

Jere Karvinen

LAITTEEN DIGITAALINEN KAKSONEN

LAITTEEN DIGITAALINEN KAKSONEN

Jere Karvinen
Opinnäytetyö
Syksy 2024
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Koneautomaatio
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Jere Karvinen

Opinnäytetyön nimi: Laitteen digitaalinen kaksonen

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Digital Twin of a Machine

Työn ohjaajat: lehtori Juha Juntila, Oulun ammattikorkeakoulu, projektipäällikkö Timo Tanska, PLC-Automation Oy

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: syksy 2024

Sivumäärä: 48

Opinnäytetyö tehtiin Oulussa sijaitsevalle PLC-Automation Oy:lle. Opinnäytetyön aiheena oli laitteen digitaalinen kaksonen, joka luotiin osana asiakasprojektia oikeasta teollisuudessa toiminnassa olevasta laitteesta sen modernisoinnin yhteydessä. Tavoitteena oli saada aikaiseksi toimiva digitaalinen kaksonen, jota voidaan hyödyntää yrityksen markkinoinnissa sekä laitteen sovellusohjelman testauksessa ja optimoinnissa. Lisäksi tavoitteena oli saada opinnäytetyön avulla yritykseen arvokasta kokemusta digitaalisen kaksosen luomisesta ja siihen tarvittavista ohjelmistoista.

Työ aloitettiin tarvittavien ohjelmistojen asennuksella ja lisenssien hankkimisella sekä niiden käyttöön tutustumisella, minkä jälkeen siirryttiin luomaan digitaalista kaksosta. Lähtökohtana digitaalisen kaksosen luomiseen oli laitteesta tehty 3D-CAD-malli sekä laitteen vanha sovellusohjelma, joka käännettiin TIA Portalissa uuteen logiikkaohjaimen sopivaksi. Laitteen 3D-malli tuotiin Siemensin CAD-ohjelmistoon, jossa sille luotiin kinematiikka ja tarvittavat anturisignaalit. Laitteen kinemaattinen malli ja sovellusohjelma liitettiin yhteen SIMIT-ohjelmiston avulla, jossa myös toteutettiin toimilaitteiden toiminnan simulointi sekä suoritettiin digitaalisen kaksosen ohjaus laitteen oikean ohjauspaneelin pohjalta rakennetulla virtuaalisella ohjauspaneelilla.

Työn tuloksena saatiin aikaiseksi toimiva digitaalinen kaksonen, jonka kautta yritykseen saatiin runsaasti kokemusta digitaalisen kaksosen luomisesta ja sen hyödyistä yritykselle sovellusohjelmien testaamisen osalta sekä käyttömahdollisuuksista osana asiakasprojekteja. Osana yrityksen markkinointia digitaalista kaksosta käytiin esittelemässä messuilla, jossa digitaalinen kaksonen toimi yrityksen vetonaulana ja herätti paljon kiinnostusta.

Opinnäytetyön jälkeen taustalla toiminut laitteen modernisoinnin projekti jatkuu virtuaalisella käyttöönotolla sekä yleisellä digitaalisten kaksosten ja niiden hyötyjen esittelyllä asiakasyrityksen tiiloissa yhteistyössä Siemensin kanssa. Työstä saatua kokemusta pystytään jatkossa hyödyntämään, kun nähdään digitaalisen kaksosen tuovan etua uusissa automatisointiprojekteissa.

Asiasanat: automaatio, digitaalinen kaksonen, Siemens, SIMIT, virtuaalinen käyttöönotto

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Machine Automation

Author: Jere Karvinen

Title of thesis: Digital Twin of a Machine

Supervisors: Mr. Juha Junttila, Senior Lecturer, Oulu University of Applied Sciences, Mr. Timo Tan-ska, Project Manager, PLC-Automation Oy

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2024

Number of pages: 48

The thesis was commissioned by PLC-Automation Oy located in Oulu, Finland. PLC-Automation had an ongoing customer project regarding the modernization of a machine located in the customer's factory. The goal of the thesis was to create a functional digital twin of the machine that could then be utilized in testing and optimization of the device's user program and to provide the company with valuable experience in creating digital twins and the software needed to create them. The company also wanted to use the finished digital twin as a marketing asset. The work was done in cooperation with Siemens.

The work began with the installation of the necessary software and the acquisition of needed licenses as well as studying the usage of the software. After that, work on the digital twin began. The starting point for creating the digital twin was a 3D-CAD-model of the device as well as the old user program for the device, which was translated in TIA Portal to be compatible with the new S7-1500-series logic controller. The user program works as the automation model of the digital twin. The 3D-model of the device was then brought into NX Mechatronics Concept Designer, where the necessary kinematics and sensors were introduced to the CAD-model to create a kinematic model of the device. The kinematic and automation models of the device were then connected together by SIMIT-software, which was also used to simulate the behavior of the device's actuators. In addition, SIMIT was used to control the digital twin with a virtual control panel built inside the software on the basis of the real control panel of the device.

As a result of the work, a functional digital twin was created, through which the company gained valuable experience in creating digital twins and of their benefits in terms of virtual commissioning. As a part of the company's marketing, the digital twin was presented at a fair where the digital twin served as the main attraction and drew substantial interest. The experience gained from the work can be utilized in future if it is seen that a digital twin delivers an advantage in other automation projects.

After the thesis, the underlying project of modernizing the device continues with virtual commissioning phase. A general presentation of digital twins and their benefits to the end user will also be held on the premises of the customer company in cooperation with Siemens.

Keywords: automation, digital twin, Siemens, SIMIT, virtual commissioning

ALKULAUSE

Opinnäytetyön aihe oli mielenkiintoinen sekä kokonaisuudessaan sopivan haastava, niinpä haluankin ensiksi kiittää työnantajaani, ja opinnäytetyön toimeksiantajaa, PLC-Automation Oy:tä mahdollisuudesta suorittaa viimeinen harjoittelujakso ja työstää opinnäytetyötä kesän aikana, joka mahdollisti valmistumisen etuajassa. Kiitos kuuluu myös Siemensin yhteyshenkilölle Ville Torviselle yhteistyöstä ja avusta digitaalisen kaksosen luomisessa. Lisäksi iso kiitos Oulun Ammattikorkeakoulun lehtorille ja opinnäytetyön ohjaajalle Juha Junttilalle, jonka innoittamana päädyin suuntautumaan konetekniikan puolella logiikkaohjelmoinnin pariin, vaikka vielä opintojen alkuvaiheessa logiikkaohjelmoinnin parissa työskentely ei ollut ajatuksenani. Lopuksi haluan kiittää vaimoani, jonka tuella ja kannustuksella uudelleen kouluttautumaan lähteminen oli mahdollista.

Oulussa, 01.10.2024

Jere Karvinen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	10
2	DIGITAALINEN KAKSONEN JA SEN KÄYTTÖKOhteET	11
2.1	Historia ja määritelmä.....	12
2.2	Rakenne ja käsitteet.....	13
2.3	Virtuaalinen käyttöönotto.....	15
2.4	Operaattorien koulutus	16
2.5	Laitteen jatkokehitys.....	16
3	OHJELMISTOT JA NIIDEN KÄYTTÄMINEN.....	18
3.1	TIA Portal	19
3.2	HWCN Exporter.....	19
3.3	S7-PLCSIM Advanced.....	20
3.4	SIMIT Simulation platform	21
3.5	NX Mechatronics Concept Designer.....	23
4	SIMULOINTITAVAT	25
4.1	Software-in-the-Loop	25
4.2	Hardware-in-the-Loop	26
4.3	Model-in-the-Loop	26
5	SIMIT-OHJELMISTON KÄYTTÄMINEN	27
5.1	Couplings	28
5.2	Charts.....	31
5.3	Makrot ja mallipiirit.....	33
5.4	Simuloinnin asetukset	35
5.5	Simulointi.....	36
6	DIGITAALINEN KAKSONEN ASIAKASPROJEKTIN YHTEYTEEN	39
6.1	Tavoitteet.....	39
6.2	Toteutus	39
6.3	Esimerkki SIMIT-ohjauksesta	42
6.4	Haasteet.....	44
6.5	Lopputulos.....	45
7	YHTEENVETO	46
	LÄHTEET.....	47

SANASTO

CAD	Computer-aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAGR	Compound Annual Growth Rate, kertyvä vuotuinen kasvuprosentti
DTI	Digital Twin Instance, olemassa olevan tuotteen digitaalinen kakso- nen
DTP	Digital Twin Prototype, prototyyppinä toimiva digitaalinen kaksonen
HiL	Hardware-in-the-Loop, osittain fyysistä laitteistoa käyttävä simuloin- tiympäristö
HMI	Human Machine Interface, käyttöliittymä
IRT	Isochronous Real Time, samanaikainen reaaliaikajärjestelmä
MCD	Mechatronics Concept Designer, Siemensin tarjoama työkalu lait- teen kinemaattisen mallin tekemiseen
MiL	Model-in-the-Loop, simulointiympäristö ilman ohjelmoitavaa logiik- kaa
NASA	National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain liitto- hallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto
NX	Siemensin 3D-suunnitteluohjelmisto
PLC	Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikka
PLM	Product Lifecycle Management, tuotteen elinkaaren hallinta
ROI	Return on investment, sijoitetun pääoman tuotto-%
SiL	Software-in-the-Loop, täysin ohjelmallisesti toteutettu simulointiympä- ristö
SIMIT	Siemensin simulointiohjelmisto toimilaitteiden simulointiin

SiePortal	Siemensin tuote-, järjestelmä- ja palveluvalikoiman portaali
Solidworks	Dassault Systèmesin kehittämä 3D-suunnitteluohjelmisto
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol, usean internet-liikennöinnissä käytettävän tietoliikenneprotokollan yhdistelmä
Teollisuus 4.0	Neljäs teollinen vallankumous, jonka keskiössä on digitalisaatio
TIAPortal	Totally Integrated Automation Portal, Siemensin automaation suunnitteluohjelmisto
TwinCAT	The Windows Control and Automation Technology, Beckhoffin automaation suunnitteluohjelmisto
WinCC	Siemensin HMI-laitteiden konfigurointiin tarkoitettu työkalu.

1 JOHDANTO

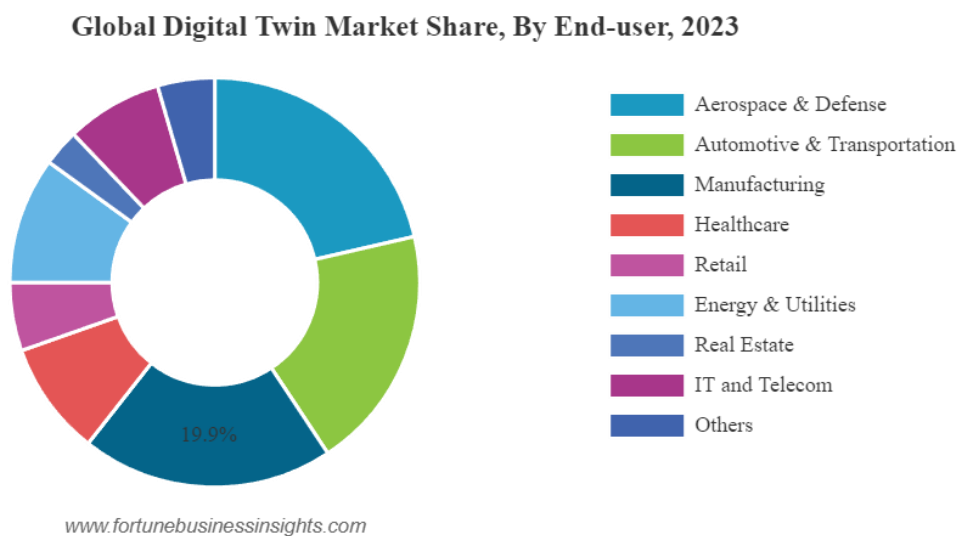
Kun neljäs teollinen vallankumous eli Teollisuus 4.0 muokkaa edelleen maailmaamme, on digitaalisten kaksosten hyödyntäminen ratkaisevan tärkeää yrityksille, jotta ne pysyisivät kilpailukykyisinä (Process Genius 2024, 36). PLC-Automation Oy haluaa olla mukana tässä kehityksessä ja siitä syystä opinnäytetyön lähtökohtana toimii yrityksen halu tarjota asiakkailleen digitaalinen kaksonen palveluna osaksi automaatiojärjestelmäprojekteja. Opinnäytetyötä varten tehdään asiakasprojektin yhteyteen laitteen digitaalinen kaksonen oikeasta teollisuudessa toiminnassa olevasta laitteesta sen modernisoinnin yhteydessä. Digitaalinen kaksonen toteutetaan yhteistyössä yhteistyökumppani Siemensin kanssa hyödyntäen Siemensin tarjoamia ohjelmistoja virtuaalisen käyttöönoton toteuttamiseen.

Opinnäytetyön tavoitteena on toteuttaa toimiva digitaalinen kaksonen asiakasprojektin yhteyteen, jonka avulla PLC-Automation Oy saa arvokasta kokemusta digitaalisen kaksosen luomisesta ja sen käytöstä laitteen sovellusohjelman optimoinnissa. Lisäksi toteutettua digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää yrityksen markkinoinnissa, jonka osana digitaalista kaksosta käydään esittelemässä messuilla. Työn aikana tavoitteena on lisäksi oppia käyttämään Siemensin ohjelmistoja, sillä jokainen opinnäytetyössä käytössä oleva ohjelmisto on opinnäytetyön tekijälle entuudestaan tuntematon. Opinnäytetyötä varten tutustutaan aiheesta saatavilla olevaan lähdemateriaaliin ja esitellään lähdemateriaalin sekä omien näkökulmien pohjalta, mitkä ovat laitteen digitaalisen kaksosen edut, mitkä ovat sen käyttömahdollisuudet niin toimittajan kuin loppuasiakkaan näkökulmasta sekä millä ohjelmistoilla digitaalinen kaksonen voidaan toteuttaa.

PLC-Automation on suomalainen vuonna 1987 perustettu teknologia-alan suunnittelu- ja palveluyritys, joka tuottaa asiakkailleen tehokkaita ja joustavia ratkaisuja projektoinnin, tuotannon ja ylläpidon tarpeisiin. Yrityksen ratkaisut vastaavat asiakkaiden tarpeisiin lattiatason sähkösuunnittelusta erilaisiin automaation sekä teollisuusnosturialan ratkaisuihin. Yrityksen palvelut kattavat konsultoinnin, suunnittelun, toteutuksen sekä ylläpidon. Yritys työllistää noin 30 automaatio-, sähköis- ja teollisuusnosturialan ammattilaista. Toimintaa yrityksellä on niin Suomessa kuin ulkomailla. (PLC-Automation 2024.)

2 DIGITAALINEN KAKSONEN JA SEN KÄYTTÖKOhteET

Digitaalinen kaksonen on fyysisestä laitteesta tai ympäristöstä tehty virtuaalinen malli. Vaikka sen määritelmä on selkeä, on termi kuitenkin epämääräinen ja sitä voidaan käyttää monilla eri tasoilla ja tarkoituksissa, sillä useimmilla digitaalisten kaksosten parissa työskentelevilläkin on aiheesta huomattavasti toisistaan poikkeavia näkemyksiä. Digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää vika-diagnostiikassa, uusien ohjelmistojen ja toimintojen kehityksessä, päivitys- ja huoltokohteiden suunnittelussa, käyttöön otossa sekä tuotteen elinkaaren hallinnassa. Digitaalisia kaksosia käytetään laajasti eri toimialoilla kuten teollisuudessa, autoteollisuudessa, rakentamisessa, terveydenhoitoalalla sekä ilmailu- ja puolustusteollisuudessa. (Ingalsuo, 2023; Fortune business insights 2024.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuitenkin tarkemmin digitaalisen kaksosen käyttöön teollisuudessa ja erityisesti yksittäisen laitteen digitaaliseen kaksoseen. Kuvassa 1 on havainnollistettu, millä eri toimialoilla digitaalista kaksosta hyödynnetään ja mikä on digitaalisen kaksosen markkinaosuus maailmanlaajuisesti kullakin toimialalla.

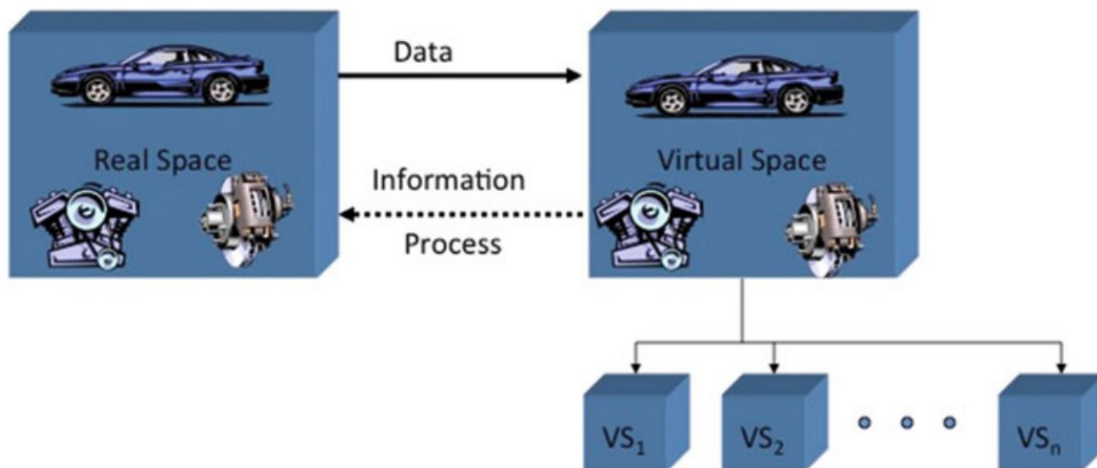


KUVA 1. Eri toimialojen osuus digitaalisen kaksosen markkinoilla maailmanlaajuisesti (Fortune business insights 2024)

Digitaalisten kaksosten markkina-arvon ennustetaan kasvavan vuoden 2024 noin 18 miljardista dollarista 260 miljardiin dollariin vuoteen 2032 mennessä, eli jopa 40 prosentin vuotuisella kasvuprosentilla (CAGR) (Fortune business insights 2024). Digitaalinen kaksonen on siis asiana ajan-kohtainen ja sen käyttö kansainvälisesti niin teollisuudessa kuin muillakin toimialoilla on tällä hetkellä jatkuvassa kasvussa.

2.1 Historia ja määritelmä

Ajatus digitaalisesta kaksosesta ilmaistiin ensimmäisen kerran vuonna 1991 David Gelernter'in julkaisussa *Mirror Worlds*. Tohtori Michael Grievesin on kuitenkin katsottu ensimmäisenä esitelleen digitaalisten kaksosten käsitettä Michiganin yliopistossa vuonna 2002. Esityksensä (kuva 2) oli nimeltään "Conceptual ideal for PLM" eli tuotteen elinkaaren konseptuaalinen ideaali, ja vaikka käytetty termi oli eri, löytyi siitä kaikki digitaalisen kaksosen elementit. Vuonna 2010 NASAn John Vickers esitteli uuden termin "digitaalinen kaksonen". Ydinajatus digitaalisen kaksosen käyttämisestä fyysisen kohteen tutkimisen välineenä voidaan kuitenkin ajatella saaneen alkunsa paljon näitä aikaisemmin. NASA oli monella tapaa edelläkävijä digitaalisen kaksosen teknologian käytössä 1960-luvun avaruustutkimustehtävissään, jolloin jokaisesta matkaan lähetetystä avaruussukkulasta oli maan pinnalla olemassa täydellinen kopio käytettäväksi tutkimus- ja simulaatiotarkoituksiin. (Grieves & Vickers 2017, 93; IBM 2022.)



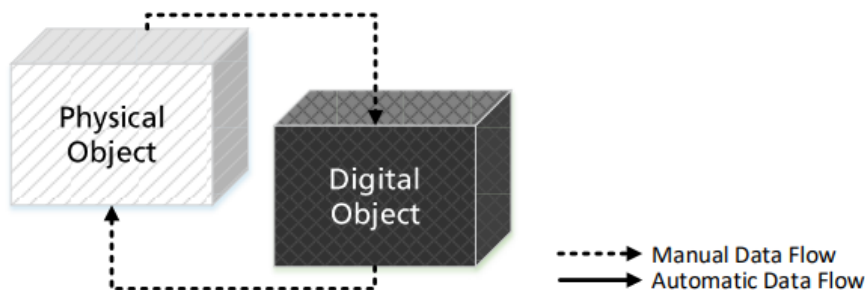
KUVA 2. Tuotteen elinkaaren konseptuaalinen idea. Tohtori Michael Grievesin esitysmateriaalista 3.12.2002 Lurie Engineering Centerissä Michiganin yliopistolla (Grieves & Vickers 2017, 93)

Vaikka digitaalisen kaksosen terminologia on muuttunut ajan myötä, on sen peruskonsepti pysynyt pääpiirteittäin samana vuodesta 2002 lähtien. Digitaalinen kaksonen on joukko virtuaalista tietoa, joka kuvaa täydellisesti suunniteltua tai olemassa olevaa valmistettua laitetta. Kaikkein optimaalimmillaan mikä tahansa valmistettua fyysistä laitetta tutkimalla saatava tieto on saatavilla myös sen digitaalisesta kaksosesta. (Grieves & Vickers 2017, 92, 94.)

2.2 Rakenne ja käsitteet

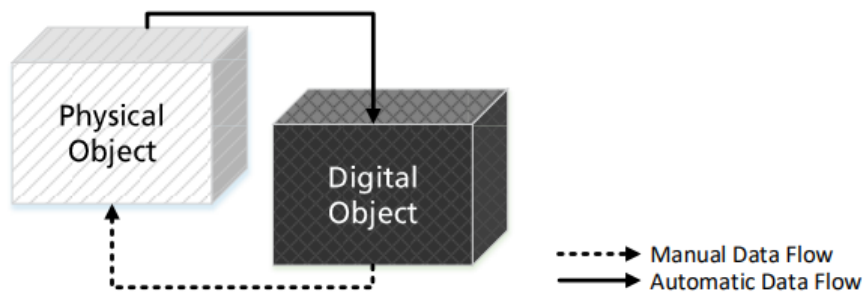
Laitteen digitaalisia kaksosia voidaan ajatella olevan kahta eri tyyppiä: Digital Twin Prototype (DTP) sekä Digital Twin Instance (DTI). DTP on prototyyppinä toimiva digitaalinen kaksonen, joka sisältää tarvittavat tiedot fyysisen laitteen valmistukseen virtuaalisen mallin pohjalta, joten sitä voidaan siis hyödyntää tuotteen kehittämiseen ja testaamiseen ennen fyysisen prototyypin ja edelleen valmiin laitteen valmistusta. DTI on digitaalinen kaksonen, joka on tehty olemassa olevan fyysisen laitteen kaksosiksi. Digitaalisen kaksosen käsitteiden välillä ilmenee eroavaisuuksia myös sen osalta, miten fyysinen tuote ja sen virtuaalinen malli kommunikoivat keskenään. Kommunikaatiomenetelmien mukaan digitaalinen kaksonen voidaan jakaa kolmeen eri malliin, jotka ovat digitaalinen malli, digitaalinen varjo sekä digitaalinen kaksonen. (Grieves & Vickers 2017, 94; Ingalsuo 2023.)

Digitaalinen malli (kuva 3) on suunnitellun tai olemassa olevan fyysisen tuotteen digitaalinen CAD-malli. Digitaalisessa mallissa ei ole ollenkaan automaattista datan siirtoa, vaan mallia päivitetään pääasiassa manuaalisesti. Muutoksella fyysisessä laitteessa ei siis ole vaikutusta digitaaliseen malliin eikä toisinpäin. Digitaalista mallia käytetään yleensä tuotteen suunnitteluvaiheessa, konseptien kehityksessä sekä visuaalisena apuvälineenä. (Henjes ym. 2018, 1017; Ingalsuo 2023.)



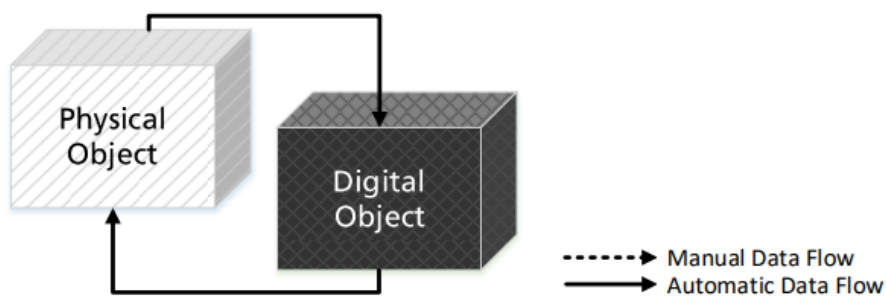
KUVA 3. Datan liikkuminen digitaalisessa mallissa (Henjes ym. 2018, 1017)

Jos olemassa olevan fyysisen laitteen ja digitaalisen mallin välillä esiintyy yksisuuntaista automatisoitua datan siirtoa, puhutaan digitaalisesta varjosta (kuva 4). Digitaalinen varjo on siis virtuaalinen malli, jota käytetään oikean laitteen rinnalla ja sen avulla voidaan tunnistaa poikkeamia laitteen odotetusta toiminnasta. Digitaalisessa varjossa fyysisen laitteen tilan muutos johtaa digitaalisen mallin tilanmuutokseen, mutta ei toisinpäin. Digitaalista varjoa käytetään pääasiallisesti laitteen käytöstä saatavan datan analysointiin, trendien tunnistamiseen sekä järjestelmän toiminnallisuuden ymmärtämiseen. (Henjes ym. 2018, 1017; Ingalsuo 2023; Siemens 2024a, 6.)



KUVA 4. Datan liikkuminen digitaalisessa varjossa (Henjes ym. 2018, 1017)

Digitaalinen kaksonen (kuva 5) vastaa toiminnallisuuksiltaan täysin fyysistä tuotetta ja datan siirto tapahtuu edellisistä poiketen automatisoidusti molempiin suuntiin mikä tarkoittaa, että digitaalisella kaksosella on myös mahdollista ohjata fyysistä tuotetta. Digitaalisen kaksosen pääasialliset käyttökohteet ovat tuotteen reaaliaikainen seuranta, ohjaus, päivitys, analysointi sekä suorituskyvyn ja toimintojen optimointi. (Henjes ym. 2018, 1017; Ingalsuo 2023.)



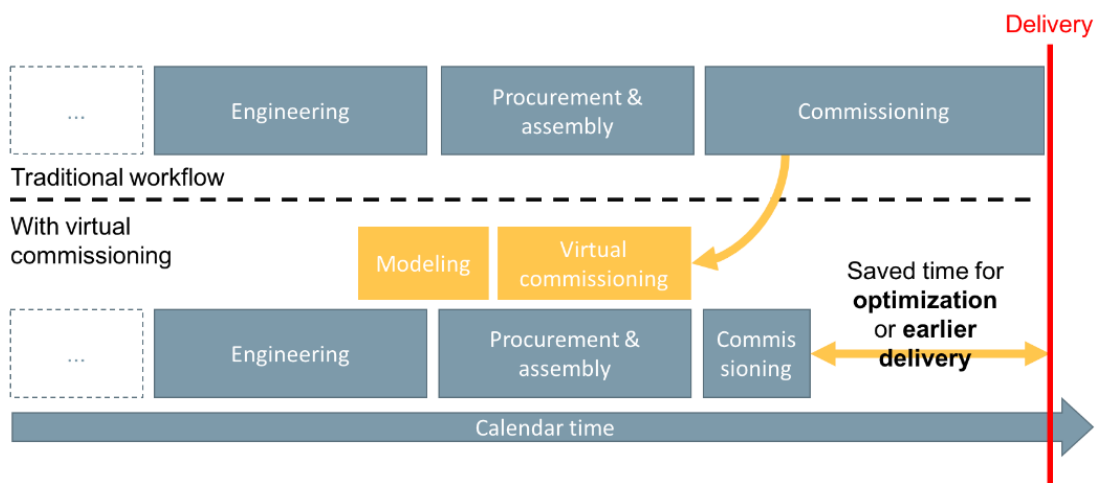
KUVA 5. Datan liikkuminen digitaalisessa kaksosessa (Henjes ym. 2018, 1017)

Opinnäytetyön käytännön osuuden digitaalinen kaksonen on DTI, eli se on tehty olemassa olevan laitteen kaksoseksi. Kommunikaatiomenetelmien mukaan opinnäytetyön digitaalinen kaksonen voidaan taas määritellä olevan digitaalinen malli, sillä siinä ei ole ollenkaan automaattista datansiirtoa.

2.3 Virtuaalinen käyttöönotto

Laitteen tai linjaston käyttöönotto tapahtuu yleisesti vasta sen kokoamisen jälkeen ja siihen voi kulua jopa 25 prosenttia projektin kokonaisajasta. Tätä aikaa voidaan lyhentää suorittamalla käyttöönoton prosesseja jo suunnitteluvaiheessa, jolloin mahdolliset virheet voidaan ratkaista kustannustehokkaasti ja ilman varsinaisen käyttöönoton aikaherkkyttä. Lisäksi ongelmien ratkaiseminen laitteen käyttöönottovaiheessa on yleensä kallista, sillä silloin voidaan joutua tilamaan uusia osia, joiden asennuksesta tulee herkästi kalliita ylityötunteja. Ratkaisemalla virheitä ja ongelmia jo suunnitteluvaiheessa voidaan näiltä kalliilta kustannuksilta välttyä. (Siemens 2024a, 6; Visual components 2024.)

Visual Componentsin suorittama tutkimus havainnollistaa, kuinka virtuaalisen käyttöönoton avulla voidaan parantaa tuotteen laatua ja saavuttaa merkittäviä säästöjä projektiin kuluvassa ajassa. Tutkimuksessa käytettiin pientä PLC (Programmable Logic Controller) -ohjattua järjestelmää, jossa oli 17 anturia ja 10 toimilaitetta. Tutkimus osoitti, että virtuaalinen käyttöönotto paransi laatua 37–84 prosenttia ja samanaikaisesti vähensi käyttöönottoon kuluvaa aikaa 75 sekä projektin kokonaisaikaa 15 prosenttia. (Visual components 2016.) Kuva 6 havainnollistaa tutkimuksesta saatuja tuloksia. Tutkittu järjestelmä on laajuudeltaan pääosin samansuuruinen kuin opinnäytetyössä laitteesta tuotettava digitaalinen kaksonen, joten sillä voidaan ajatella päästävän samankaltaisiin säästöihin käyttöönottoon kuluvassa ajassa.



KUVA 6. Projekti virtuaalisella käyttöönotolla ja ilman (Visual Components 2016)

Digitaalisen kaksosen avulla laitteen tai linjaston yksittäisten komponenttien keskinäisiä vuorovaikutuksia voidaan simuloida ja optimoida virtuaalisessa ympäristössä jo ennen varsinaista käyttöönottoa. Virtuaalisen käyttöönoton avulla voidaan jo hyvin aikaisessa vaiheessa testata, toimiiko laite halutulla tavalla, mikä johtaa laadukkaampaan sovellusohjelmaan varsinaisen käyttöönoton alkaessa. Virtuaalinen käyttöönotto on siis varteenotettava vaihtoehto vähentämään kustannuksia, esiintyvien virheiden mahdollisuutta sekä tarvittavaa työmäärää varsinaisessa käyttöönotossa. Onnistuneen käyttöönoton jälkeen digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää operaattorien koulutuksessa sekä laitteen jatkokehityksessä. (Siemens 2024a, 6; Siemens 2024b, 4.)

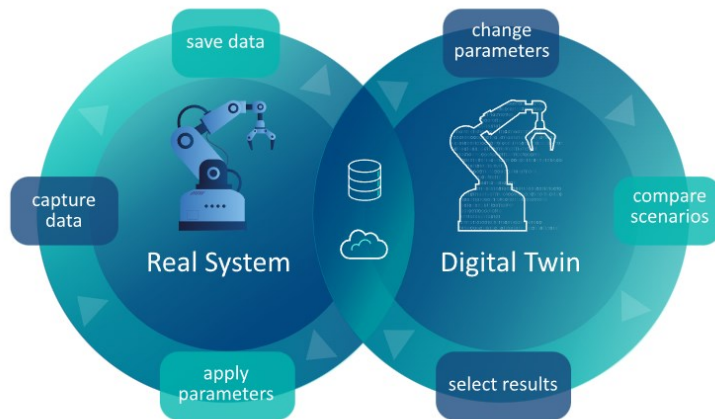
2.4 Operaattorien koulutus

Sijoitetun pääoman tuottoprosentin (ROI) maksimointi vaatii sen, että laite saadaan toimintakuntoon mahdollisimman nopeasti. Tärkeä osa tätä on insinöörien, huollon ja operaattorien koulutus. Digitaalinen kaksonen antaa muun muassa operaattorille mahdollisuuden harjoitella laitteen käyttöä virtuaalisesti, kunnes hänellä on tarvittavat taidot ja itseluottamus siirtyä käyttämään oikeaa laitetta. Digitaalisen kaksosen käyttäminen operaattorin koulutuksessa nopeuttaa oppimisprosessia sekä minimoi oikean laitteen vahingoittumisen riskiä. Tavallisesti koulutus laitteen käyttöön tapahtuu käyttöönoton jälkeen, mutta virtuaalisen käyttöönoton tapauksessa koulutus voidaan aloittaa jo aikaisemmin. Vaikka koulutusta tarvitaan aina myös fyysisellä laitteella käyttöönoton jälkeen, on koulutus tässä vaiheessa jo pitkällä, eikä näin ollen fyysisellä laitteella käytävään koulutukseen kulu aikaa niin paljon kuin normaalisti, mikä mahdollistaa tuotannon nopeamman käynnistämisen. Myöhemmin digitaalista kaksosta voidaan käyttää uusien operaattorien koulutukseen ilman, että laitetta ja tuotantoa tarvitsee pysäyttää. (Goossens 2016, 3; Visual components 2024.)

2.5 Laitteen jatkokehitys

Sen lisäksi, että digitaalisen kaksosen avulla voidaan testata ja optimoida laitteen tai järjestelmän toimintaa jo virtuaalisen käyttöönoton aikana, voidaan tätä optimointia ja testausta suorittaa myös käyttöönoton jälkeen tuotannossa olevalle laitteelle. Siinä tapauksessa, että halutaan optimoida laitteen toimintaa esimerkiksi kehittämällä sovellusohjelmaa edelleen, voidaan halutut muutokset ja niiden toiminta testata digitaalisessa kaksosessa ennen kuin muutos tuodaan oikeaan laitteeseen. Tämän lisäksi oikeaan laitteeseen tai järjestelmään reaaliajassa yhteydessä olevan digitaalisen kaksosen avulla voidaan lukea suoraan tietoa laitteen toiminnasta sen ollessa käytössä.

(GBTEC Software 2024.) Kuvassa 7 on havainnollistettuna digitaalisen kaksosen käyttäminen laitteen tai prosessin optimoinnissa.



KUVA 7. Havainnekuva digitaalisen kaksosen käytöstä laitteen tai prosessin optimoinnissa (GBTEC Software 2024)

Laitteesta saadun tiedon avulla pystytään siis tarkastelemaan laitteen toimintaa ja tämän tiedon pohjalta voidaan sovellusohjelmaa muuttaa niin, että laitteen toiminta saadaan optimoitua halutunlaiseksi. Digitaalisen kaksosen avulla on siis mahdollista kokeilla erilaisia vaihtoehtoja laitteen toiminnan optimointiin ja parhaan ratkaisun löytyessä muutos lisätään laitteeseen.

3 OHJELMISTOT JA NIIDEN KÄYTTÄMINEN

Digitaalisten kaksosten suosion kasvaessa ovat monet suuret yritykset lähteneet mukaan vaikuttamaan tähän kasvavaan markkinaan tarjoamalla monipuolisia ratkaisuja niiden luomiseen. Yksi näistä yrityksistä on Siemens. Muihin suuriin yrityksiin lukeutuvat muun muassa General Electric, Microsoft, IBM, ABB sekä Honeywell. (Wazarat 2023.) Koska PLC-Automation on Siemensin yhteistyökumppani, käytettiin opinnäytetyössä digitaalisen kaksosen luomiseen sekä virtuaalisen käyttöönoton toteuttamiseen tarjolla olevia Siemensin ohjelmistoja. Siemens tarjoaa kattavan valikoiman ohjelmistoja, joista voidaan valita sopivat käyttötarkoituksen mukaan. Kuvassa 8 on esitettyä Siemensin valikoimista löytyviä ohjelmistoja erilaisiin käyttötarkoituksiin. Automaatiotasolle voidaan PLCSIM Advacedin sekä WinCC:n lisäksi laskea TIA Portal.

Simuloinnin eri tasot

Tehdas / tuotantolinja		Tecnomatix Plant Simulation	
Robottisolu		Tecnomatix Process Simulate	
Tuotantokone / -linja		NX Mechatronic Concept Designer	
Komponentin fysiikka		Simcenter Amesim	
Komponentit & Toimilaitetaso		SIMIT	
Automaatio		PLCSIM Advanced and WinCC	

KUVA 8. Siemensin ohjelmistot simuloinnin eri tasoille (Metsälä ja Torvinen 2021, 16)

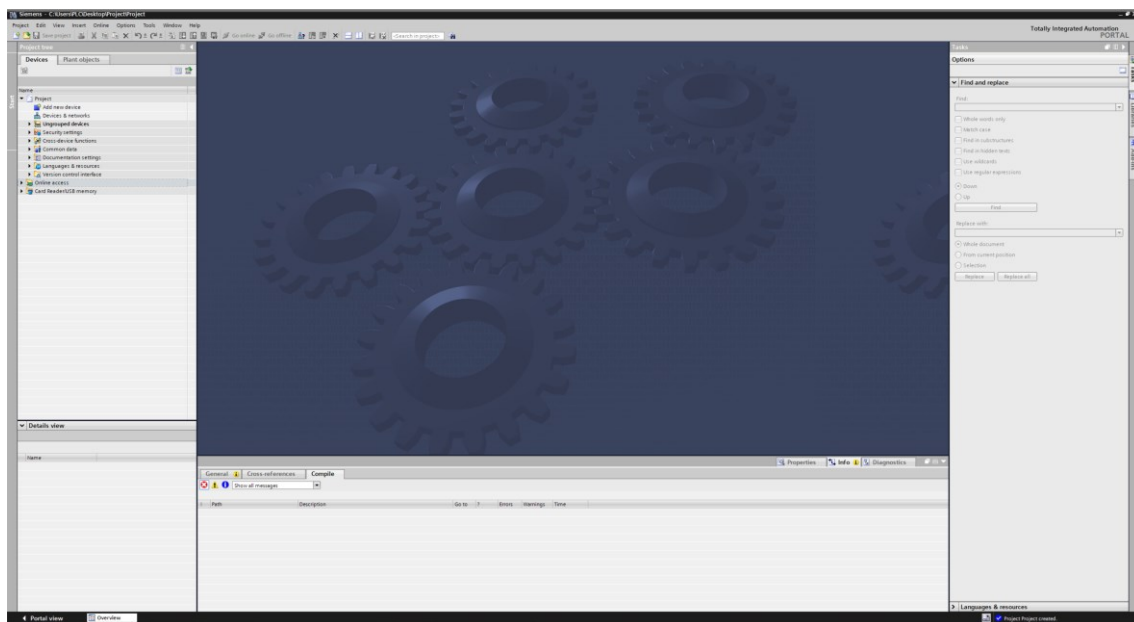
Opinnäytetyössä käytetyt ohjelmistot olivat Tia Portal, PLCSIM Advanced, SIMIT Simulation platform sekä NX Mechatronics Concept Designer. Opinnäytetyön digitaalisessa kaksosessa TIA Portal sekä PLCSIM Advanced muodostavat laitteen automaatiomallin, SIMIT Simulation Platform muodostaa laitteen toimilaitteiden käyttäytymismallin ja NX Mechatronics Concept Designer laitteen mekaanisen sekä kinemaattisen mallin. Edellä mainittujen ohjelmistojen lisäksi hyödynnettiin HWCN Exporter -ohjelmaa. Kuvassa 9 on esitetty opinnäytetyössä käytetty digitaalisen kaksosen simulointikonfiguraatio ja siihen tarvittavat ohjelmistot Siemensin valikoimasta.



KUVA 9. Opinnäytetyössä käytössä ollut simulointikonfiguraatio ja siihen tarvittavat ohjelmistot (Metsälä ja Torvinen 2021, 18)

3.1 TIA Portal

TIA Portal eli Totally Integrated Automation Portal on Siemensin ohjelmointiympäristö, jonka avulla voidaan suorittaa muun muassa PLC-, HMI- ja liikkeenohjaussuunnittelua. Opinnäytetyössä käytettiin TIA Portalin versiota 18. Laitteen modernisoinnin yhteydessä vanha S5-logiikalle tehty laitteen sovellusohjelma käännettiin TIA Portalissa uudeksi S7-1500-sarjan logiikkaan sopivaksi sovellusohjelmaksi. Tämän lisäksi TIA Portal -projektin liittämiseen SIMITiin hyödynnettiin HWCN Exporter -ohjelmaa. Kuvassa 10 on esitetty ohjelman käyttöliittymä.

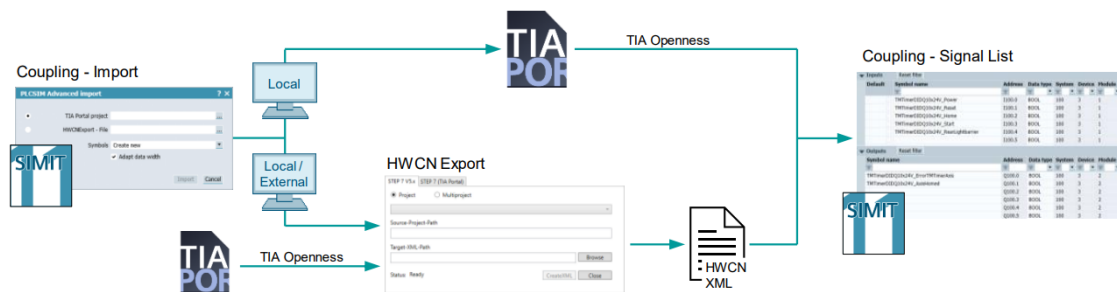


KUVA 10. TIA Portal

3.2 HWCN Exporter

HWCN Exporter -ohjelma on SIMITin mukana tuleva työkalu. Ohjelman käyttämiseen ei kuitenkaan vaadita SIMIT-lisenssiä, joten sitä on mahdollista käyttää myös tietokoneella, jolle ei ole asennettu

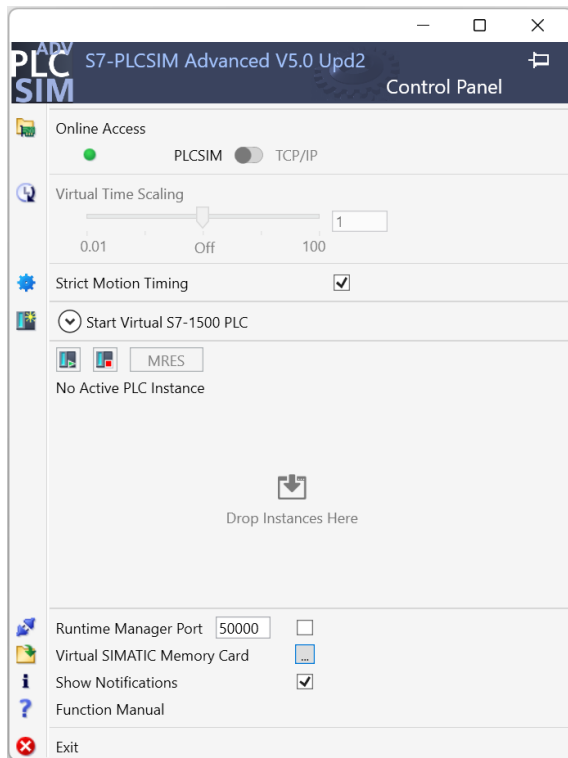
SIMITiä. Ohjelmalla voidaan luoda xml-muotoinen HWCN export -tiedosto TIA Portal -projektista. S7-PLCSIM-liityntä SIMIT-ohjelmistossa antaa mahdollisuuden tuoda projektin laitteisto konfiguraation joko suoraan TIA Portalista tai HWCN export -tiedoston avulla. Jos TIA Portal ei ole asennettuna samalle koneelle kuin SIMIT, on projektin tuominen mahdollista ainoastaan HWCN export -tiedoston avulla. Käytettäessä PLCSIM Advancediä saadaan ohjelman avulla tuotua myös TIA Portal -projektin muuttujataulukot suoraan SIMITiin, eikä niitä siten tarvitse tuoda erikseen. (Siemens 2023, 64-65; Siemens 2024a, 13.) Vaikka opinnäytetyön digitaalisen kaksosen tapauksessa kaikki ohjelmat olivat käytössä samalla koneella, hyödynnettiin HWCN Exporteria juuri siitä syystä, ettei muuttujataulukoita tarvinnut tuoda erikseen. Kuvassa 11 on havainnollistettuna TIA Portal -projektin vienti SIMIT-ohjelmistoon hyödyntämällä HWCN Exporteria.



KUVA 11. TIA Portal projektin vienti SIMIT-ohjelmistoon HWCN Export -ohjelman avulla (Siemens 2024a, 13)

3.3 S7-PLCSIM Advanced

S7-PLCSIM Advancediä käytetään simuloimaan ohjelmoitavien logiikoiden toiminnallisuuksia ilman, että tarvitaan vastaavaa fyysistä ohjelmoitavaa logiikkaa. Ohjelmistoon soveltuvia ohjelmoitavia logiikkoja ovat S7-1500- ja ET200-sarjan logiikat. (Siemens 2022, 18–19.) Opinnäytetyössä käytettiin S7-PLCSIM Advancedin versiota 5.0. Kuvassa 12 on näkyvissä PLCSIM Advancedin käyttöliittymä.

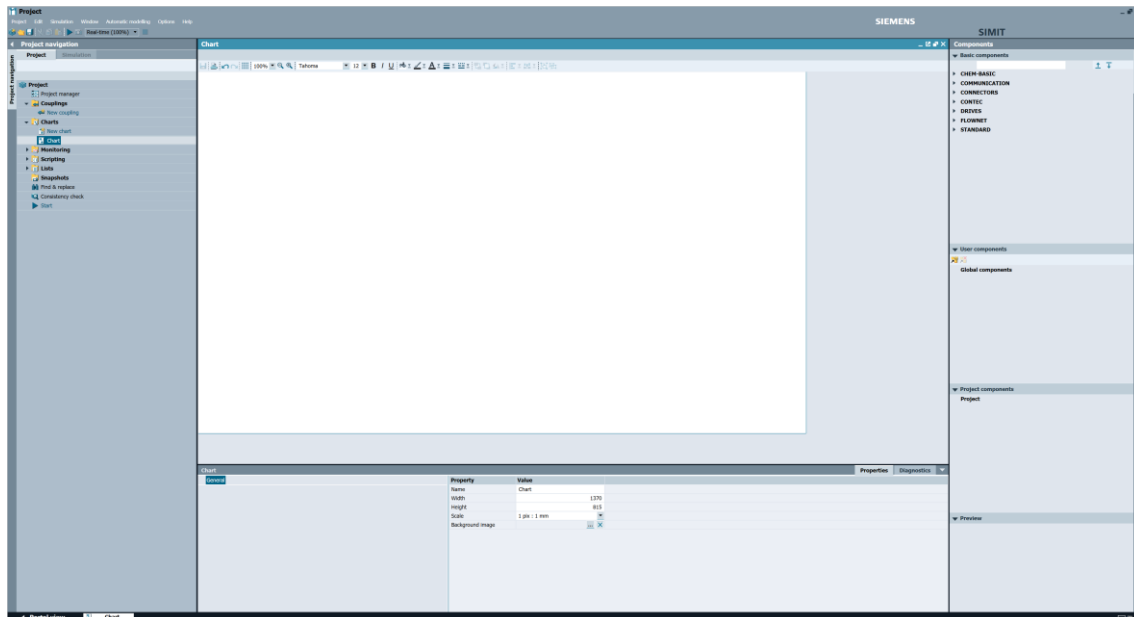


KUVA 12. S7-PLCSIM Advanced V5.0 käyttöliittymä

TIA Portal -projektista voidaan ladata ohjelmat ja laitekonfiguraatio PLCSIM Advancedillä simuloitavana logiikkaan. Ladatut tiedot tallentuvat virtuaaliselle SIMATIC-muistikortille, jonka ansiosta virtuaalisen logiikan uudelleenkäynnistys myöhemmin on mahdollista ilman uutta ohjelman latausta, kuten oikealla logiikallakin. Yhteys simuloituun logiikkaan luodaan joko TCP/IP-yhteydellä tai paikallisella yhteydellä. (Siemens 2022, 57–67; Siemens 2024, 11.)

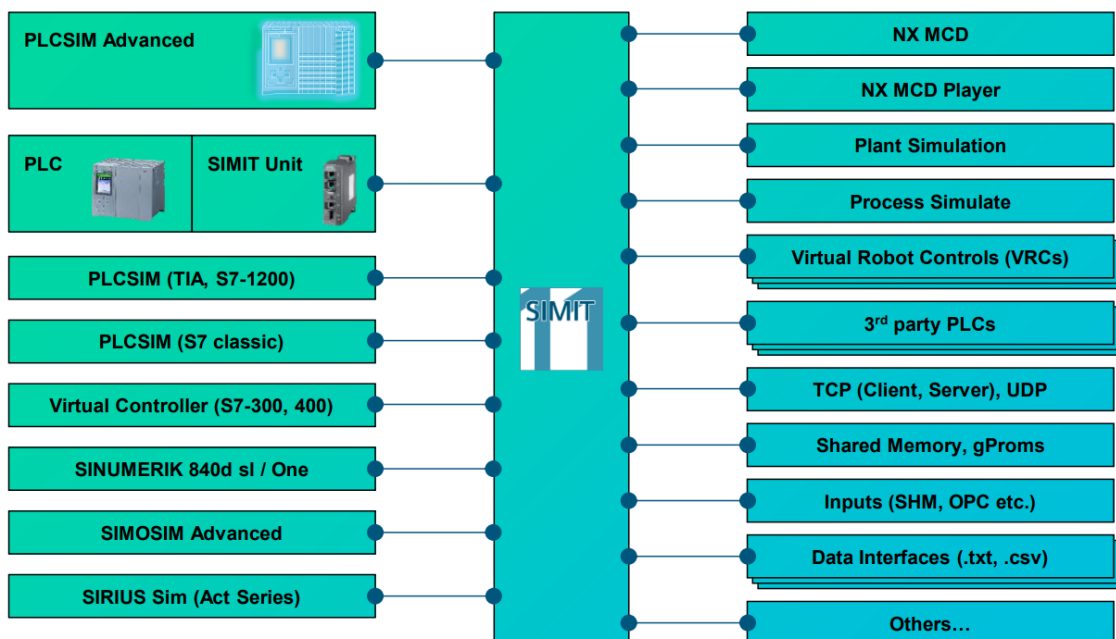
3.4 SIMIT Simulation platform

SIMIT-ohjelmistolla simuloidaan toimilaitteiden kuten venttiilien ja antureiden toimintaa ja käyttäytymistä, minkä lisäksi sen avulla voidaan myös simuloida virhetilanteita ja analysoida laitteen toimintaa. Virtuaalisen käyttöönoton yhteydessä SIMIT toimii eri ohjelmistojen kuten NX MCD:n ja S7-PLCSIM Advancedin välisenä kytkentäpisteenä. (Siemens 2024a, 12; Siemens 2024b, 6.) Opin näytetyössä käytettiin SIMIT simulation platformin versiota 11.1. Kuvassa 13 on esitetty ohjelman käyttöliittymä.



KUVA 13. SIMIT Simulation Platform

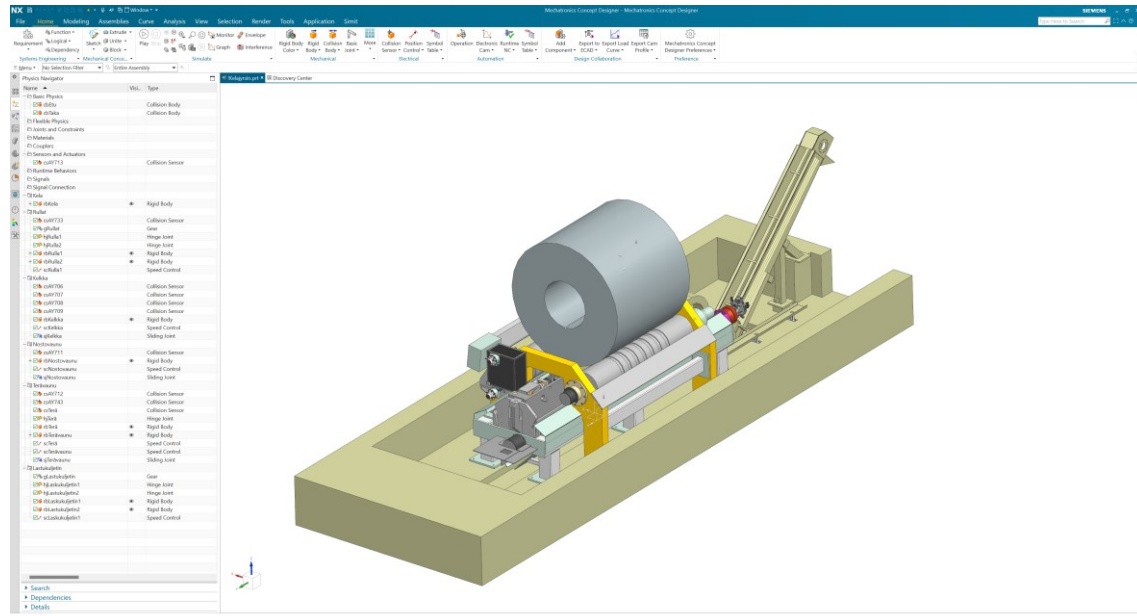
Opinnäytetyössä käytettyjen kytkentöjen lisäksi SIMIT on mahdollista kytkeä useisiin muihinkin ohjelmistoihin sekä oikeaan ohjelmoitavaan logiikkaan. Kuvassa 14 on esiteltynä ohjelmiston eri kytkentämahdollisuudet.



KUVA 14. SIMIT-ohjelmiston eri kytkentämahdollisuudet (Siemens 2024a, 12)























3.5 NX Mechatronics Concept Designer

NX on Siemensin 3D-suunnitteluohjelmisto, jonka sisällä toimivista sovelluksista yksi on MCD eli Mechatronics Concept Designer. Opinnäytetyössä käytettiin NX MCD:n versiota 2306. Kuvassa 15 on esitettyä ohjelman käyttöliittymä.



KUVA 15. NX Mechatronics Concept Designer

MCD:llä määritellään laitteesta tehtyyn CAD-malliin sen törmäyspinnat, fysiikka sekä mahdolliset anturit ja muut toimilaitteet. Tämän lisäksi voidaan simuloida ja testata laitteen mekaanisia komponentteja virtuaalisessa ympäristössä sekä määrittellä CAD-mallin kinematiikka vastaamaan oikean laitteen kinematiikkaa spesifioimalla eri mekaanisten osien vapausasteet. (Metsälä & Torvinen 2021, 21; Siemens 2024a, 19; Siemens 2024b, 6.) Kuvassa 16 on esiteltyä opinnäytetyön digitaaliseen kaksoseseen määriteltä laitteiden kinematiikkaa ja fysiikkaa, kuten törmäyspinnat, anturit sekä laitteen eri mekaanisten osien vapausasteet.

Physics Navigator			
Name ▲	Visi...	Type	
[-] Basic Physics			
<input checked="" type="checkbox"/>  cbEtu		Collision Body	
<input checked="" type="checkbox"/>  cbTaka		Collision Body	
[-] Flexible Physics			
[-] Joints and Constraints			
[-] Materials			
[-] Couplers			
[-] Sensors and Actuators			
<input checked="" type="checkbox"/>  csAY713		Collision Sensor	
[-] Runtime Behaviors			
[-] Signals			
[-] Signal Connection			
[-] Kela			
+ <input checked="" type="checkbox"/>  rbKela		Rigid Body	
[-] Rullat			
<input checked="" type="checkbox"/>  csAY733		Collision Sensor	
<input checked="" type="checkbox"/>  gRullat		Gear	
<input checked="" type="checkbox"/>  hjRulla1		Hinge Joint	
<input checked="" type="checkbox"/>  hjRulla2		Hinge Joint	
+ <input checked="" type="checkbox"/>  rbRulla1		Rigid Body	
+ <input checked="" type="checkbox"/>  rbRulla2		Rigid Body	
<input checked="" type="checkbox"/>  scRulla1		Speed Control	
[-] Kelkka			
<input checked="" type="checkbox"/>  csAY706		Collision Sensor	
<input checked="" type="checkbox"/>  csAY707		Collision Sensor	
<input checked="" type="checkbox"/>  csAY708		Collision Sensor	
<input checked="" type="checkbox"/>  csAY709		Collision Sensor	
<input checked="" type="checkbox"/>  rbKelkka		Rigid Body	
<input checked="" type="checkbox"/>  scKelkka		Speed Control	
<input checked="" type="checkbox"/>  sjKelkka		Sliding Joint	

KUVA 16. Mechatronics Concept Designerissa määritettyä laitteen fysiikkaa ja kinematiikkaa

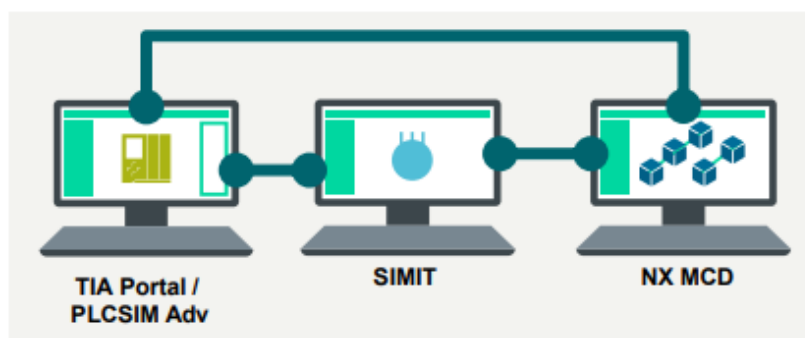
4 SIMULOINTITAVAT

Laitteen digitaalisen kaksosen simuloinnin kolme pääkomponenttia ovat automaatiomalli, käyttäytymismalli sekä kinemaattinen malli. Simulointikonfiguraatiosta riippuen simuloinnin komponentit voivat olla mukana täysin virtuaalisesti, jolloin puhutaan Software-in-the-Loop-simuloinnista (SiL) tai vaihtoehtoisesti osa näistä komponenteista voi olla simuloinnissa mukana myös fyysisesti, jolloin kyseessä on Hardware-in-the-Loop-simulointi (HiL). Käytännössä kaikkien komponenttien ei kuitenkaan tarvitse olla mukana simulointikonfiguraatiossa. Jos simuloinnista jätetään pois automaatiomalli, puhutaan siinä tapauksessa Model-in-the-Loop-simuloinnista (MiL). (Siemens 2024a, 4.) Tässä opinnäytetyössä hyödynnettiin Software-in-the-Loop-simulointia. Digitaalista kaksosta simuloitiin siis virtuaalista ohjelmoitavaa logiikkaa vasten. Kahta muuta simulointitapaa opinnäytetyössä ei hyödynnetty.

4.1 Software-in-the-Loop

Software-in-the-Loop-simuloinnilla tarkoitetaan täysin ohjelmallisesti toteutettua simulointia eli simulointi toteutetaan ilman fyysisiä komponentteja. (Siemens 2024a, 4.) Tätä simulointitapaa havainnollistaa Siemensin havainnekuva Software-in-the-Loop-simuloinnin toteutuksesta (kuva 17).

Software-in-the-Loop (SiL)

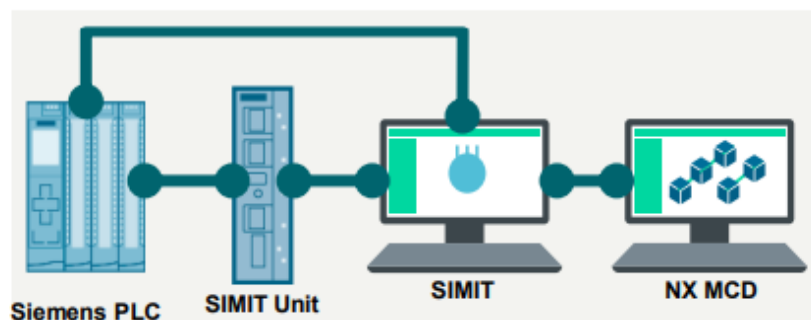


KUVA 17. Havainnekuva Software-in-the-Loop-simuloinnista (Siemens 2024a, 5)

4.2 Hardware-in-the-Loop

Hardware-in-the-Loop-simuloinnissa simulaatiomalliin yhdistetään oikea ohjelmoitava logiikka eli PLC. Joissain tapauksissa voi olla hyödyllistä yhdistää simulaatioon myös oikeita toimilaitteita simuloitujen toimilaitteiden lisäksi. (Siemens 2024a, 4.) Tätä simulointitapaa havainnollistaa Siemensin havainnekuva Hardware-in-the-Loop-simuloinnin toteutuksesta (kuva 18).

Hardware-in-the-Loop (HiL)

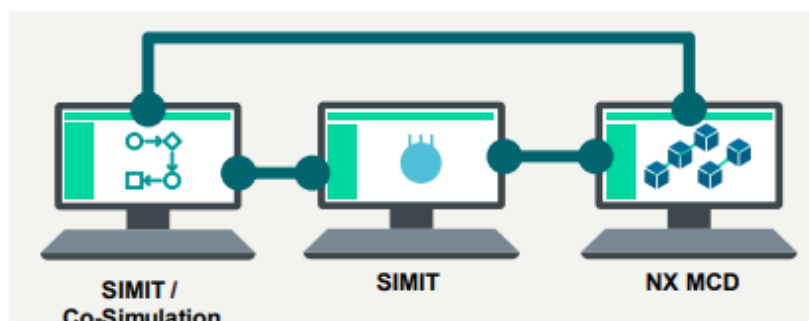


KUVA 18. Havainnekuva Hardware-in-the-Loop-simuloinnista (Siemens 2024a, 5)

4.3 Model-in-the-Loop

Model-in-the-Loop-simuloinnissa oikeaa tai virtuaalista ohjelmoitavaa logiikkaa ei sisällytetä simulointiin. Kyseistä simulointitapaa käytetään pääasiassa simulaatiomallin toiminnalliseen testaamiseen. (Siemens 2024a, 4.) Tätä simulointitapaa havainnollistaa Siemensin havainnekuva Model-in-the-Loop-simuloinnin toteutuksesta (kuva 19).

Model-in-the-Loop (MiL)

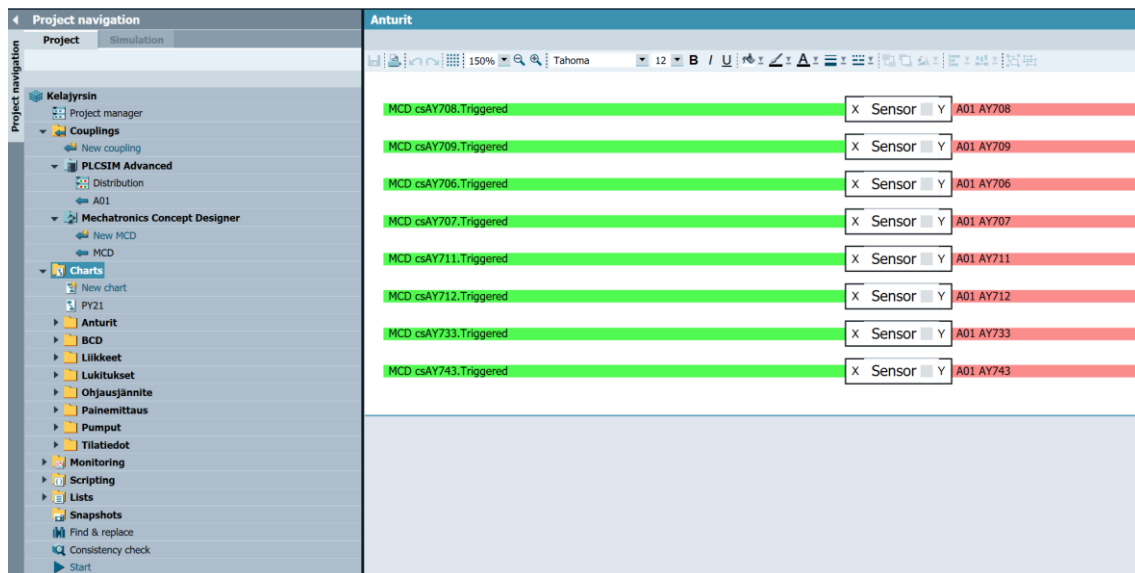


KUVA 19. Havainnekuva Model-in-the-Loop-simuloinnista (Siemens AG 2024a, 5)

5 SIMIT-OHJELMISTON KÄYTTÄMINEN

Opinnäytetyön toteutusosan pääohjelmistona toimi SIMIT Simulation Platform, jossa simuloitiin asiakasprojektin yhteyteen tehdyn digitaalisen kaksosen toimilaitteiden toimintaa. Tässä luvussa esitellään SIMIT-ohjelmistossa käytössä olevia työkaluja, kuinka ohjelmistoa käytetään sekä miten ohjelmistoa ja sen työkaluja hyödynnettiin opinnäytetyössä.

SIMIT-ohjelmistossa voidaan luoda muun muassa uusia kytkentöjä (Couplings) logiikkaohjaimeen tai muihin ohjelmistoihin sekä luoda simuloituja ohjauksia ohjelmakaavioihin (Charts). Kuvassa 20 on esillä ohjelmiston projektipuu sekä yksi esimerkki siitä, kuinka sovellusohjelman ja MCD-mallin tulo- ja lähtösignaalit kytkettiin toisiinsa opinnäytetyössä.

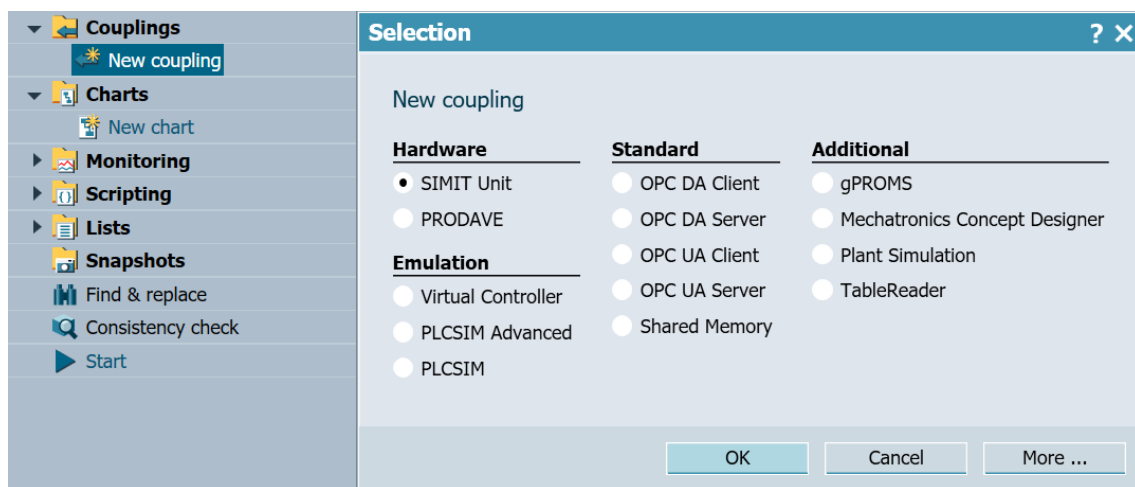


KUVA 20. SIMIT projektin projektipuu sekä esimerkki tulo- ja lähtösignaalien kytkennästä

Yllä olevan kuvan tapauksessa MCD-malliin simuloidut laitteen anturien signaalit on kytketty sovellusohjelman tulosignaaleihin, jotta tieto anturien kytkeytymisestä päälle ja pois kulkeutuu sovellusohjelmaan. Kuvassa esiintyviä antureita käytetään tunnistamaan muun muassa jyrsinvaunun asemaa sekä sitä, onko jyrstävää kela paikallaan.

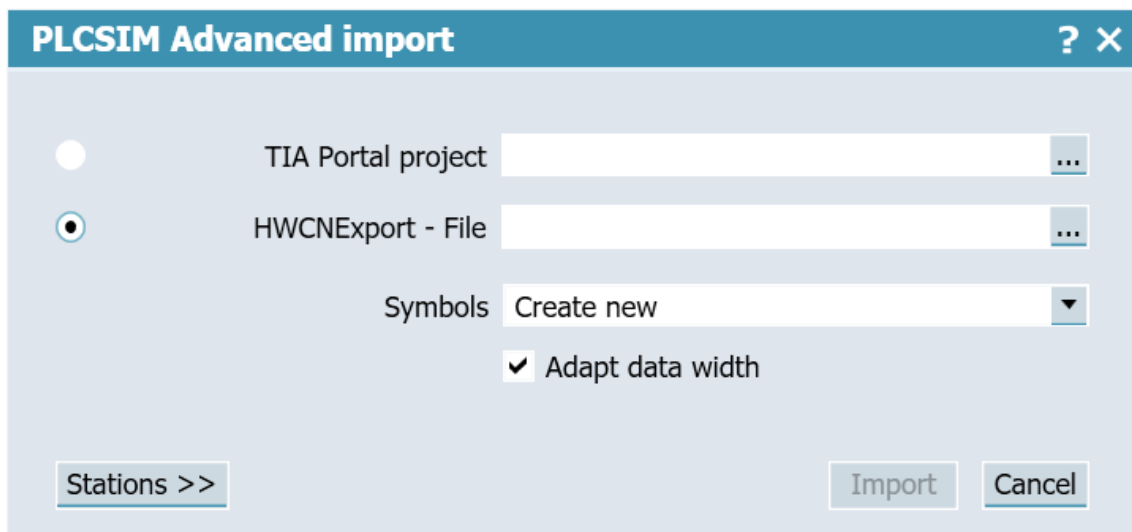
5.1 Couplings

Kohdassa Couplings eli kytkentä määritellään kytkennät SIMITin ja muiden simulointiin osallistuvien komponenttien välillä. Kytkentä on siis SIMITin sekä logiikkaohjaimen tai toisen ohjelman välinen liityntä. Kytkentätapoja on kolmea erityyppistä: kytkentä oikeaan logiikkaan, simuloituun logiikkaan tai toiseen ohjelmaan. (Siemens 2023, 57.) Uutta kytkentää luodessa valitaan ensin haluttu kytkentätapa (kuva 21), jonka jälkeen valitulle kytkennälle voidaan määrittää kaikki sen käytössä tarvittavat parametrit sekä signaalit.



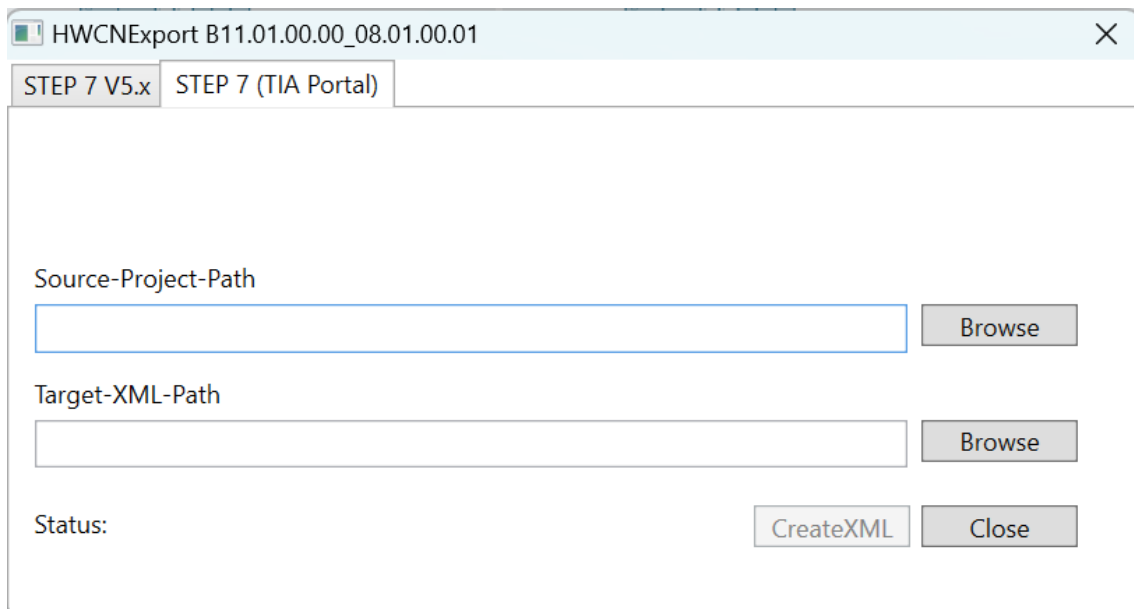
KUVA 21. Uuden kytkennän luominen

Kytettäessä TIA Portal -projektia SIMITiin simuloidun logiikan välityksellä valitaan kytkentätyypiksi PLCSIM Advanced, jonka jälkeen avautuvassa ikkunassa (kuva 22) valitaan kohta HWCNExport ja haetaan tähän projektista luotu HWCN export -tiedosto. Tämän avulla ohjelma luo kytkennän ja tuo kaikki TIA Portal -projektissa käytetyt muuttujat SIMITiin. Nimeksi tälle uudelle kytkennälle kannattaa yleisesti antaa PLC tai jokin muu kuvaava nimi. Jos TIA portal -projektista ei ole luotu HWCN export -tiedostoa, valitaan tässä ohjelmistoon kytkettävä TIA Portal -projekti, jonka jälkeen projektin muuttujataulukot tuodaan ohjelmistoon erikseen.



KUVA 22. TIA Portal -projektin liittäminen SIMITiin

Opinnäytetyössä TIA Portal -projektista luotiin HWCN Exporter -ohjelmalla HWCN export -tiedosto (kuva 23). Tiedosto luodaan valitsemalla ohjelmasta STEP 7 (TIA Portal) -välilehti, josta valitaan haluttu TIA Portal -projekti sekä kansio, johon tiedosto tallennetaan, minkä jälkeen ohjelma luo projektista HWCN export -tiedoston.



KUVA 23. HWCN export -tiedoston luominen

MCD:tä kytkettäessä valitaan kytkentätavaksi Mechatronics Concept Designer ja annetaan nimeksi MCD tai jokin muu kuvaava nimi. Tämän jälkeen luotu kytkentä avataan ja pyydetään signaaleja MCD:ltä (kuva 24).

MCD				
In Receive signals from MCD				
Default	Unit	Name	Type	Comment
0.0	mm/sec	scKelkka.SetSpeed	analog	
0.0	rev/min	scLaskukuljetin1.SetSpeed	analog	
0.0	mm/sec	scNostovaunu.SetSpeed	analog	
0.0	rev/min	scRulla1.SetSpeed	analog	
0.0	rev/min	scTerä.SetSpeed	analog	
0.0	mm/sec	scTerävaunu.SetSpeed	analog	
Outputs Reset filter				
Unit	Name	Type	Comment	
	csAY706.Triggered	binary		
	csAY707.Triggered	binary		
	csAY708.Triggered	binary		
	csAY709.Triggered	binary		
	csAY711.Triggered	binary		
	csAY712.Triggered	binary		

KUVA 24. Signaalien pyytäminen MCD-ohjelmasta

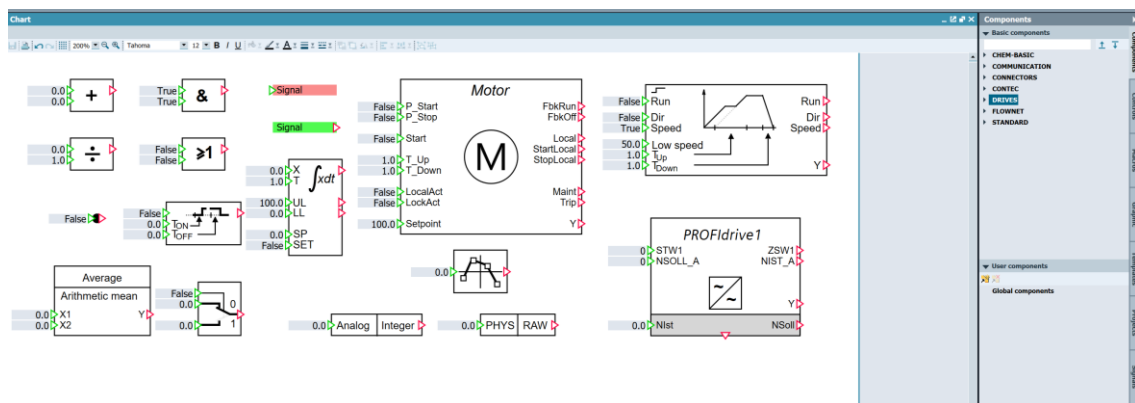
Kun signaaleja on pyydetty, siirrytään NX MCD -ohjelman Simit-välilehdelle, josta signaalien lähettäminen SIMIT-ohjelmistoon voidaan aloittaa (kuva 25). Kun kytkentä on luotu, ovat CAD-mallille luodut kinematiikan ohjauksen ja simuloitujen toimilaitteiden signaalit käytettävissä SIMIT-ohjelmistossa.



KUVA 25. Signaalien lähettäminen MCD:stä SIMIT:iin

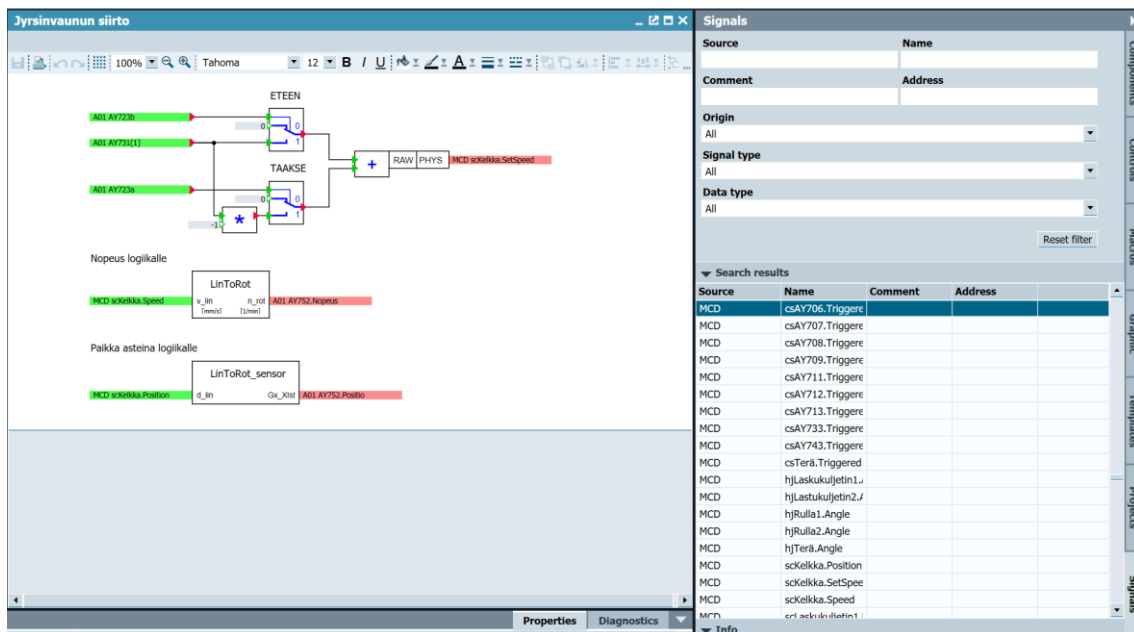
5.2 Charts

Toimilaitteiden toiminnallisuuksien simulointi ja muuttujien (Signals) toisiinsa kytkeminen suoritetaan ohjelmakaavioissa (Charts). SIMITin komponenttikirjastosta löytyy suuri määrä valmiita komponentteja (Components), joilla toimilaitteiden simulointi voidaan toteuttaa. Komponenttikirjastosta löytyy muun muassa komponentteja erilaisten laskutoimituksien suorittamiseen, datatyypin muuntamiseen ja signaalien käsittelyyn. Kuvassa 26 on esiteltynä joitakin SIMIT-ohjelmistosta löytyviä komponentteja.



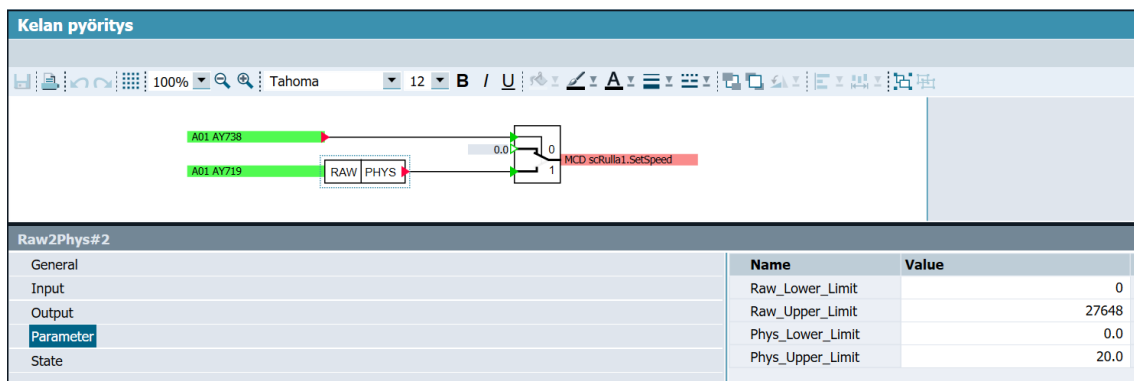
KUVA 26. Esimerkkejä SIMIT-ohjelmistossa käytössä olevista komponenteista

Komponentit voidaan raahata suoraan ohjelmakaaviolle, jossa ne kytketään toisiinsa halutun toiminnallisuuden saavuttamiseksi. Lisäksi tuodaan halutut tulo- ja lähtösignaalit sekä kytketään ne toisiinsa komponenttien avulla. Signaalien tuonti tapahtuu signals-välilehden kautta raahaamalla ne ohjelmakaaviolle samalla näppäimistön Shift-painiketta pohjassa pitämällä. Kuvassa 27 on esitettyä yksi opinnäytetyön digitaalisen kaksosen ohjaukseen tehdyistä ohjelmakaavioista. Kyseiseen ohjelmakaavioon toteutettu ohjaus ja sen toiminta on selitetty yksityiskohtaisesti myöhemmin raportin toteutusosassa.



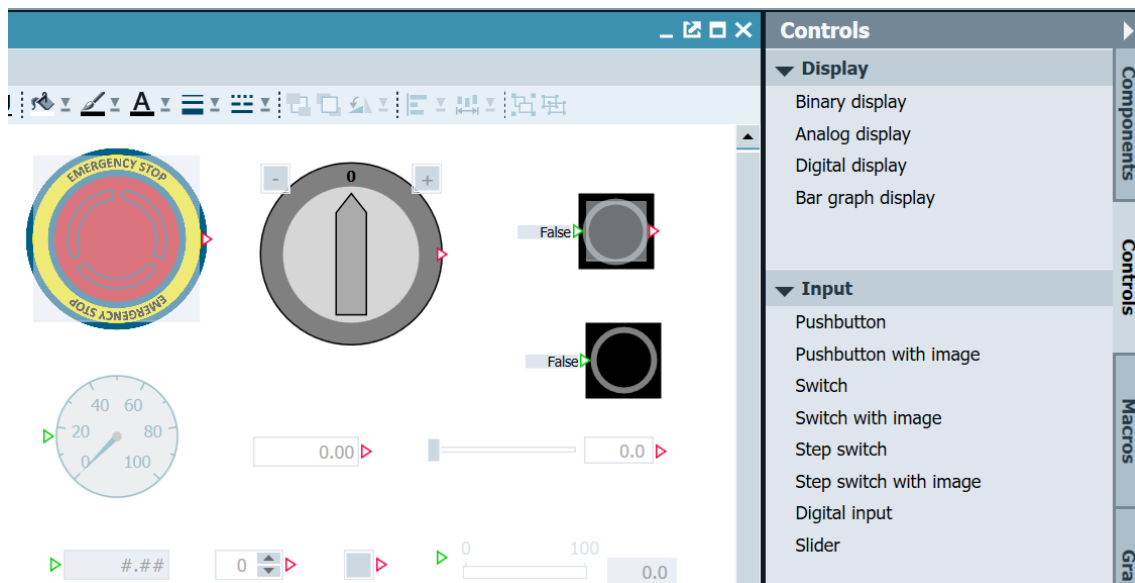
KUVA 27. Komponenttien ja signaalien kytkeminen

Jotta ohjelmakaavioissa simuloitujen toimilaitteiden toiminta voidaan testata oikeassakin laitteessa, voidaan niiden parametrit määrittää halutunlaisiksi. Parametrien määrittäminen tapahtuu ruudun alareunan Properties-ikkunassa. Kuvassa 28 on esitetty raw2phys-komponentin parametrien määrittäminen. Kyseinen komponentti muuntaa raaka-arvon analogiseksi arvoksi. Tässä tapauksessa sovellusohjelmasta tulevan signaalin arvo on muodossa 0–27648 ja halutun nopeuden maksimiarvo on 20 kierrosta minuutissa. PLC:n lähtösignaalin arvo saadaan haluttuun muotoon muuttamalla komponentin parametrit sen mukaisesti.



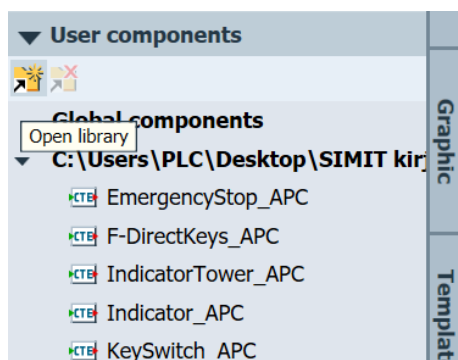
KUVA 28. Raw2Phys-komponentin parametrien asetus

SIMITin Controls-välilehdeltä löytyy lisäksi käsin suoritettaviin ohjauksiin soveltuvia komponentteja kuten painonappeja, joiden lisäksi valittavissa on myös muun muassa analogisia ja digitaalisia näyttöjä signaalien arvojen visualisointiin ja seurantaan. Kuvassa 29 on esitelty joitakin ohjauksiin soveltuvia komponentteja sekä näyttöjä.



KUVA 29. Käsiohjauksen komponentteja

SIMITin controls-kirjasto on melko suppea, mutta lisää käsin suoritettaviin ohjauksiin soveltuvia komponentteja löytyy erillisistä komponenttikirjastoista. Opinnäytetyössä laitteen ohjauspaneeli tehtiin SIMITin ohjelmakaavioon ja laitteen ohjaus suoritettiin sitä kautta. Ohjauspaneeli on esiteltyä opinnäytetyön toteutusosiossa (kuva 40). Ohjauspaneelissa on käytetty suurimmilta osin ulkoisesta kirjastosta tuotuja komponentteja. Komponenttikirjaston tuominen SIMITiin tapahtuu Components-välilehdeltä kohdasta “user components”, jonka kautta voidaan hakea tietokoneelle tallennettu kirjasto (kuva 30). Kirjastoja voi ladata muun muassa Siemensin SiePortalista.

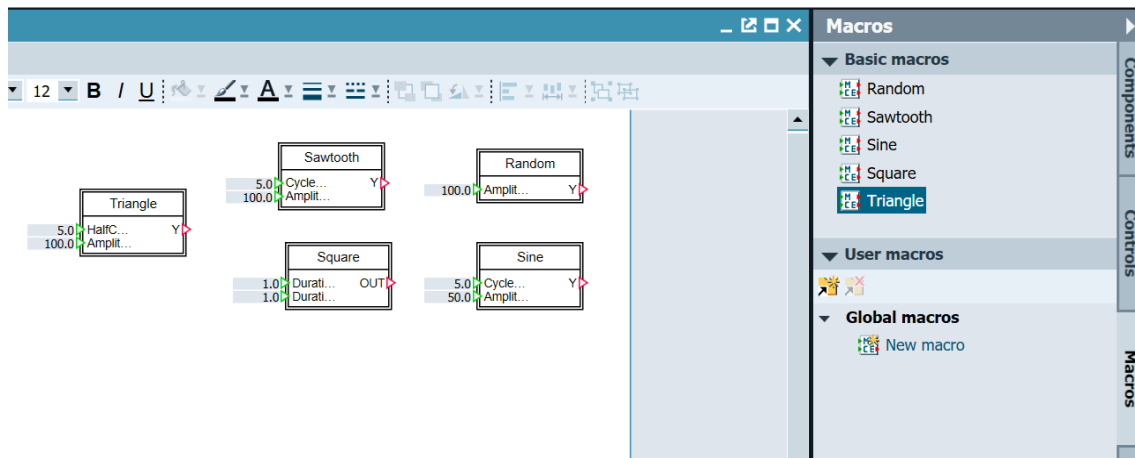


KUVA 30. Komponenttikirjaston tuominen SIMITiin

5.3 Makrot ja mallipiirit

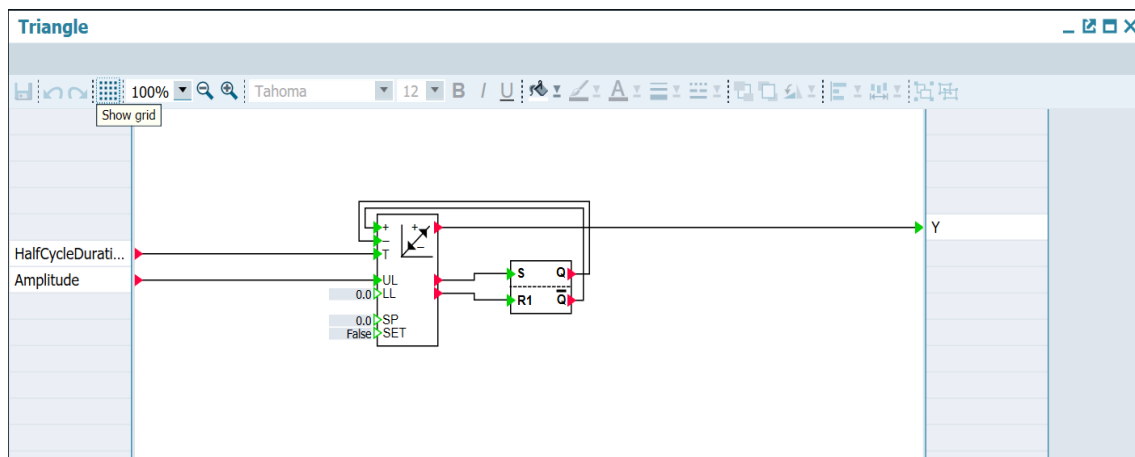
Makroja (Macros) voidaan käyttää toistuvien funktioiden yhdistämiseen yhdeksi komponentiksi, mikä vastaa TIA Portalissa käytettäviä toimilohkoja (Function Blocks). Kun makro on luotu, voidaan

sitä käyttää projektissa samalla tavalla kuin yksittäisiä komponentteja. (Jowett, James 2024.) SIMIT-ohjelmistossa on valmiina viisi erilaista makroa käytettäväksi simulointiin (kuva 31).



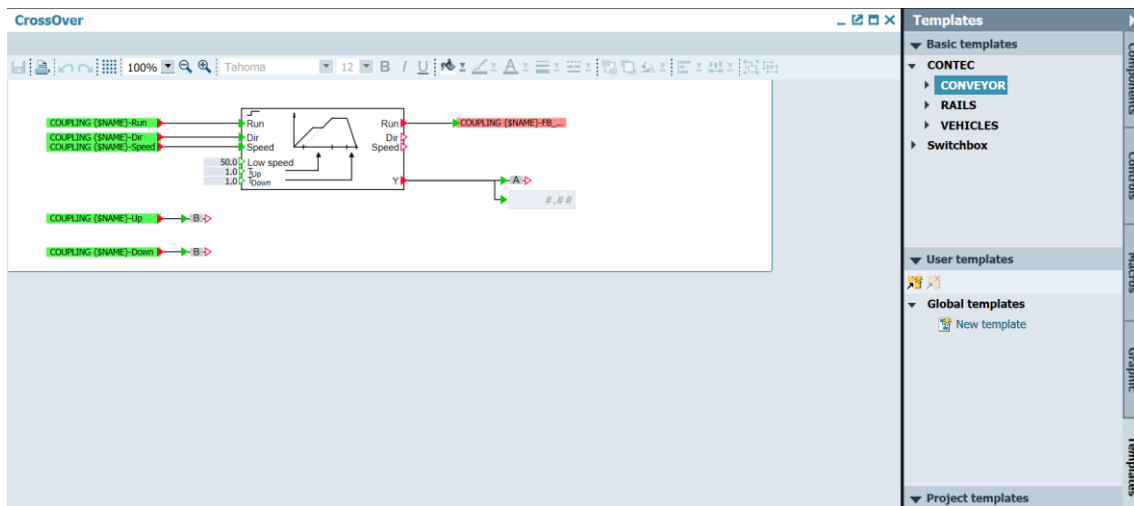
KUVA 31. SIMIT-ohjelmiston valmiit makrot

Ohjelmistosta valmiiksi löytyvien makrojen lisäksi on mahdollista luoda oma makro tai tuoda valmiita makroja projektiin. Kuvassa 32 on esimerkki valmiin makron rakenteesta; oma makro luodaan samalla periaatteella. Makroon asetetaan halutut toiminnallisuudet samalla tavalla kuin ohjelma-kaaviotakin rakentaessa sekä määritellään halutut tulo- ja lähtösignaalit.



KUVA 32. Valmis Triangle-makro SIMIT-ohjelmistossa

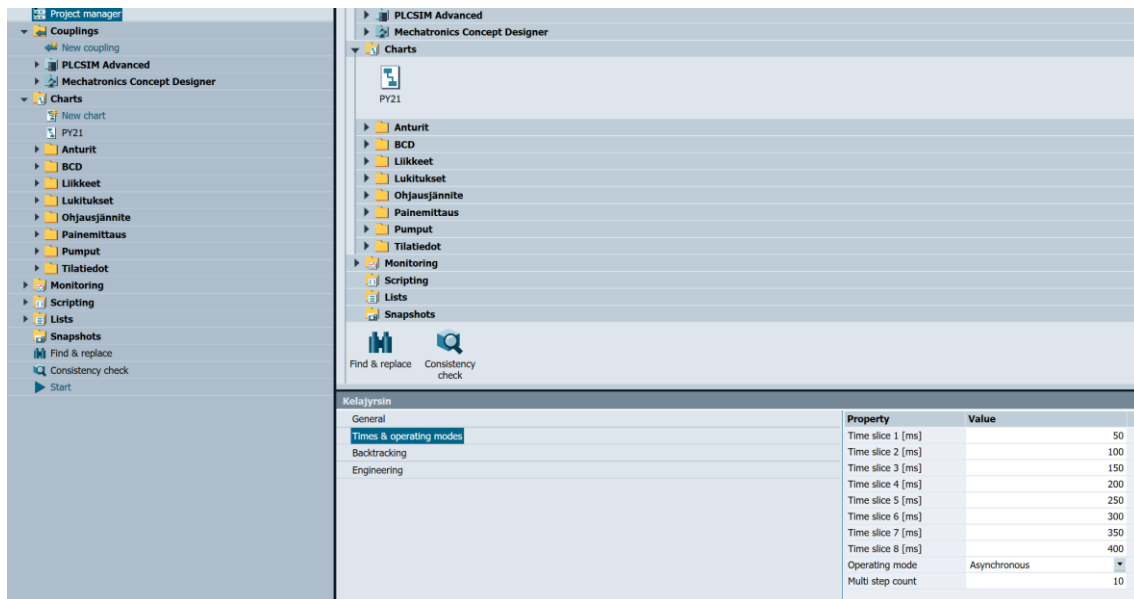
Mallipiiri (Template) helpottaa simulointimallin usein toistuvien toimintojen simulointia, kuten osia ohjelmakaaviosta. Mallipiirissä voidaan käyttää kaikkia samoja elementtejä kuin ohjelmakaaviosakin. Näitä voidaan hyödyntää ohjelmakaavioiden mallina uusia simulointimalleja luodessa. (Siemens 2023, 286.) Sen lisäksi, että mallipiirejä voidaan luoda itse, on niitä myös saatavilla SIMIT-ohjelmistossa useita valmiita. Kuvassa 33 on esitettyä yksi SIMITin valmiista mallipiireistä.



KUVA 33. Valmis mallipiiri SIMIT-ohjelmistossa

5.4 Simuloinnin asetukset

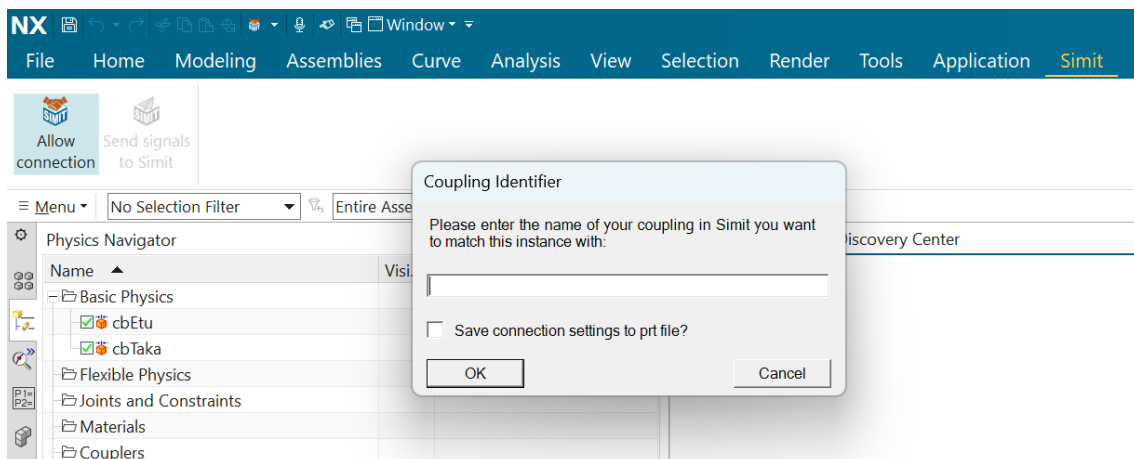
Jotta simulointimalli saataisiin vastaamaan laitteen toimintaa mahdollisimman tarkasti, tulee simuloinnissa mukana olevien ohjelmistojen suorituksen olla samanaikaista. Project manager -välilehdeltä (kuva 34) voidaan määrittää liityntöjen välisen tiedonvaihdon tyyppi (Operating mode) sekä suoritusaika (Time slice). Tiedonvaihtotyyppejä on kolme erilaista: asynchronous, synchronous sekä isochronous. SIMIT käyttää oletuksena Time slice 2:een määritettyä suoritusaikaa. Opinnäytetyössä suoritusaika oli 100 ms ja siinä käytettiin asynchronous-tiedonvaihtotyyppiä, koska projektin toimilaitteet eivät tue IRT-kommunikointia, joka mahdollistaa väyläsyklin mukaisen kommunikoinnin. Nämä arvot ovat SIMIT-projektin oletusarvot ja niiden todettiin riittävän kyseessä olleen digitaalisen kaksosen simulointiin.



KUVA 34. Project manager -välilehti

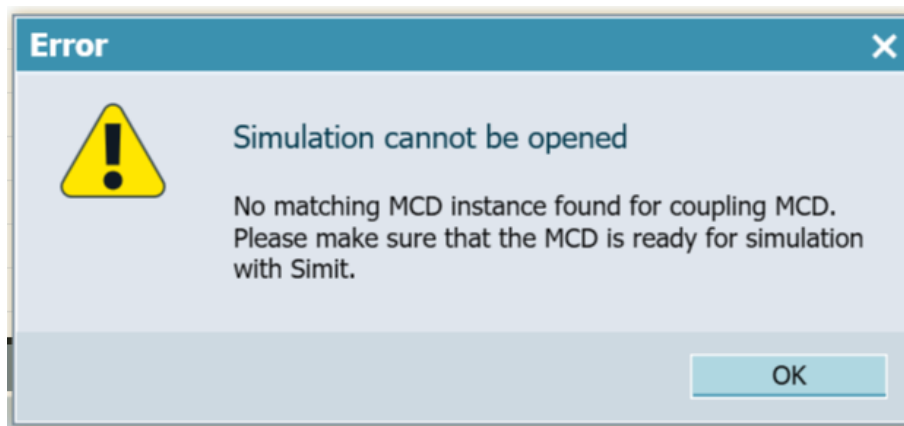
5.5 Simulointi

Kun simuloinnissa on mukana MCD-liityntä, tulee liityntä ensin käydä sallimassa NX MCD:n Simit -välilehdeltä, jotta simulointi voidaan käynnistää. Liityntää salliessa MCD pyytää identifioimaan kytken nimen, jolloin syötetään kytkennän nimi samalla tavalla kuin se on SIMIT-ohjelmistossa nimetty (kuva 35).



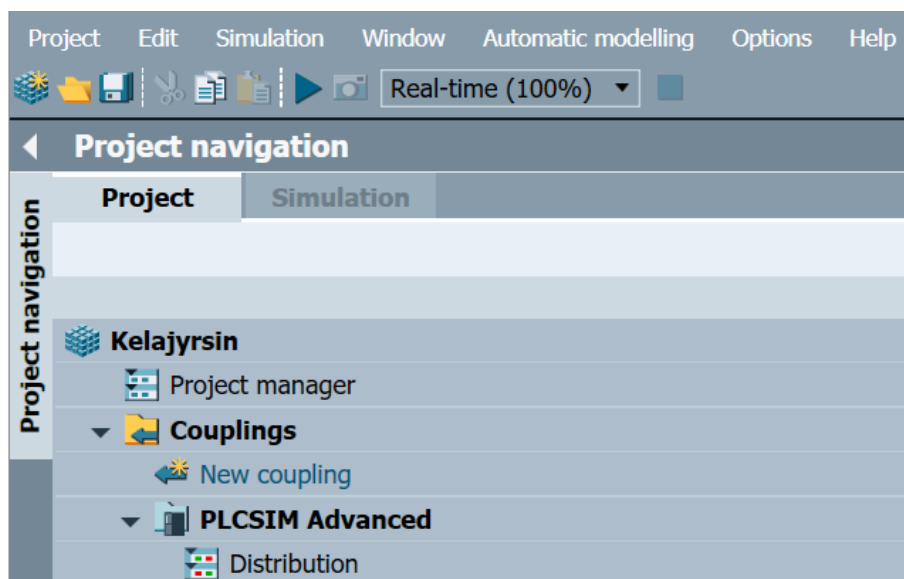
KUVA 35. SIMIT-liitynnän hyväksyminen NX MCD:ssä

Jos liityntää ei käydä sallimassa, antaa SIMIT virheilmoituksen (kuva 36). Kun liityntä on sallittu, avautuu myös MCD-mallin simulointi automaattisesti aina, kun simulointi käynnistetään SIMIT-ohjelmistossa.



KUVA 36. SIMIT-liityntää ei ole hyväksytty NX MCD:stä

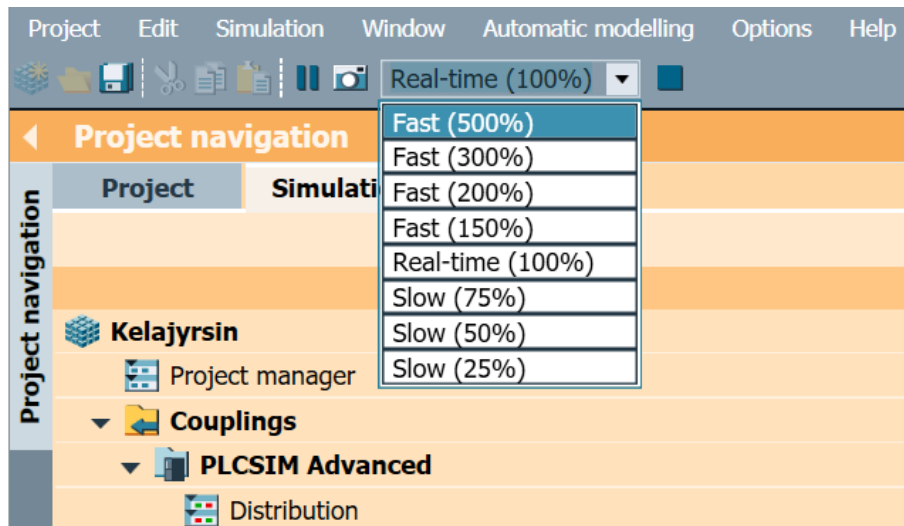
Simulointi voidaan käynnistää SIMIT-ohjelmistossa joko yläpalkista (kuva 37) tai projektipuusta. Ennen simuloinnin käynnistämistä voidaan myös valita, millä nopeudella simulointi toteutetaan. Oletuksena simulointi tapahtuu reaaliajassa, jonka lisäksi simulointia on myös mahdollista nopeuttaa tai hidastaa. Valittavissa olevat simuloinnin nopeudet näkyvät kuvassa 38.



KUVA 37. Simuloinnin käynnistys

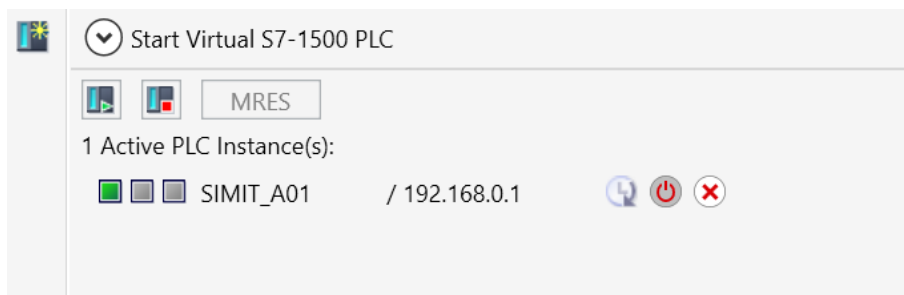
SIMIT-ohjelmisto suorittaa aina simuloinnin käynnistyessä ristiriidattomuudentarkistuksen (Consistency check), ja jos projektissa on ristiriitoja, ei simulointia voida käynnistää. Ristiriidattomuudentarkistus voidaan suorittaa myös manuaalisesti. (Siemens 2023, 342.)

Käynnissä olevan simulointitilan SIMIT-ohjelmistossa tunnistaa oranssiksi muuttuneesta värimaailmasta, jonka lisäksi projektipuussa siirrytään simulointivälilehdelle. Yläpalkista käynnissä oleva simulointi voidaan pysäyttää tai keskeyttää (kuva 38).



KUVA 38. SIMIT simulointitilassa

Kun simulointi on käynnissä, avautuu PLCSIM Advancediin virtuaalinen logiikka (kuva 39), johon TIA Portalilla tehty sovellusohjelmaohjelma voidaan ladata. Jo kertaalleen simuloidulle logiikalle ladatut ohjelmat käynnistyvät aina automaattisesti, kun käynnistetään simulointi SIMIT-ohjelmistossa. Sovellusohjelmaa ei siis tarvitse ladata simuloidulle logiikalle joka kerta uudestaan. Siinä tapauksessa, että TIA Portal -projektiin tehdään muutoksia, tulee se ladata uudestaan simuloidulle logiikalle, jotta tehdyt muutokset astuvat voimaan myös simuloinnissa.



KUVA 39. Virtuaalinen S7-1500-sarjan logiikka

6 DIGITAALINEN KAKSONEN ASIAKASPROJEKTIN YHTEYTEEN

PLC-Automationilla oli käynnissä asiakasprojektina teollisuudessa toiminnassa olevan laitteen modernisointi, jonka edetessä syntyi ajatus luoda laitteesta digitaalinen kaksonen. Kyseessä oleva laite on näytejyrsin, jolla jyrsitään kelalle pyöritetystä teräslevystä näytepala sen ominaisuuksien testaamista varten. Modernisoinnissa haluttiin laitteen ohjauslogiikka vaihtaa vanhasta Siemensin S5-logiikasta uuteen S7-1500-sarjan logiikkaan. Ohjauslogiikan vaihtoa varten laitteen vanha sovellusohjelma käännettiin TIA Portalissa uuteen logiikkaan sopivaksi. Ohjauslogiikan vaihdon lisäksi tarkoituksena oli uusia laitteen johdotuksia sekä lisätä laitteeseen uusia antureita.

6.1 Tavoitteet

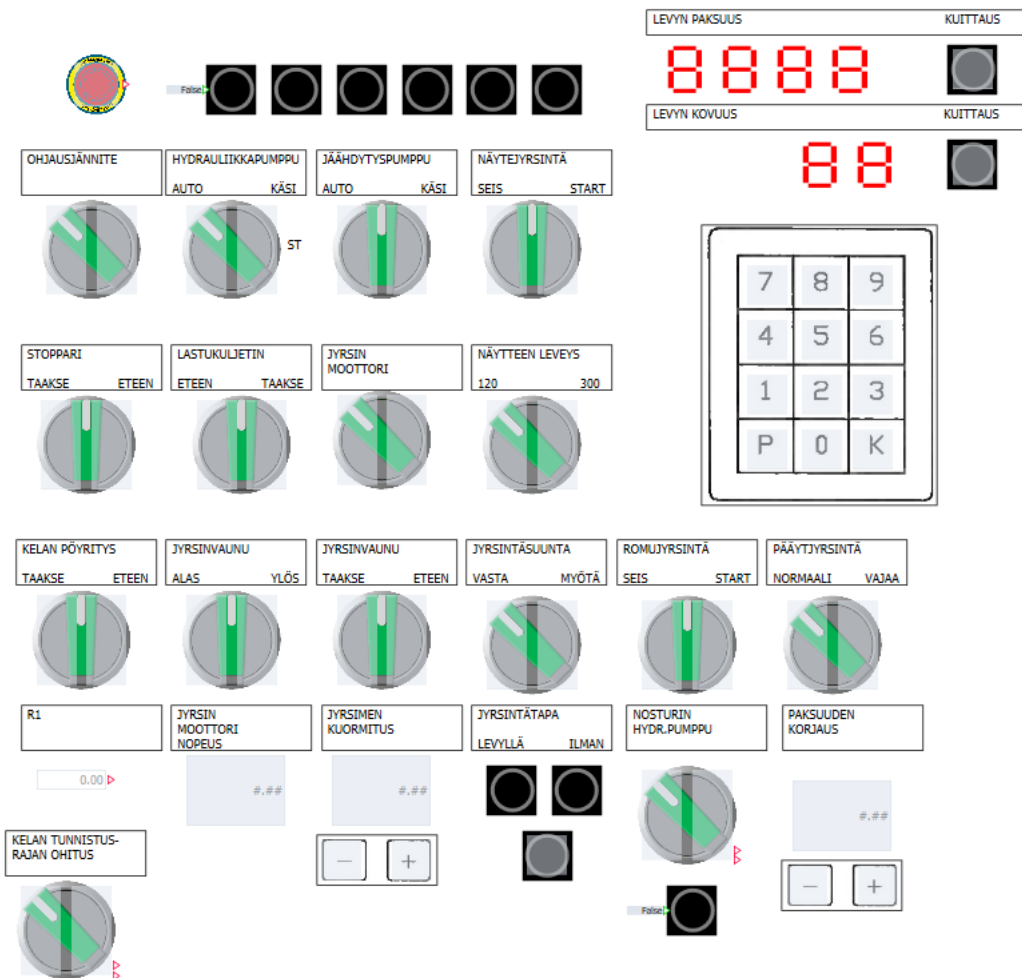
Tavoitteena oli tuottaa modernisoitavasta laitteesta toimiva digitaalinen kaksonen, jota vasten sovellusohjelman ja uusittavien antureiden toimintaa pystytään testaamaan ennen paikan päällä suoritettavaa ohjauslogiikan ja toimilaitteiden uusimista sekä käyttöönottoa. Haluttiin siis suorittaa virtuaalinen käyttöönotto ennen lopullista käyttöönottoa ja näin vähentää varsinaiseen käyttöönottoon kuluvaa aikaa. Toisena tavoitteena oli saada yritykseen kokemusta digitaalisen kaksosen luomisesta, jotta digitaalisia kaksosia olisi mahdollista hyödyntää myös tulevilla projekteilla. Digitaalista kaksosta haluttiin myös hyödyntää yrityksen markkinoinnissa ja käyttää yhtenä vetonaulana messuilla.

6.2 Toteutus

Digitaalinen kaksonen oli ensimmäinen laatuaan PLC-Automationilla, joten työ lähti liikkeelle tarvittavien ohjelmistojen asennuksella ja lisenssien hankkimisella. Tässä tapauksessa tarpeen oli ladata NX MCD sekä SIMIT. Kun kaikki tarvittavat ohjelmistot olivat asennettuna ja lisenssit toiminnassa, lähdettiin ohjelmien toimintaan tutustumaan manuaalien ja Siemensiltä saadun koulutusmateriaalin pohjalta. Digitaalisen kaksosen luomisessa käytettäviin ohjelmistoihin tutustumisen lisäksi tutustuttiin laitteen haluttuun toimintaan laitteen toimintakuvauksen sekä vanhasta uuteen käännetyn sovellusohjelman avulla. Kun ohjelmistoihin ja laitteen toimintaan oli tutustuttu ja varsinaisen digitaalisen kaksosen toteutus aloitettiin, oli sen toteuttamiseen aikaa muutama viikko, sillä digitaalista kaksosta haluttiin esitellä tulevilla messuilla.

Lähtökohtana itse digitaalisen kaksosen luomiseen ja sen ohjaukseen tässä vaiheessa oli vanhasta ohjauslogiikasta TIA Portaliin käännetty sovellusohjelma sekä laitteesta tehty CAD-malli, joka tuotiin NX MCD -ohjelmaan. Siemensin yhteyshenkilö Ville Torvinen toteutti laitteen alustavan kinemaattisen mallin luomisen MCD-ympäristössä. Pääasiallisesti tehtäväksi jäi siis toimilaitteiden toiminnan simulointi SIMIT-ohjelmistossa, jotta digitaalinen kaksonen saatiin vastaamaan oikean laitteen toimintaa täydellisesti. Toimilaitteiden simulointi toteutettiin yhteistyössä Ville Torvisen kanssa Microsoft Teams-palaverien välityksellä. Näiden palaverien aikana rakennettiin yhdessä toimilaitteiden ohjauksia ja muutettiin laitteen MCD-mallin kinematiikkaa tarpeiden mukaan. Palaverien välissä tehtäväksi jäi selvittää vastaan tullessiin ongelmiin ratkaisuja seuraavaa kertaa varten. Näihin ongelmiin lukeutui muun muassa anturien oikeiden paikkojen selvittäminen ja niiden haluttu toiminta sekä sovellusohjelman ohjauksien toiminnan selvittely.

PLC-Automationin toimesta esitettiin laitteen modernisoinnin yhteydessä laitteen vanhan ohjauspaneelin korvaamista uudella HMI (Human Machine Interface) -paneelilla. Tätä muutosta ei kuitenkaan päädytty toteuttamaan, sen sijaan laitteen ohjauksessa haluttiin asiakkaan toimesta edelleen hyödyntää olemassa olevaa ohjauspaneelia. Tämän takia digitaalisen kaksosen ohjaus päätettiin toteuttaa SIMIT-ohjelmistossa, jonne mallinnettiin laitteen olemassa olevaa ohjauspaneelia vastaava virtuaalinen ohjauspaneeli (kuva 40) hyödyntäen SIMITin ohjelmakaavion komponentteja.



KUVA 40. Oikeaa ohjauspaneelia mukaileva virtuaalinen ohjauspaneeli

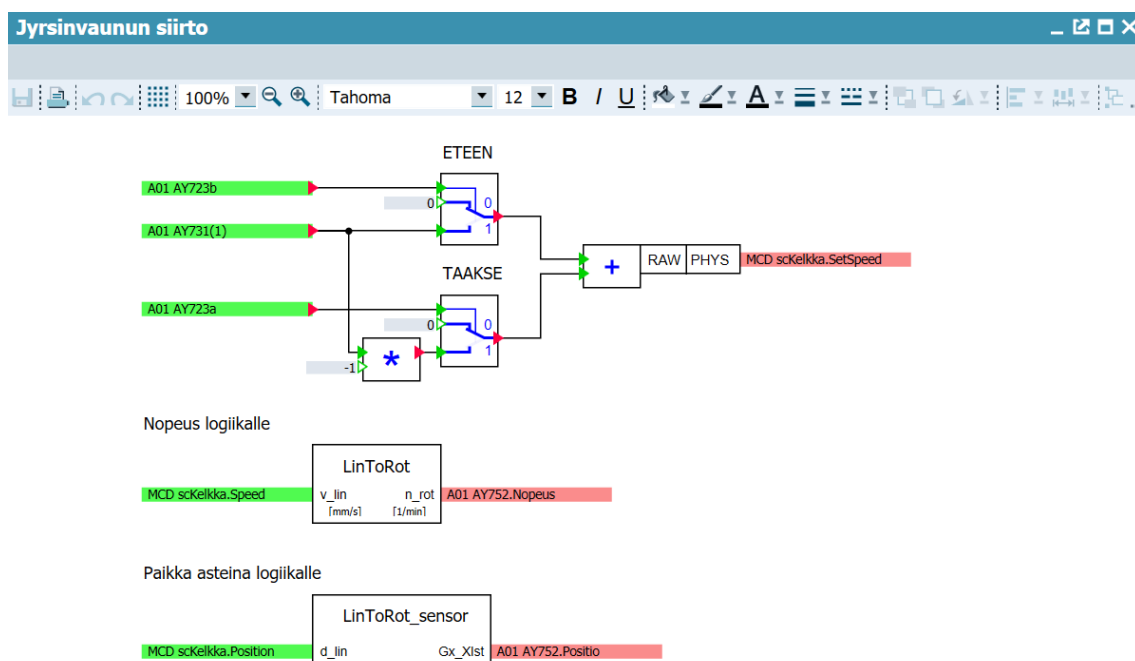
Digitaalinen kaksonen saatiin kahdessa viikossa sellaiseen vaiheeseen, että sitä pystyttiin esittelemään messuilla. Täysin valmis digitaalinen kaksonen ei vielä tässä vaiheessa ollut, mutta liikkeet toimivat halutulla tavalla ja digitaalista kaksosta pystyttiin ohjaamaan virtuaalisen ohjauspaneelin avulla niin manuaalisilla ohjausliikkeillä kuin myös automaattijolla. Digitaalisen kaksosen toimintaa pystyttiin siis esittelemään messuilla siitä kiinnostuneille, joihin lukeutui myös asiakasyrityksen työntekijöitä, jotka messujen aikana kävivät tutustumassa laitteesta tuotettuun digitaaliseen kaksoseen.

Messujen jälkeen digitaalisen kaksosen toimintaa paranneltiin vielä entistä tarkemmin fyysistä laitetta vastaavaksi, minkä jälkeen digitaalista kaksosta oli tarkoitus hyödyntää modernisoitavan laitteen sovellusohjelman optimointiin. Tarkoituksena oli siis ensin ottaa laite käyttöön virtuaalisesti, jonka jälkeen vuorossa olisi virallinen käyttöönotto. Asiakasprojektin käyttöönotto kuitenkin siirtyi reilusti eteenpäin, joten käyttöönottoja ei ehditty suorittamaan eikä niistä saatuja kokemuksia

päästy sisällyttämään opinnäytetyön raporttiin. Fyysiseen laitteeseen ja sen toimintaan kuitenkin päästiin tutustumaan paikanpäälle. Laitteen toimintaan tutustumisen perusteella pystyi toteamaan, että digitaalinen kaksonen ja sen ohjaus toimii samalla tavalla kuin fyysinen laite.

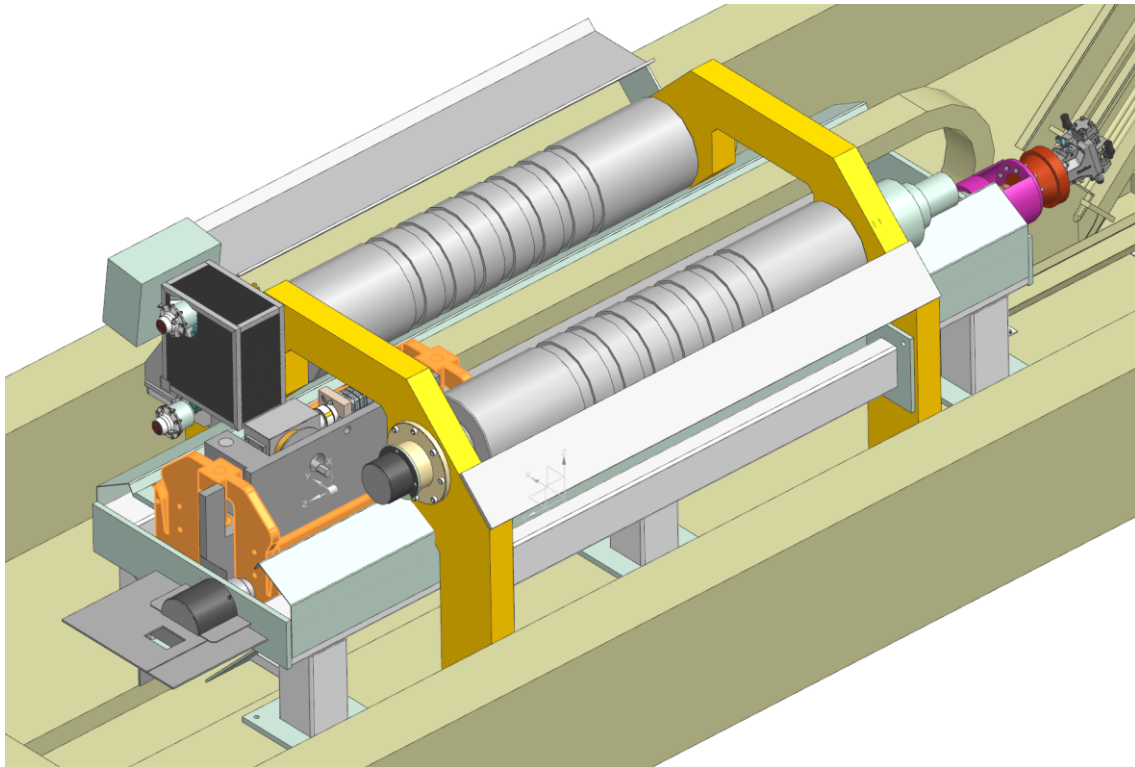
6.3 Esimerkki SIMIT-ohjauksesta

Toimilaitteiden toimintojen simulointiin rakennettiin SIMITissä useita erilaisia ohjelmakaavioita, ja seuraavaksi esitellään yhden ohjelmakaavion toteutus tarkemmin. Kuvassa 41 on simuloitu jyrsinvaunun (kuva 42) liikuttamisessa tarvittavien toimilaitteiden toimintaa.



KUVA 42. SIMITiin rakennettu jyrsinvaunun ohjaus

Sovellusohjelman kaksi AY723-muuttujaa (a ja b) ohjaavat fyysisen laitteen tapauksessa jyrsinvaunun siirtoventtiiliä eteen- tai taakse-asentoon, AY731 taas antaa jyrsinvaunun siirronnopeusohjeen. Näillä tiedoilla jyrsinvaunu tietää, kumpaan suuntaan ja millä nopeudella sen tulee liikkua.

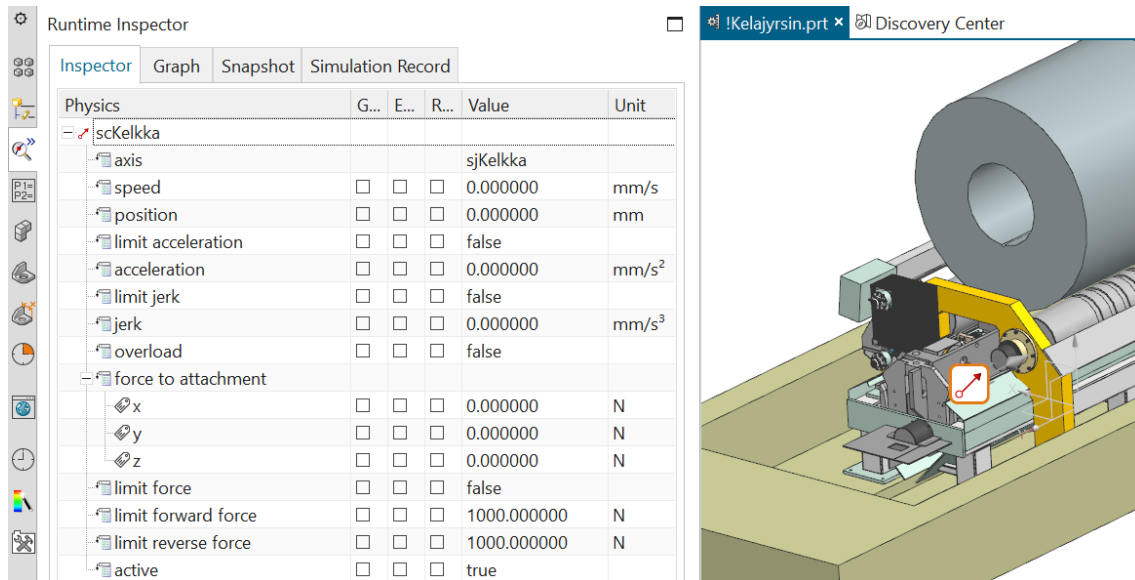


KUVA 42. Jyrsinvaunu korostettu kuvassa oranssilla, jyrsinvaunun mukana liikkuvat myös kaikkien sisällä olevat komponentit

Digitaaliseen kaksoseen tämä toiminnallisuus on toteutettu hyödyntäen Add-, Multiply-, Selection- sekä Raw2Phys-komponentteja. Sovellusohjelman antaessa jyrsinvaunulle käskyn liikkua eteenpäin menee kyseinen Selection-komponentti päälle eli 1-asentoon, jolloin komponentin läpi pääsee liikkumaan jyrsinvaunun nopeusohjeen tieto. Tässä tapauksessa toinen Selection-komponentti on pois päältä eli se antaa 0-asentoon asetetun arvon, joka tässä tapauksessa on 0. Nämä kaksi arvoa lasketaan yhteen Add-komponentin avulla, jolloin yhteenlaskettu arvo on jyrsinvaunun nopeusohjeen positiivinen analoginen raaka-arvo, joka muunnetaan Raw2Phys-komponentin avulla muotoon mm/s. Raw2Phys-komponentin toiminta on selitetty aikaisemmin raportin kappaleessa 5.2. Saa- dessaan positiivisen nopeusohjeen MCD-mallin jyrsinvaunu liikkuu eteenpäin. Sovellusohjelman antaessa jyrsinvaunulle käskyn liikkua taaksepäin saa se saman nopeusohjeen negatiivisena luku- kuna, jolloin jyrsinvaunu liikkuu taaksepäin. Tämä tapahtuu kerrotaessa nopeusohjeen arvo luke- malla -1 hyödyntäen Multiply-komponenttia.

Muuttujat AY752 (nopeus ja positio) taas saavat absoluuttianturilta tiedon jyrsinvaunun todellisesta nopeudesta ja positioista. Digitaalisen kaksosen tapauksessa nämä muuttujat saavat MCD-mallin jyrsinvaunun todellisen nopeuden ja position MCD-malliin simuloitulta SpeedControl-toimilaitteelta

(kuva 43). Saadut arvot muunnetaan sovellusohjelman tarvitsemaan muotoon hyödyntämällä LinToRot- ja LinToRot_sensor-komponentteja. LinToRot-komponentti muuntaa simuloidun toimilaitteen antaman nopeuden (mm/s) arvon siihen muotoon (1/min), jonka absoluuttianturi antaisi oikean laitteen tapauksessa. Kyseiset komponentit eivät löydy SIMITin omasta komponenttikirjastosta.



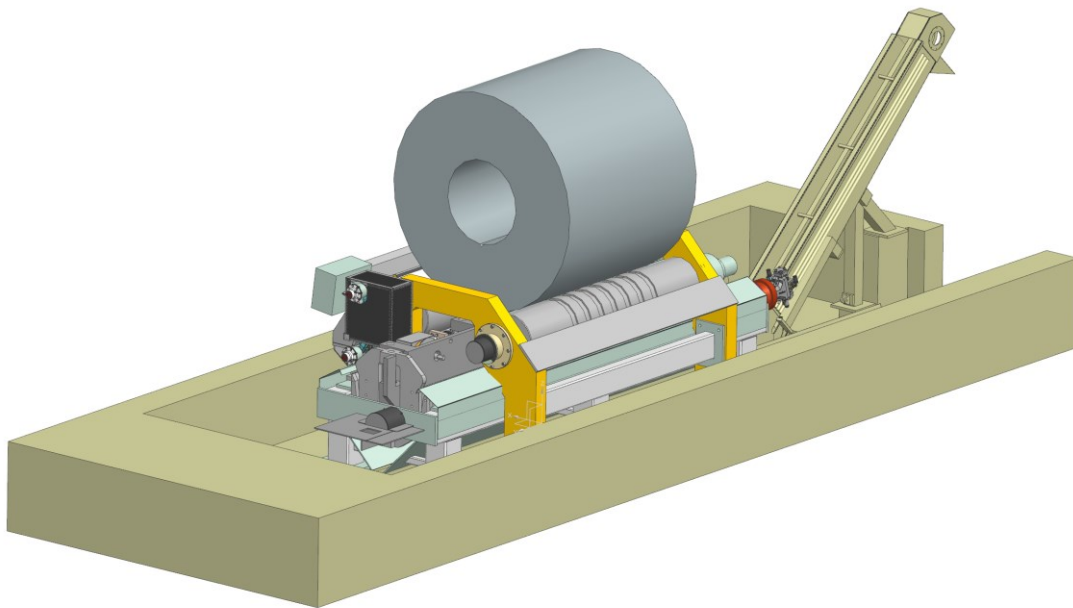
KUVA 43. Jyrsinvaunulle määritetty nopeudenohjaus ja liikeakseli

6.4 Haasteet

Koska kyseessä oli vanhan laitteen modernisointi, ei haasteilta pystytty välttymään. Suurimpia haasteita digitaalista kaksosta luodessa tuotti vanhasta uuteen käännetty sovellusohjelma sekä uusien anturien toiminta. Uusien anturien toimintaan perehdyttiin anturien manuaalien pohjalta, jota kautta saatiin käsitys siitä, kuinka niiden pitäisi toimia ja näin ollen niiden toimintaa pystyttiin simuloimaan totuudenmukaisesti. Alkuvaiheessa projektia myös olemassa olevien antureiden tarkat paikat olivat hieman epäselviä, joten MCD-malliin antureiden paikoitusta piti hakea alkuun kokeilemalla. Lisäksi oman haasteensa toi se, että projektissa käytetyt ohjelmistot olivat tekijälle entuudestaan tuntemattomia. Pohjalla oli kuitenkin kokemusta muun muassa Solidworks- ja TwinCAT-ohjelmistoista ja näiden ohjelmistojen osaamisen pohjalta oli uusien Siemensin ohjelmistojen käytön oppiminen suhteellisen nopeaa.

6.5 Lopputulos

Vaikka käyttöönotosta ja virtuaalisesta käyttöönotosta saatuja kokemuksia ei päästy raporttiin sisällyttämään, saatiin lopputuloksena kuitenkin aikaseksi toimiva digitaalinen kaksonen, jonka avulla päästään myöhemmässä vaiheessa suorittamaan modernisoitavalle laitteelle virtuaalinen käyttöönotto. Valmis digitaalinen kaksonen muodostuu laitteen sovellusohjelmasta eli automaatiomallista, SIMITiin rakennetuista ohjelmakaavioista eli käyttäytymismallista sekä laitteen MCD-mallista (kuva 44) eli mekaanisesta ja kinemaattisesta mallista.



KUVA 44. Digitaalisen kaksosen MCD-malli

Kuten jo aiemmin teoriaosuudessa todettiin, on opinnäytetyön käytännön osuuden digitaalinen kaksonen DTI, eli se on tehty olemassa olevan laitteen kaksoseksi. Kommunikaatiomenetelmien mukaan määriteltynä opinnäytetyön digitaalinen kaksonen taas on digitaalinen malli, sillä laitteen ja digitaalisen kaksosen välillä ei ole automaattista datansiirtoa. Digitaalinen kaksonen tehtiin täysin PLC-Automationin halusta ja omalla rahoituksella asiakasprojektin yhteyteen, minkä vuoksi laitteen ja sen kaksosen välille ei tullut datansiirtoa. Laite ja digitaalinen kaksonen kuitenkin on mahdollista myöhemmin asiakasyrityksen niin halutessa yhdistää toisiinsa niin, että niiden välillä tapahtuu automaattista datansiirtoa. Digitaalista kaksosta on myös mahdollista asiakasyrityksen niin halutessa hyödyntää uusien operaattorien koulutukseen.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa toimiva digitaalinen kaksonen asiakasprojektin yhteyteen ja näin ollen saada PLC-Automationille arvokasta kokemusta digitaalisen kaksosen luomisesta. Lisäksi tavoitteina oli hyödyntää digitaalista kaksosta modernisoitavan laitteen sovellusohjelman testauksessa ja optimoinnissa, hyödyntää digitaalista kaksosta yrityksen markkinoinnissa esitellen sitä messuilla sekä oppia Siemensin virtuaalisen käyttöönoton toteuttamiseen tarkoitettujen ohjelmistojen käyttö.

Työn alussa asetettuihin tavoitteisiin päästiin lukuun ottamatta sovellusohjelman optimointia. Vaikka sovellusohjelman optimointia eli virtuaalista käyttöönottoa ei opinnäytetyön aikana päästy suorittamaan, saatiin lopputuloksena aikaiseksi toimiva digitaalinen kaksonen, jonka kautta yritykseen saatiin kokemusta digitaalisen kaksosen luomisesta ja siihen liittyvien ohjelmistojen käytöstä. Myös markkinoinnin osalta onnistuttiin, sillä digitaalinen kaksonen herätti paljon kiinnostusta messuilla ja toimi näin ollen hyvänä vetonaulana yrityksen esittelypisteellä. Opinnäytetyön aikana kerättyä kokemusta voidaan yrityksessä hyödyntää tulevaisuudessa uusissa projekteissa, joihin digitaalisen kaksosen katsotaan tuovan etua.

Opinnäytetyön jälkeen taustalla toiminut laitteen modernisoinnin projekti jatkuu virtuaalisen käyttöönoton vaiheeseen ja sen jälkeen lopulliseen käyttöönottoon. Digitaalista kaksosta käydään myös vielä esittelemässä yrityksen tiloissa laitteen parissa työskenteleville asiakasyrityksen työntekijöille. Tämän lisäksi asiakasyrityksessä käydään yhdessä Siemensin kanssa esittelemässä yleisesti digitaalisten kaksosten hyötyjä ja käyttömahdollisuuksia.

Työn aihe oli mielenkiintoinen ja opettavainen, sillä ennen työtä digitaalinen kaksonen oli aiheena tuntematon. Työn aikana oppi paljon digitaalisista kaksosista, niiden monipuolisista käyttökohdista, hyödyistä sekä mahdollisuuksista. Tämän lisäksi kaikki työssä käytetyt ohjelmistot olivat entuudestaan tuntemattomia, mutta vastaavien ohjelmistojen käyttökokemuksen ja osaamisen sekä ohjelmistojen manuaaleihin tutustumisen avulla uusien ohjelmistojen käytön oppi nopeasti. Kaiken kaikkiaan työ oli riittävän laaja ja haastava, minkä ansiosta se vahvisti ja laajensi tekijän ammatillista osaamista.

LÄHTEET

Fortune business insights 2024. Digital Twin Market. Hakupäivä 13.6.2024. <https://www.fortunebusinessinsights.com/digital-twin-market-106246>

GBTEC Software 2024. Digital twins - guaranteeing success for smart process optimization. Hakupäivä 4.6.2024. <https://www.gbtec.com/resources/digital-twins/>

Goossens, Paul 2016. Industry 4.0 and the Power of the Digital Twin. Maplesoft. Hakupäivä 27.5.2024. <https://www.maplesoft.com/contact/webforms/PDF/2016/industry4.0.pdf>

Grieves, Michael & Vickers, John 2017. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Teoksessa Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches (toim. Anabela Alves, Franz-Josef Kahlen & Shannon Flumerfelt). Sveitsi: Springer International Publishing, 85–113. Hakupäivä 27.5.2024. https://www.researchgate.net/profile/Michael-Grieves/publication/306223791_Digital_Twin_Mitigating_Unpredictable_Undesirable_Emergent_Behavior_in_Complex_Systems/links/5aa54e1ea6fdccd544bc386f/Digital-Twin-Mitigating-Unpredictable-Undesirable-Emergent-Behavior-in-Complex-Systems.pdf

Henjes, Jan, Karner, Matthias, Kritzing, Werner, Sihn, Wilfried & Traar, Georg 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. Teoksessa 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018 (toim. Marco Macchi, László Monostori & Roberto Pinto). Bergamo: International Federation of Automatic Control, 1016–1022. Hakupäivä 28.5.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318316021>

IBM 2022. What is a digital twin. Hakupäivä 27.5.2024. <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>

Ingalsuo, Petri 2023. Digitaalinen kaksonen: Avain älykkäämpään ja tehokkaampaan tuotteen elinkaaren hallintaan. Blogikirjoitus. Gofore. Hakupäivä 6.6.2024. <https://gofore.com/digitaalinen-kaksonen-avain-alykkaampaan-ja-tehokkaampaan-tuotteen-elinkaaren-hallintaan/>

Jowett, James 2024. Getting Started with Siemens SIMIT Simulation. SolisPLC. Hakupäivä 7.6.2024. <https://www.solisplc.com/tutorials/siemens-simit#installing-simit>

Metsälä, Samuli & Torvinen, Ville 2021. Tuotannon tehostaminen virtuaalisen käyttöönoton avulla. Esitelmä Tuotannon tehostaminen virtuaalisen käyttöönoton avulla webinaarissa 5.10.2021. Siemens. Hakupäivä 28.5.2024. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:20a601d6-fc35-4f64-bb8c-3547a3f504df/2021-1005-virtuaalinen-kayttoonotto-webinaari-osa1.pdf>

PLC-Automation 2024. Yritys. Hakupäivä 10.5.2024. <https://www.plc.fi/yritys.html>

Process Genius 2024. Teollisuus 4.0 ja digitaalisen kaksosen asema osana sitä. Hakupäivä 12.7.2024. <https://processgenius.fi/wp-content/uploads/2024/03/Whitepaper-Teollisuus-4.0-ja-digitaalisen-kaksosen-asema-osana-sita.pdf>

Siemens 2022. SIMATIC S7-PLCSIM Advanced Function Manual. Hakupäivä 27.5.2024. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/110/109813110/att_1119149/v1/s7-plcsim_advanced_function_manual_en-US_en-US.pdf

Siemens 2023. SIMATIC SIMIT Simulation Platform (V11.1) Operating Manual. Hakupäivä 5.6.2024. https://cache.industry.siemens.com/dl/files/650/109823650/att_1152291/v1/SIMIT_enUS_en-US.pdf

Siemens 2024a. Guideline – Virtual Commissioning with SIMIT, NX MCD and S7-PLCSIM Advanced. Hakupäivä 25.5.2024. https://support.industry.siemens.com/dl/files/864/109963864/att_1277519/v1/Guideline_VC_SIMIT_PSA_MCD_V1.0.0.pdf

Siemens 2024b. Virtual Commissioning of machines with S7-PLCSIM Advanced, SIMIT & NX MCD – Getting Started. Hakupäivä 27.5.2024. https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109758943/Manual_VirtualCommissioningOfMachines_GettingStarted_V1.0.1_EN.pdf

Visual components 2016. Increasing control software quality with virtual commissioning. Blogikirjoitus. Hakupäivä 3.6.2024. <https://www.visualcomponents.com/resources/blog/increasing-control-software-quality-with-virtual-commissioning/>

Visual components 2024. An Introduction to Virtual Commissioning. Blogikirjoitus. Hakupäivä 3.6.2024. <https://www.visualcomponents.com/resources/blog/an-introduction-to-virtual-commissioning/>

Wazarat, Ali Hussain 2023. 15 Best digital twin companies to watch in 2024. Blogikirjoitus. Digital twin insider. Hakupäivä 16.9.2024. <https://digitaltwininsider.com/2023/03/08/best-digital-twin-companies/>