kuormanhitausmomentti*Kulmakiihtyvyyys
```

```
Dynaamisen_momentin_tarve_kuormalta_katsottuna = 10.2944
```

Kokonaiskuorma moottorilta tarkasteltuna:

```
Valitys = 4/3;
Hyotysuhde = 0.95;
Dynaamisen_momentin_tarve_moottorilta_katsottuna = Valitys*1/Hyotysuhde*Dynaamisen_momentin_tarve_kuormalta_katsottuna
```

```
Dynaamisen_momentin_tarve_moottorilta_katsottuna = 14.4483
```

```
Kuormanhitausmomenttimoottoriltakatsottuna = (Valitys)^2*Kuormanhitausmomentti
```

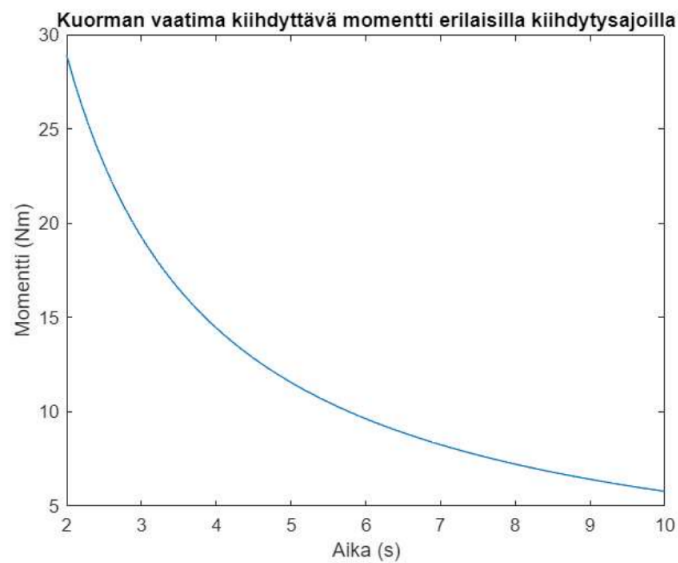
```
Kuormanhitausmomenttimoottoriltakatsottuna = 0.1589
```

Kuorman mallinnus:

```
Kiihdytysaikajana = 2:0.1:10;
dynaaminenmomentintarve=((Kuormanhitausmomentti*(2*pi/60)*(4400./Kiihdytysaikajana))*Valitys*1/Hyotysuhde;
figure
plot(Kiihdytysaikajana,dynaaminenmomentintarve)
```

```
title("Kuorman vaatima kiihdyttävä momentti erilaisilla kiihdytysajoilla")
ylabel("Momentti (Nm)")
xlabel("Aika (s)")
```

(jatkuu)



```
Kuorman_pysahtymis_aika = Kuormanhitausmomentti*(2*pi/60)*(4400)
```

```
Kuorman_pysahtymis_aika = 41.1776
```

Kiihdytysaika alle nimellinopeuden

```
Moottorin_nimellis_virta = 3.12;
Moottorinnimellismomentti = 4.94;
Moottorinhitausmomentti = 0.0017;
MoottorinMaxmomentinkerroin = 4.4;
Kiihdyttavamomentti=0.7*Moottorinnimellismomentti*MoottorinMaxmomentinkerroin
```

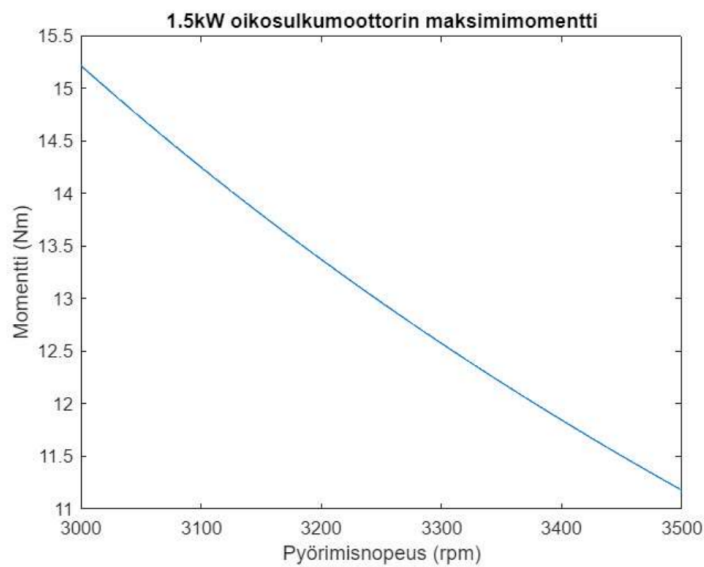
```
Kiihdyttavamomentti = 15.2152
```

```
Kiihdytysaikanimellis = ((Moottorinhitausmomentti+Kuormanhitausmomenttimoottoriltakatsottuna)*2*pi*(3000/60))/(Kiihdyttavamomentti)
```

```
Kiihdytysaikanimellis = 3.3155
```

Kiihdytysaika yli nimellinopeuden

```
Nimellinopeus = 3000;
Haluttunopeus = 3000:3500;
Kiihdyttavamomenttihalutussapisteessa=0.7*(Nimellinopeus*1./Haluttunopeus).^2*MoottorinMaxmomentinkerroin/1*Moottorinnimellismomentti
figure;
plot(Haluttunopeus,Kiihdyttavamomenttihalutussapisteessa)
title('1.5kW oikosulkumoottorin maksimimomentti')
xlabel('Pyörimisnopeus (rpm)')
ylabel('Momentti (Nm)')
```



```
Nimellisoopeus = 3000;
Haluttunopeus = 3500;
Kiihdyttava_momentti_halutussa_pisteessa=0.7*(Nimellisoopeus*1./Haluttunopeus).^2*MoottorinMaxmomentinkerroin/1*Moottorinnimellismome
```

```
Kiihdyttava_momentti_halutussa_pisteessa = 11.1785
```

```
kiihdyttava_momentti_keskimaarin = 1/3*(Kiihdyttavamomentti-Kiihdyttava_momentti_halutussa_pisteessa)+Kiihdyttava_momentti_halutussa_
```

```
kiihdyttava_momentti_keskimaarin = 12.5241
```

```
Kiihdytys_aika_yli_nimellis = ((Moottorinhitausmomentti+Kuormanhitausmomenttimoottoriltakatsottuna)*2*pi*(500/60))/((kiihdyttava_mome
```

```
Kiihdytys_aika_yli_nimellis = 0.6713
```

Kokonais kiihdytysaika:

```
Kokonais_kiihdytysaika = Kiihdytysaikanimellis+Kiihdytys_aika_yli_nimellis
```

```
Kokonais_kiihdytysaika = 3.9868
```

Taajuusmuuttajan mitoitus:

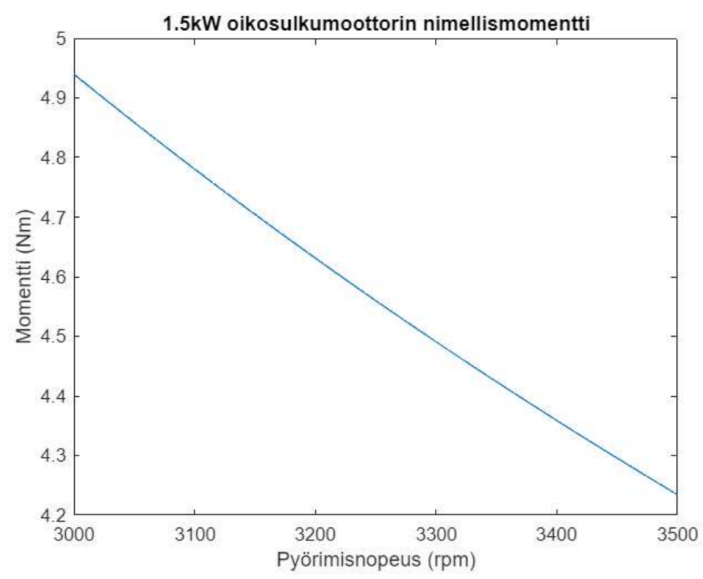
```
Taajuusmuuttajan_ominaisvirta = Moottorin_nimellis_virta
```

```
Taajuusmuuttajan_ominaisvirta = 3.1200
```

```
Taajuusmuuttajan_Maksimivirta = 0.7*Moottorin_nimellis_virta*MoottorinMaxmomentinkerroin
```

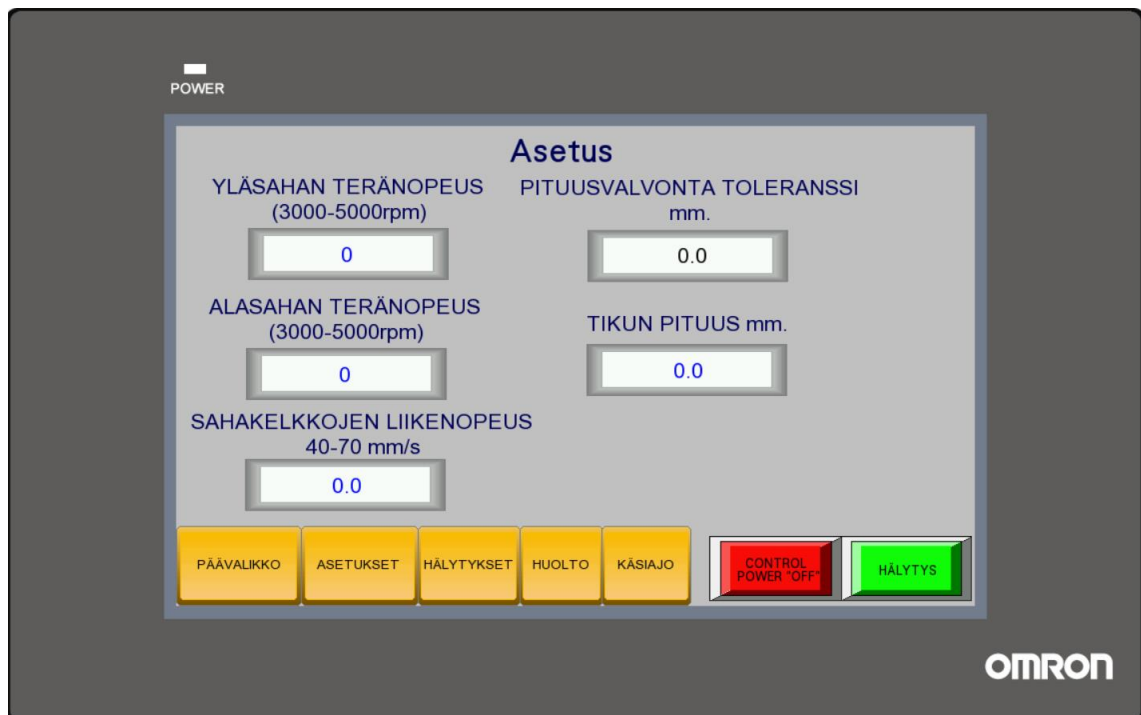
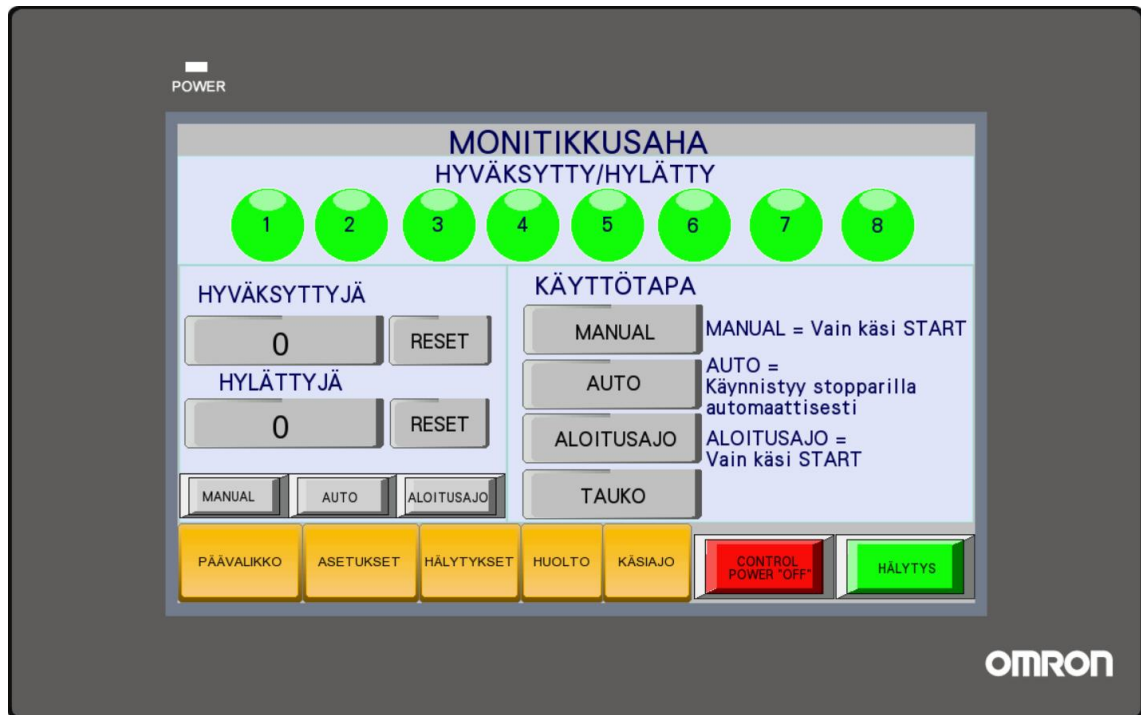
```
Taajuusmuuttajan_Maksimivirta = 9.6096
```

```
Nimellisoopeus = 3000;
Haluttunopeus = 3000:3500;
Kiihdyttavamomentti_halutussapisteessa=(Nimellisoopeus*1./Haluttunopeus)*Moottorinnimellismomentti;
figure;
plot(Haluttunopeus,Kiihdyttavamomentti_halutussapisteessa)
title('1.5kW oikosulkumoottorin nimellismomentti')
xlabel('Pyörimisnopeus (rpm)')
ylabel('Momentti (Nm)')
```



Liite 2. NB-Designer-näytöt.

1 (3)



(jatkuu)

