



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

MEERI SIMBERG

Azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän testausympäristön suunnittelu

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA
2022

Tekijä(t) Simberg, Meeri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Heinäkuu 2022
	Sivumäärä 51	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän testausympäristön suunnittelu		
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Steerprop Oy:n azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän HIL-simulointilaitteistoon vaadittavat pääkomponentit. Opinnäytetyössä keskitytään azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän HIL-testaukseen ja kenttäväylien monitorointiin tarvittavien pääkomponenttien selvittämiseen. Ohjausjärjestelmän ja ohjelmiston toiminnan todentaminen jää projekteissa kovin myöhäiseen vaiheeseen ja aikataulu testien suorittamiselle on tiukka. Näin ollen toimitusprojekteista erilliselle testausympäristölle on tarvetta. Opinnäytetyö on tyypiltään kehittämistyö, jonka aineistosta suurin osa on yrityksen sisäisiä dokumentteja, kuten manuaaleja, piirustuksia, ohjelmia ja muita teknisiä dokumentteja. Komponenttien valinta aloitettiin keräämällä kaikki ohjausjärjestelmän ja simulaation rajapinnassa olevat tulot, lähdöt ja välilyt Exceltaulukon. Pelkästään digitaalisia ja analogisia signaaleja käytiin läpi lähes 600. Datan suuren määrän vuoksi tässä raportissa esitellään vain signaalien summataulukot. Haastavimmat rajapinnat ja mahdolliset ratkaisut niiden simuloimiseksi esitellään tässä työssä tarkemmin. Taulukointia käytettiin apuna simulaatiologiikassa tarvittavien IO- ja kommunikointimoduulien valinnassa. Tarvittavien komponenttien lukumäärä laskettiin signaalien summien ja moduulien IO-terminaalien tai porttien määrän perusteella. Simulaatiologiikaksi valittiin ABB:n AC500-sarjan logiikka. Valintakriteereitä olivat ensisijaisesti logiikkasarjan tuttuus automaatiotiimin työntekijöille, riittävä prosessoriteho ja laajennettavuus. Ohjausjärjestelmän testauksessa mahdollisesti ilmenneiden tiedonsiirto- ja kommunikointiongelmien tunnistamiseksi testausjärjestelyyn sisällytettiin väyläliikenteen monitorointia. Signaalien resoluutiot, syklit ja puutteet reaaliaikaisuudessa saattavat vaikuttaa simulointiin yllättävilläkin tavoilla, joten näihin tulee simulaatio-ohjelmaa suunniteltaessa kiinnittää huomiota. Todellisten anturien ja toimilaitteiden käyttäminen simuloitujen sijaan voi lisätä johtopäätösten luotettavuutta, mutta toisaalta hankaloittaa ja monimutkaistaa simulaatiojärjestelyn toteutusta.</p>		
Avainsanat Hardware-in-the-loop-simulointi, azimuth-potkurilaitte, laiva, alus, ohjausjärjestelmä, väyläliikenteen monitorointi		

Author(s) Simberg, Meeri	Type of Publication Bachelor's thesis	Date July 2022
	Number of pages 51	Language of publication: Finnish
Title of publication Design of test environment for an azimuth propulsor control system		
Degree programme Electrical- and automation Engineering		
<p>The aim of this thesis was to find out the main components required for the HIL-simulation equipment of Steerprop Oy's azimuth propulsor control system. The thesis focuses on HIL-testing of the control system of the azimuth propulsor, testing of and finding out the main components needed for monitoring fieldbuses. Verification of the operation of the control system and software remains at a very late stage in the projects, and the schedule for performing the tests is tight. Therefore, there is a need for a testing environment separate from delivery projects. The thesis is a type of development work. Most of the material was the company's internal documents, such as manuals, drawings, programs, and other technical documents. The analysis of the components started by collecting all the inputs and outputs in the interface of the control system and the simulation, including the bus interfaces. Almost 600 digital and analog signals alone were analyzed. Due to the large amount of data, only signal sum tables are presented in this report. The most challenging interfaces and possible solutions to simulate them are presented in more detail in this work. The tabulation was used as an aid in the selection of the IO and communication modules needed in the simulation logic. In terms of interfaces, I focused especially on the most challenging interfaces. ABB's AC500 series logic was chosen as the simulation logic. The selection criteria were primarily the familiarity to the employees of the automation team, sufficient processor performance and expandability. To identify data transfer and communication problems that may have occurred during the testing of the control system, fieldbus and network traffic monitoring was included to the testing arrangement. It would be worthwhile to think about signal sufficient accuracy and sampling frequency in terms of inputs and outputs. In the control system test environment signal resolutions, cycles, and inadequacies in timing may affect the simulation in surprising ways. Using real sensors and actuators instead of simulated ones can increase the reliability of the conclusions, but on the other hand it complicates and complicates the implementation of the simulation arrangement.</p>		
Keywords Hardware-in-the-loop-simulation, azimuth-thruster, ship, vessel, control system, fieldbus traffic monitoring		

ALKUSANAT

Opinnäytetyön aihe on hyväksytty Satakunnan ammattikorkeakoulussa helmikuussa 2022. Työn ohjaajana toimi Robotiikka Akatemian opettaja Tommi Lehtinen ja toimeksiantajayrityksen yhteyshenkilönä Lassi Lavanto.

Haluan esittää kiitokset opinnäytetyön toimeksiantajayritykselle Steerprop Oy:lle ja sen henkilöstölle ideasta ja mahdollisuudesta päästä tekemään mielenkiintoista opinnäytetyötä mukavien kollegoiden ympäröimänä. Kiitos myös Satakunnan ammattikorkeakoulun opettajille erittäin tasokkaasta opetuksesta.

Kiitokset myös perheelleni, vanhemmilleni ja siskolleni kaikesta tuesta ja kannustuksesta.

Raumalla 21.7.2022

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Additional Display	Lisänäyttö
BR	Brake Resistor
Conning display	Siltajärjestelmän graafinen informaatiojärjestelmä
CRC-summa	Cyclic Redundancy Check
CRP	Contra Rotating Propeller
DAP	Device Access Point
DP-järjestelmä	Dynaamisen paikannuksen järjestelmä
ECDIS	Electronic Chart Display and Information Systems
ECP	Engine Control Room Panel
ESU	Electric Steering Unit
FAT	Factory Acceptance Test
GPS	Global Positioning System
GSDML	General Station Description
HIL	Hardware-In-The-Loop
HMI	Human Machine Interface
IAS	Integrated Automation System
IO-lista	Input-Output-lista, tulo- ja lähtölista
IRT	Isochronous Real-Time
LCR	Local Control Panel
LRC	Longitudinal Redundancy Check
LSU	Lubrication
PLC	Programmable Logic Controller
PWM	Pulse Width modulation
RT	Real Time
RTU	Remote Terminal Unit
SCU	Steerprop Control Unit
SMU	Steerprop Motor Control Unit
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
VDR	Voyage Data Recorder, aluksen ”musta laatikko”
Vessel speed log	Laitteisto, joka mittaa aluksen vesinopeutta.
WCP	Wheelhouse Control Panel

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
2 TOIMINTASUUNNITELMA, MENETELMÄT JA AINEISTO.....	9
3 HARDWARE IN THE LOOP -SIMULOINTI	12
4 LAIVAN PROPULSIOJÄRJESTELMÄ	14
4.1 Potkurilaitteet	14
4.2 Azimuth-potkurilaitte	15
5 LAIVAN OHJAUSJÄRJESTELMÄ.....	17
5.1 Autopilottijärjestelmä.....	18
5.2 Dynaaminen paikanmääritys.....	18
5.3 Azimuth-potkurilaitteen manuaalinen käännön- ja propulsio-ohjaus	19
5.3.1 Ohjauskahva	20
5.3.2 Ohjauspaneeli	22
6 KENTTÄVÄYLÄT SIMULAATION RAJAPINNASSA.....	23
6.1 Profinet.....	23
6.2 Modbus.....	24
6.2.1 Modbus RTU	25
6.2.2 Modbus TCP/IP	26
6.3 CAN-väylä	27
6.4 NMEA 0183	27
7 OHJAUSJÄRJESTELMÄN TESTAUSYMPÄRISTÖN SUUNNITTELU	29
7.1 Järjestelmän yleiskuvaus.....	29
7.2 Tulojen ja lähtöjen taulukointi	30
7.3 Simulaatiolaitteisto.....	34
7.4 Simuloitavat rajapinnat	35
8 VÄYLÄLIIKENTEEN MONITOROINTI.....	43
8.1 Profinet.....	43
8.2 Modbus TCP	45
8.3 CAN-väylä	46
8.4 Sarjaliikenneväylät.....	47
9 POHDINTA	49

LÄHTEET

LIITTEET 1

1 JOHDANTO

Laivojen koneistojen ja järjestelmien monimutkaistuminen sekä sulautettujen järjestelmien lisääntyminen on lisännyt tarvetta kehittää myös menetelmiä niiden toiminnan ja vaatimustenmukaisuuden varmentamiseksi (Skjetne & Egeland, 2005, kohta “Introduction”). *Hardware-in-the-loop-simulointi*, lyhyesti HIL-simulointi, mahdollistaa laivan ohjausjärjestelmien testaamisen ilman fyysisen prototyypin rakentamista (Huijgens ym., 2021, s. 225). Muilla teollisuuden aloilla HIL-simulointi on jo laajasti käytössä ja on tulossa osaksi myös laivateollisuutta enenevässä määrin (Johansen ym., 2005, s. 2). Tämä työ keskittyy laivan azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän HIL-simulointiympäristön kartoittamiseen ja suunnitteluun.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Steerprop Oy:n azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän HIL-simulointilaitteistoon vaadittavat pääkomponentit. Testausympäristön on tarkoitus tulla uuteen automaation testaamiselle varattuun tilaan, joka on osa uusien tuotantotilojen hanketta. Yrityksen toiveena oli osalistan toteuttaminen azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän ja sähkökäyttöjen testaamiseen vaadittavista komponenteista. Lisäksi toivottiin väylien monitorointijärjestelmää, käyttöliittymää simulaatiolaitteistolle ja sähkö- ja elektroniikkakomponenttien testaamiseen tarkoitettua pöytää. Opinnäytetyön aikatauluksi annettiin neljä kuukautta, joten opinnäytetyön sopivan laajuuden ja aikataulullisten rajoitteiden vuoksi simulaatiolaitteiston käyttöliittymä, testauspöytä, ohjelmakoodin kirjoittaminen ja sähkösuunnittelu sekä testaamiseen tarkoitettun tilan layout-suunnittelun tekeminen rajattiin tästä opinnäytetyöstä pois. Opinnäytetyössä keskitytään azimuth-potkurilaitteen ohjausjärjestelmän ja siihen liittyvien järjestelmien HIL-testaukseen, sekä kenttäväylien monitorointiin tarvittavien pääkomponenttien selvittämiseen. Opinnäytetyönä tehty esiselvitys ja komponenttien valinta on osa ohjausjärjestelmän testausympäristön kokonaisuutta. Työ toteutettiin maaliskuu-heinäkuussa 2022.

Steerprop Oy on vuonna 2000 perustettu raumalainen metalliteollisuuden yritys, jonka pääasiallinen toimiala on laivojen azimuth-potkurilaitteiden ja niiden ohjausjärjestelmien suunnittelu ja valmistus. Yritys työllistää kaiken kaikkiaan yli 450 henkilöä yli 50 maassa. Yritys on erikoistunut tuotteissaan erityisesti vaativissa olosuhteissa

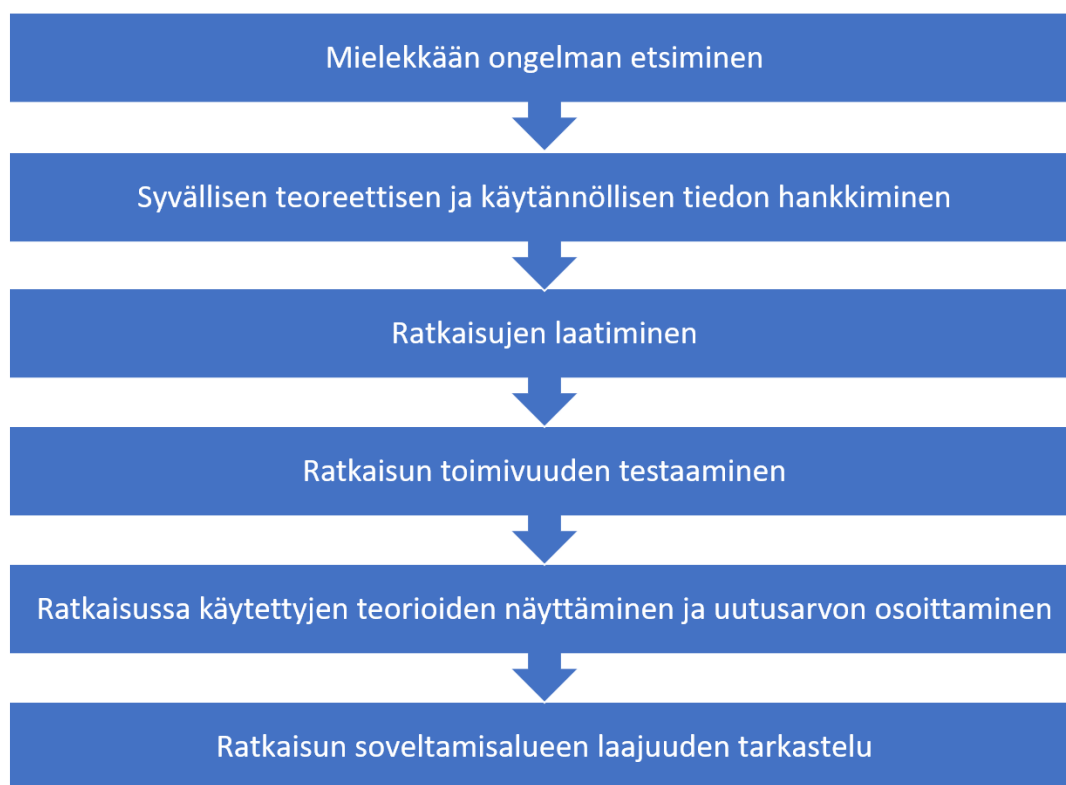
toimivien azimuth-potkurilaitteiden sekä räätälöityjen tuotteiden suunnitteluun ja valmistukseen. Joka kolmannessa maailmalla toimivasta jäänmurtaajasta on Steerprop Oy:n toimittamat potkurilaitteet. Toimitettuja yksiköitä on offshore-, hinaaja-, työvene-, risteily- ja arktisten teollisuuden aluksille yhteensä yli 900 kappaletta. Yrityksen liikevaihto vuonna 2021 oli 38,52 miljoonaa euroa. (Kauppalehti, 2022; Steerprop Oy, 2022f.)

Testausympäristö on yritykselle merkityksellinen, sillä tällä hetkellä laivan potkurilaitteen ohjausjärjestelmää päästään testaamaan vasta tehdastestien ja merikoeajojen aikana. Näin ollen ohjausjärjestelmän ja ohjelmiston toiminnan todentaminen jää projektissa kovin myöhäiseen vaiheeseen ja aikataulu testien suorittamiselle on tiukka. Tämä lisää myös kynnystä tehdä kontrollerin ohjelmaan muutoksia, sillä odottamattomiin yllätyksiin ei tehdastestien ja merikokeiden aikana ole varaa. Varsinaisista asiakasprojekteista irrallinen testausympäristö mahdollistaa ohjausjärjestelmän ja ohjelmien testaamisen varhaisemmassa vaiheessa projektia. Opinnäytetyössä toteutetun osalistan pohjalta suunnitellaan komponenttien sijoittelu testaamiselle varattuun tilaan ja hankitaan testauksessa tarvittavat komponentit.

Opinnäytetyö on tyypiltään kehittämistyö. Kehittämistyössä etsitään käytännön parannuksia ja ratkaisuja toimeksiantajayrityksen tarpeisiin (Ojasalo ym., 2015, s. 18–19). Kehittämistyön merkitys yrityksille on lisääntynyt entisestään alati muuttuvassa ympäristössä. Nopeasti tapahtuva globalisaatio ja digitalisaatio haastaa yrityksiä muutokseen. Kehityksen mukana pysyminen ja kehityskohteiden tunnistaminen, sekä niiden toteuttamisen osaaminen ovat tärkeitä kilpailuvaltteja. Menestyneet yritykset ovatkin usein kehityksen edistäjiä. (Ojasalo ym., 2015, s. 12–13.)

2 TOIMINTASUUNNITELMA, MENETELMÄT JA AINEISTO

Lähestymistapa opinnäytetyössä oli konstrukttiivinen ja innovatiivinen. Konstrukttiivisen tutkimuksen tuloksena syntyy konkreettinen tuotos, tässä tapauksessa suunnittelu-työ, jolla on myös teoreettisesti perusteltu ratkaisu. Innovatiivisuus ilmenee tavoitteena tuottaa ratkaisun avulla liiketoiminnallista hyötyä. (Ojasalo ym., 2015, s. 65, 83.) Konstrukttiivinen tutkimus etenee vaiheittain kehittämisideasta ratkaisuun ja ratkaisun tarkasteluun (Kaavio 1). Tähän opinnäytetyöhön sisältyy kehittämistyön vaiheet ratkaisujen laatimiseen saakka. Mielekkään ongelman etsiminen ei varsinaisesti sisällynyt opinnäytetyön tehtäviin, vaikka kehittämiskohdetta täsmennettiin opinnäytetyöprojektin aikana. Alun perin kehittämistarpeen oli kuitenkin havainnut toimeksiantajayritys. Toimivuuden testaus, toteennäyttäminen ja ratkaisun soveltamisalueen laajuuden tarkastelu jäävät ainakin osittain opinnäytetyön jälkeen tehtäviksi, sillä testaamista ei voida tehdä ennen komponenttien hankkimista, asentamista ja käyttöönottoa. Komponenttien hankkimista ja kokoonpanoa ei sisällytetty tähän opinnäytetyöhön.



Kaavio 1. Konstrukttiivisen tutkimuksen prosessin vaiheet (Ojasalo ym., 2015, s. 67).

Opinnäytetyösuunnitelman lisäksi tehtiin opinnäytetyön projektisuunnitelma, jossa kuvattiin opinnäytetyön tehtävät, aikataulu, toteutussuunnitelma, resurssit ja riskit sekä tiedonvälitys. Taulukossa 1 on kuvattu opinnäytetyöprojektiin sisältyneet tehtävät ja niiden aikataulutus. Tarkistuspisteiden avulla seurattiin opinnäytetyön etenemistä.

Taulukko 1. Opinnäytetyöprojektin tehtävät ja niiden aikataulutus.

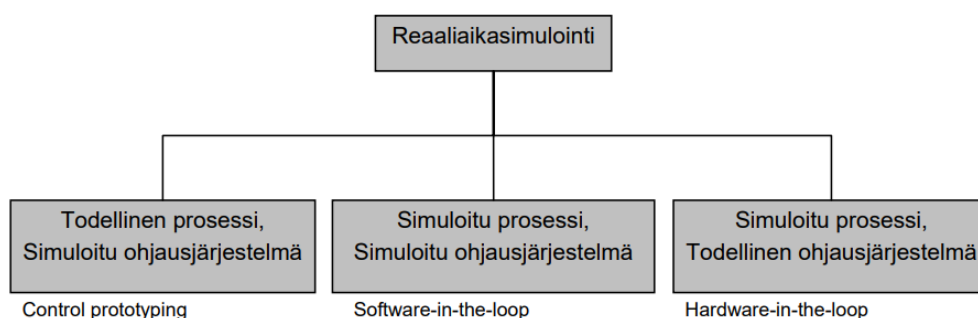
Viikot	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27
Tutustuminen aiheeseen									
Haastattelut		x							
Sopivien komponenttien selvitys				x					
Piirustusten ja taulukoiden tekeminen							x		
Laadunvarmistus									
Mahdolliset muutokset									
Kirjoitusprosessin viimeistely									x
Dokumentointi									
Opinnäytetön palautus									
Tarkistuspisteet (x)									

Projektisuunnitelman tavoitteena oli varmistaa, että opinnäytetyö tähtää selkeään päämäärään toisiinsa liittyvien tehtävien kautta. Toteutustavan tarkoituksena on lisätä suoraviivaisuutta, auttaa systemaattisten toimintatapojen omaksumisessa ja selkeyttää päämäärää sekä tavoitteita (Kylmänen ym., 2016, s. 10). Tavoitteiden, välivaiheiden ja aikataulun suunnittelu yhdessä toimeksiantajan ja opinnäytetyön ohjaajan kanssa on osa opinnäytetyöprojektia. Aiheen laajuuden ja rajaushaasteiden vuoksi tämä oli ensiarvoisen tärkeää, sillä opinnäytetyö on melko pieni ja lyhykestoinen projekti, eikä sen aikana ole mahdollista ratkaista kaikkia ongelmia (Tampereen yliopisto, 2019, s. 3–4).

Olellaisimpia resurssuja tässä opinnäytetyössä olivat ohjaajat ja kollegat, lisäksi resurssiksi voidaan ajatella työvälineet, kuten tietokone ja ohjelmistot. Merkittävä osa aineisosta on yrityksen sisäisiä dokumentteja, kuten manuaaleja, piirustuksia, ohjelmia ja muita teknisiä dokumentteja.

3 HARDWARE IN THE LOOP -SIMULOINTI

Reaaliaikaiset simulointitavat voidaan jakaa karkeasti kolmeen kategoriaan riippuen siitä, mitä osia järjestelmästä on toteutettu ohjelmallisesti ja todellista laitteistoa käyttäen (Kuva 1). Järjestelmä voi olla kokonaan toteutettu ohjelmallisesti, jolloin sekä ohjausjärjestelmä, että prosessi tai simuloitava laite, ovat simuloituja. Tällöin kyseessä on *software-in-the-loop-simulointi*. Prosessin ollessa todellinen, mutta ohjausjärjestelmän ollessa simuloitu, kyseessä on kontrollerin prototyyppi (*control prototyping*). Tässä opinnäytetyössä keskitytään reaaliaikaisen simuloinnin tyyppiin, jossa ohjausjärjestelmä on toteutettu todellisia komponentteja käyttäen ja prosessi on simuloitu. Tämän tyyppistä simulaatiota kutsutaan *hardware-in-the-loop-simuloinniksi*. (Kinnanen, 2009, s. 2; MathWorks, 2022.)



Kuva 1. Reaaliaikaisen simuloinnin tyyppejä. Tässä opinnäytetyössä käsitellään Hardware-in-the-loop-simulointia (Kinnanen, 2009, s. 2).

HIL-simuloinnissa testataan todellisen kontrollerin vastetta tietokonepohjaiselle mallille (MathWorks, 2022a; Skjetne & Egeland, 2005, kohta “Introduction”). Simulaattorin tulisi simuloida virtuaalisen mallin, hardwaren ja ohjausjärjestelmän keskinäistä vuorovaikutusta. Sen tehtävänä on lukea kontrollerin ja muiden sille tuotavien järjestelmien lähtöjä, esittää simuloitavaa järjestelmää ja vastata kontrollerialle. Virtuaalinen malli täytyy olla kirjoitettuna erilliseen tietokoneeseen tai kontrolleriin. Testattava ohjausjärjestelmä kytketään käyttäen mahdollisimman suurelta osin sen todellisia komponentteja. (Kinnanen, 2009, s. 7; Skjetne & Egeland, 2005, kohta “Plant Simulator requirements”.)

HIL-simulaation SW-to-HW-luku kuvaa, kuinka iso osa järjestelmästä ja komponenteista on toteutettu ohjelmallisesti ja toisaalta varsinaista laitteistoa käyttäen. Virtuaalinen malli voidaan toteuttaa yksinkertaisesti logiikkaohjelmoinnilla tai siitä voidaan tehdä matemaattinen fysiikkamalli. Fysiikkamallilla saadaan tarkempaa tietoa järjestelmän todellisesta käyttäytymisestä, mutta se vaatii kuitenkin enemmän osaamista ja parametreja simulaatiolle. Yksinkertaisempi malli ei vaadi yhtä paljon osaamista ja parametrien konfigurointia, mutta se voi tuottaa epätarkempaa tietoa järjestelmän todellisesta käyttäytymisestä. Usein toteutettu malli on jonkinlainen kompromissi edellä mainittuja. Mallin realistisuuden vaatimuksia päätettäessä tuleekin arvioida sen merkitystä testauksesta vedettäviin johtopäätöksiin. (Skjetne & Egeland, 2005, kohta “Characterization”.)

Simuloimalla voidaan toteuttaa erityyppisiä testejä: tehdastestejä, pitkän ajan testejä ja erilaisten päivitysten vaikutuksiin keskittyviä testejä. Sen avulla voidaan todentaa järjestelmän käyttäytymistä sellaisissa olosuhteissa tai inhimillisten virheiden seurauksena, joita ei todellisessa ympäristössä voitaisi toteuttaa. (Johansen ym., 2005, s. 3; Skjetne & Egeland, 2005, kohta “Faults and failures”.) Etuna testauksessa on esimerkiksi, että ohjausjärjestelmä voi toimia suljetussa piirissä tehdastestien (FAT) aikana (Johansen ym., 2005, s. 2; Skjetne & Egeland, 2005, kohta “HIL simulators”).

Useat anturit ja paikannusjärjestelmät käyttävät tiedonsiirtoprotokollaa, jossa on yksi tai useampia tarkistusmenetelmiä tiedon eheyden todentamiseksi. HIL-simulaattorilla voidaan simuloida myös virheentarkistusmenetelmien toimintaa ja tiedon eheydessä tapahtuneita muutoksia. Muilta osin anturien ja toimilaitteiden mallinnus voi kuitenkin olla haasteellista esimerkiksi niiden epälineaarisuudesta johtuen. (Kinnanen, 2009, s. 5; Skjetne & Egeland, 2005, kohta “Faults and failures”.)

4 LAIVAN PROPULSIOJÄRJESTELMÄ

Propulsio käsitteenä tarkoittaa voimaa, jonka tarkoituksena on aikaansaada muutos aluksen kiihtyvyydessä (Anderson, 2004, s. 483). Sillä voidaan vaikuttaa aluksen nopeuteen ja suuntaan. Laivan propulsiojärjestelmä käsittää kaikki laivan työntövoiman tuottamiseen tarvittavat järjestelmät, eli propulsiokoneistot ja niiden käyttämiseen tarvittavat apujärjestelmät. Se pitää sisällään laitteet propulsiovoiman välityksen työntövoimaksi ja kaikki valvonta-, hälytys-, turva ja ohjausjärjestelmät. Azimuth-propulsiojärjestelmä on propulsiojärjestelmän alaluokka, johon työntövoiman lisäksi kuuluu työntövoiman suuntaus kääntyvällä propulsorilla (Babicz, 2015, s. 489). Taajuusmuuttajakäyttöjen yleistyttyä sähköiset propulsiojärjestelmät ovat tulleet hallitseviksi. Propulsioon tarvittava voima tuotetaan esimerkiksi polttomoottorin, kaasui- tai höyryturbiinin (*Prime Movers*) pyörittämän generaattorin avulla ja syötetään laivan sähköverkkoon joko vaihto- tai tasajännitteenä. (Babicz, 2015, s. 175, 216.)

4.1 Potkurilaitteet

Propulsori käsittää erityyppiset laitteet laivan työntövoiman tuottamiseksi. Näihin kuuluvat esimerkiksi siipipyörät, vesisuihkut ja potkurit. Thrusterilla tarkoitetaan laivan ohjaamiseen (*manööveeraus*) tarvittavaa laitteistoa, joka tuottaa työntövoimaa sivuttaissuunnassa tai mihin tahansa suuntaan vaakatasossa. Thrusterien avulla laivat eivät ole yhtä riippuvaisia hinaajista. Thrustereiden kolmeen päätyyppiin voidaan lukea sivu- ja tunnelithrusterit, suihkuthrusterit ja azimuth-thrusterit. (Babicz, 2015, s. 489, 607.) Propulsorilla tarkoitetaan siis tarkalleen ottaen vain työntövoimaa tuottavaa laitteistoa, kun taas thrusteri-sanan merkitys sisältää työntövoiman lisäksi myös ohjailtavuuden mahdollistavan laitteiston. Suomen kielessä ei liene virallista käännöstä, joka erottelisi propulsorin ja thrusterin merkitystä toisistaan. Termi potkuri taas tarkoittaa englannin kielestä johdettua termiä propelli (*propeller*) (Dictionarypro.net, 2022), jolla viitataan potkurilaitteen työntövoimaa välittäviin lapoihin (Babicz, 2015, s. 482–483). Siksi käytän tässä opinnäytetyössä yleisesti alalla käytettyä termiä azimuth-potkurilaitte. Käsitellen ainoastaan sähkökäyttöistä propulsiota ja sen ohjausjärjestelmää, enkä tarkastele propulsorin käyttövoiman tuottoa, kuten dieselkoneikkoa,

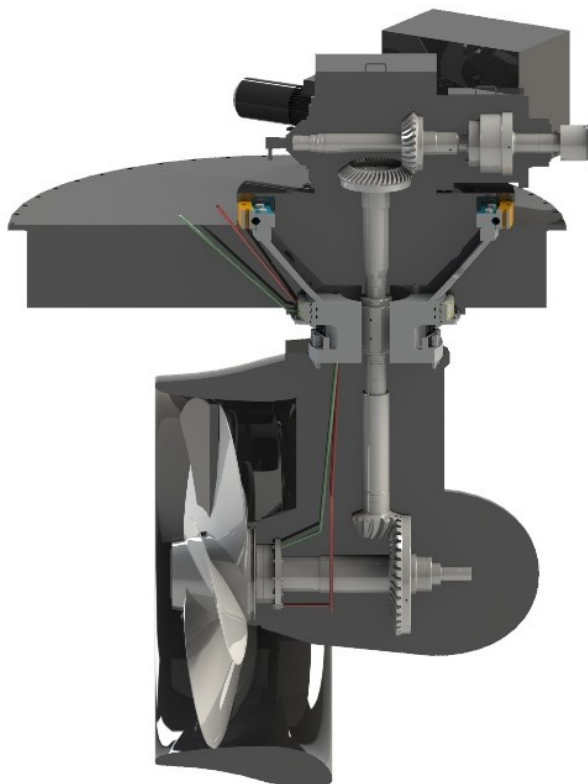
generaattoria tai näiden ohjausta. Laivalla tai aluksella tarkoitan yleisesti suurta potkurikäyttöistä alusta, enkä erittele laivojen eri alatyyppöjä tarkemmin.

4.2 Azimuth-potkurilaite

Peräsimellä varustetuissa laivoissa propulsiojärjestelmän tuottama työntövoima suuntautuu aina samaan suuntaan ja laivan kääntymiseen tarvittava työntövoiman suunnan muutos tuotetaan kääntyvällä peräsimellä. Peräsin toimii tällöin liikkuvana ohjainpintana, jolla tuotetaan laivaa kääntävä voima. Peräsin sijaitsee potkurien takana, jossa sen tarkoitus on ohjata potkurien tuottamaa veden virtausta. (Hietaharju, 2015, s. 7–8.) Perinteisen peräsinlaitteen ja kiinteiden potkurilaitteiden sijaan laivaa voidaan ohjata kääntyvillä potkurilaitteilla, toisin sanoen azimuth-potkurilaitteilla.

Azimuth-potkurilaitteet voivat pyöriä kääntökehänsä (*steering gear*) ympäri 360 astetta. Potkurilaitetta kääntämällä voidaan propulsiojärjestelmän tuottamaa työntövoimaa suunnata vaakatasossa mihin tahansa suuntaan (Amini, 2011, s. 1; Rensvik ym., 2003, s. 3). Kääntökehän kääntö on voitu toteuttaa joko hydraulisesti tai sähköisesti (DNV GL AS, 2020, s. 36). Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä hydraulisesti toteutettua kääntöä.

Azimuth-potkurilaitteita valmistetaan sekä suulakkeellisia, että ilman suulaketta ja ne voidaan jakaa työntäviin (*pusher*) tai vetäviin (*tractor*) potkureihin (Molland, 2008, s. 350–360). Azimuth-potkurilaitteet soveltuvat erityisesti hyvää ohjailtavuutta vaativiin laivoihin ja laivan ohjauskyvyn säilyttäminen kuuluu niille asetettuihin vaatimuksiin (DNV GL AS, 2020, s. 67). Niiden työntövoimaa tuottava koneikko sijaitsee laivan rungon sisällä, joka pyörittää potkuria akselien ja kartiohammaspyörien välityksellä. Tyypillisesti mekaaninen voimansiirto potkurille on L- tai Z-tyyppinen (Kuva 2). (Amini, 2011, s. 1; Molland, 2008, s. 350–360.)



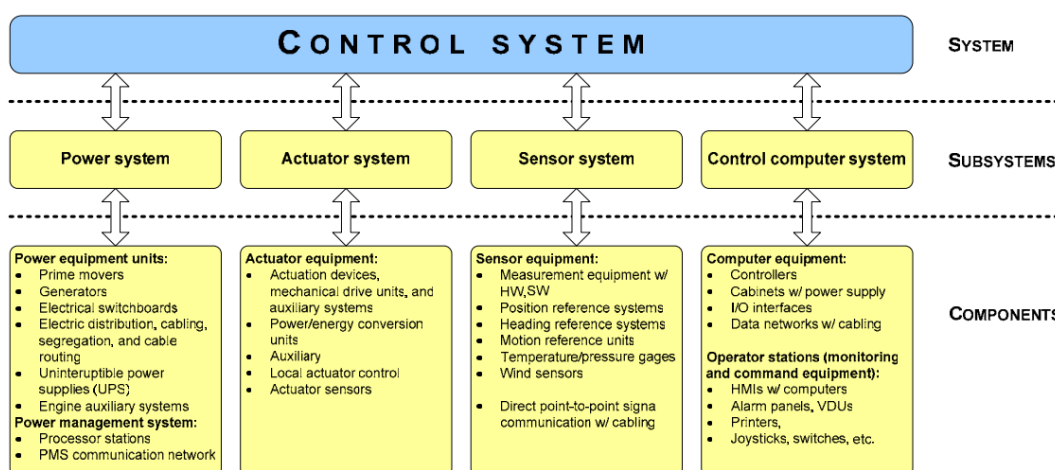
Kuva 2. Suulakkeellisen Azimuth-potkurin poikkileikkaus, jossa voimansiirto on toteutettu Z-tyyppisellä akselistolla (Steerprop Oy, 2022a.). Kuvan julkaisuun on pyydetty tekijän lupa.

Azimuth-potkurilaitteisiin luokitellaan myös kääntyvät, koteloituneet potkurilaitteet (*podded propulsorit*), joissa työntövoiman tuottava sähkömoottori on kytketty suoraan potkurin akselille ja on integroitu potkurilaitteen kotelon, niin sanotun *podin* sisälle. Näiden kahden kääntyvän potkurityypin yksi merkittävä ero on potkurilaitteen koteloinnin koossa, sillä podi-tyyppisen potkurilaitteen kotelo on usein merkittävästi isompi. (Amini, 2011, s. 1; Molland, 2008, s. 350–360.) Tunnetuin podi-tyyppinen azimuth-potkurilaitte lienee ABB:n valmistama Azipod (ABB, n.d.). Yksi mainitsemisen arvoinen muunnos on myös CRP-potkurilaitte, jonka kaksi eri suuntiin pyörivää potkuria tuottavat tehoa hyvällä hyötysuhteella. CRP-potkurilaitteessa hyödynnetään työntävän ja vetävän potkurin ominaisuuksia samanaikaisesti. (Molland, 2008, s. 351–352; Steerprop Oy, 2022b.)

5 LAIVAN OHJAUSJÄRJESTELMÄ

Laiva sisältää tyypillisesti useita ohjausjärjestelmiä varsinaisen ohjaamisen lisäksi (sähkön tuotanto ja jakelu, propulsiojärjestelmät, painolastijärjestelmät, nosturit, poraus, dynaaminen paikannus, merenkulkujärjestelmät jne.), jotka voivat olla erillisiä (*stand-alone*) tai olla osa integroitua automaatiojärjestelmää (IAS). (Rensvik ym., 2003, s. 3.) Laivaa voidaan ohjata joko automaattisesti tai manuaalisesti.

Laivan ohjausjärjestelmä on usein sulautettu järjestelmä, jossa antureiden avulla saadaan tietoa esimerkiksi laivan ohjauskulmasta (Vänttinen, 2020, s. 3). Se koostuu useista osajärjestelmistä ja komponenteista (Kuva 3).



Kuva 3. Laivan ohjausjärjestelmän hierarkiakaavio (Skjetne & Egeland, 2005, kohta "Figure 1").

Laivan ohjausjärjestelmä voidaan edelleen jaotella valvontajärjestelmään (*monitoring system*), komentojärjestelmään (*command system*) ja palautejärjestelmään (*feedback control system*). Valvontajärjestelmä koostuu ohjauspaikoista, jossa sensorien välittämä data ja hälytykset esitetään ohjauksen todellisen tilan valvontaa varten. Komentojärjestelmällä ohjauspaikalta vaikutetaan ohjauksen toimilaitteisiin. Palautejärjestelmällä valvonta- ja ohjausjärjestelmän kontrollereihin kirjoitetut algoritmit ohjaavat toimilaitteita autonomisesti sensorien välittämän tiedon perusteella. (Skjetne & Egeland, 2005, kohta "System realizations".)

Vuoden 2002 jälkeen rakennettavat matkustaja-alukset ja yli kolme tonnia painavat alukset on lisäksi varustettava VDR-järjestelmällä. Se muistuttaa lentokoneista tuttua mustaa laatikkoa, jonka avulla onnettomuuteen johtavat syyt voidaan helpommin tunnistaa. VDR:n tehtävänä on kerätä dataa aluksen laitteiden tilasta ja sen hallintaan käytetyistä komennoista. (International Maritime Organization, 2019.)

5.1 Autopilottijärjestelmä

Autopilottijärjestelmä ohjaa laivaa automaattisesti annetun suuntareferenssin mukaisesti. Autopilottiohjaus voi perustua esimerkiksi reitti-, kurssi- tai keulan suuntakulmaohjeeseen. Jotta haluttu suuntakulma voidaan säilyttää, tulee aluksen ohjauksen reagoida ympäristössä tapahtuviin muutoksiin, kuten aaltojen, tuulen ja virtausten sekä aluksen nopeuden aiheuttamiin suunnan muutoksiin. (Orädd, 2010, s. 22–23.)

Autopilottijärjestelmä saa tietonsa laivan posiitiosta GPS-signaalina, hyrräkompassilta ja akustiselta korrelaatiolokilta tai nykyään yleensä doppler-lokilta (Merivoimien Esikunta, 2010, s. 138–139; Orädd, 2010, s. 22). Integroidussa autopilottinavigoinnissa alusta ohjataan ECDIS-laitteistolla, jolloin laiva kulkee annettua reittiviiva pitkin elektronisen merikarttajärjestelmän ja muiden integroitujen merenkulkujärjestelmien avulla (Merivoimien Esikunta, 2010, s. 142; Orädd, 2010, s. 22–23).

5.2 Dynaaminen paikanmääritys

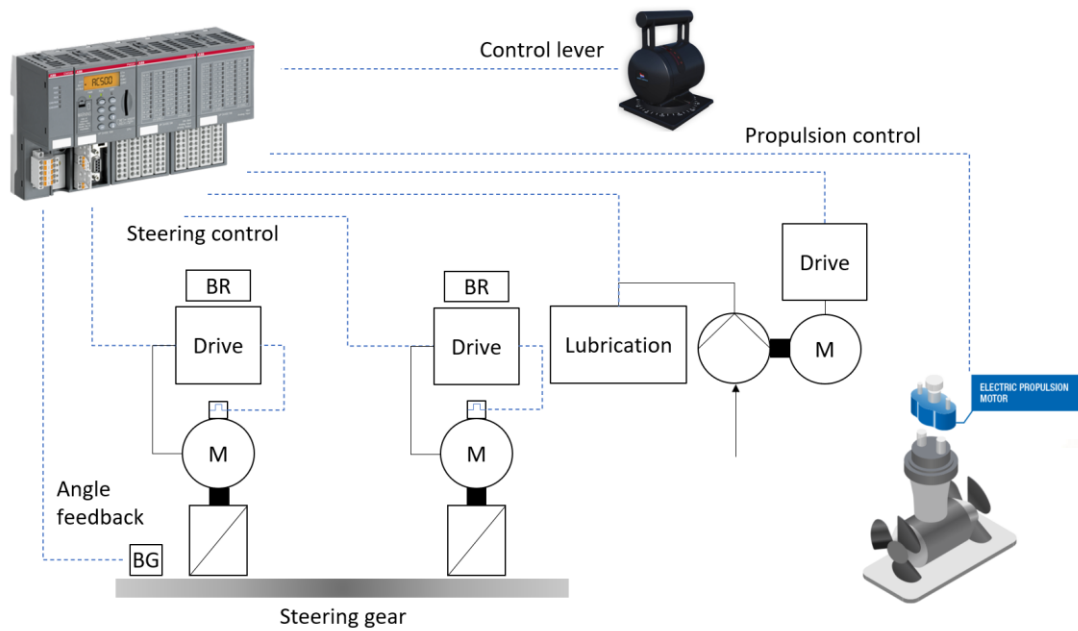
Dynaaminen paikanmääritys tarkoittaa tietokoneohjattua järjestelmää, jossa laiva pidetään tietyssä positiossa ja suunnassa sen omien potkurilaitteiden avulla. Dynaamisessa paikanmäärityksessä aluksen tulee pystyä kehittämään vastavoima alukseen vaikuttaviin voimiin. Koska alukseen vaikuttavat voimat voivat kohdistua alukseen monista suunnista, vaaditaan aluksen position pitämiseksi potkurilaitteet, jotka voivat kääntyä 360 astetta. Perinteisesti laivan pitäminen tietyssä sijainnissa ja suunnassa on vaatinut ankkurin käyttöä. (Dietmer, 2006, s. 6; Kokko, 2017, s. 7; Offshore Engineering, 2022.)

Aluksen paikan määrittämiseen käytetään samoja laitteistoja, kuin autopilottijärjestelmässä. Dynaaminen paikanmääritys vaatii matemaattisen mallin, johon edeltävässä kappaleessa mainitut muuttujat vaikuttavat. Mitattujen suureiden avulla matemaattinen malli laskee laivan paikan hallitsemiseksi oikean suunnan ja tehon propulsiolaitteille. (Kokko, 2017, s. 7; Offshore Engineering, 2022.) Azimuth-potkureita käytetään enenevässä määrin laivojen pääpropulsiolaitteena ja myös dynaamisen paikannuksen tarkoitukseen (Amini, 2011, s. 3).

5.3 Azimuth-potkurilaitteen manuaalinen käännön- ja propulsionohjaus

Manuaalisessa ohjauksessa potkurilaitteen propulsiota ja kääntymistä ohjataan ohjaukahvalla- tai sauvalla. Tässä opinnäytetyössä mallina käytetyn projektin toimitukseen propulsiomoottori ja taajuusmuuttaja ei sisällynyt, vaikka tällaisiakin kokoonpanoja Steerprop on toimittanut ja toimittaa asiakkaan tarpeiden mukaan (Koskinen, 2022). Kommunikointi propulsiomoottoria syöttävän taajuusmuuttajan ja ohjausjärjestelmän välillä on toteutettu digitaalisilla ja analogisilla tuloilla ja lähdöillä. Näistä digitaalisia signaaleja ovat esimerkiksi käynnistys ja pysäytys, sekä teho- ja kierroslukumoodin välinen valinta. Propulsiomoottorin taajuusmuuttajalle on myös väyläyhteys. Kierroslukureferenssi, tehopalaute ja vääntövoimapalaute ovat analogisia signaaleja. (Steerprop Oy, 2022d; Tamminen, 2020.)

Kääntömoottorit ja niiden käytöt ovat toimilaitteita, jotka pyörittävät kääntökehää ja vaikuttavan potkurilaitteen suuntakulmaan. Kääntömoottoreita syöttävien taajuusmuuttajien ja ohjausjärjestelmän välinen kommunikointi on toteutettu kenttäväyläyhteysillä, joskin moottorien tai jarruvastusten ylikuumentumisesta saatava palaute on toteutettu digitaalisilla- ja analogisilla tuloilla (Tamminen, 2020). Potkurilaitteen manuaalisen ohjauksen yksinkertaistettu lohkokaavio on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Yksinkertaistettu propulsio- ja käännönohjauksen lohkokkaavio (Steerprop Oy, 2021).

Kääntömoottorien taajuusmuuttajille ohjausreferenssit, kuten nopeus-, ramppi- ja vääntömomenttiohje lähetetään väylää pitkin ohjaussanassa (*Control Word*). Moottorin ja taajuusmuuttajan todellisesta tilasta kertovat parametrit, kuten nopeus, vääntömomentti, taajuusmuuttajan lämpötila, moottorivirta, DC-piirin jännite ja hälytykset, palautuvat ohjausjärjestelmälle tilasanassa (*Status Word*). (Steerprop Oy, 2022e.)

5.3.1 Ohjauskahva

Manuaalista ohjaamista varten laivan ohjausjärjestelmä on varustettu ohjauskahvalla ja usein myös ohjaussauvalla. Azimuth-potkurilaitteen ohjaamiseen on olemassa kääntyvien potkureiden ohjaamiseen suunniteltuja kahvoja, joissa ohjauskulma asetetaan pyörittämällä kahvaa pystyakselinsa ympäri. Kahvaa voi pyörittää akselinsa ympäri 360 astetta ja potkurilaitte seuraa kahvan asettamaa kulmareferenssiä. Nopeuskahva liikkuu eteen ja taakse, yleensä asteikkona nolasta sataan prosenttiin (Kuva 5). Ohjauksessa on vältettävä sellaisia kulmia, jossa potkurit voisivat häiritä toistensa toimintaa. (Kwant Controls, 2017; Tamminen, 2022c, s. 4.)



Kuva 5. Kwant Controls RSCU-H96 azimuth-kahva.

Kwant Controlsin RSCU-H96 azimuth-kahva sisältää kaksi kahdennettua, identifioitua (*Node-ID*) piiriä, joista toinen on nopeusreferenssiä ja toinen kulmareferenssiä mittaavan anturin piiri. Tiedonsiirto ohjausjärjestelmän etäyksikön ja kahvan välillä on toteutettu CAN-protokollalla. CAN-viestikehyksen ensimmäinen sana sisältää kulma- ja nopeusreferenssien arvot. Kahvassa on erilliset CAN-väylät pää- ja varaohjaukselle. (Steerprop Oy, 2022b; Tamminen, 2020.)

5.3.2 Ohjauspaneeli

Tyypillisesti ohjaukseen yhteydessä on myös ohjauspaneeli, josta voidaan tehdä ohjaukseen liittyviä valintoja (Kuva 6). Ohjauspaikkoja voi olla useampia, jolloin ohjauspaikan valinta tehdään ohjauspaneelin painikkeella.



Kuva 6. WCP-paneeli, johon on sijoitettu ohjaukseen, painonappeja ja kosketusnäyttöinen käyttöliittymä (Steerprop Oy, 2022h). Kuvan julkaisuun on pyydetty tekijän lupa.

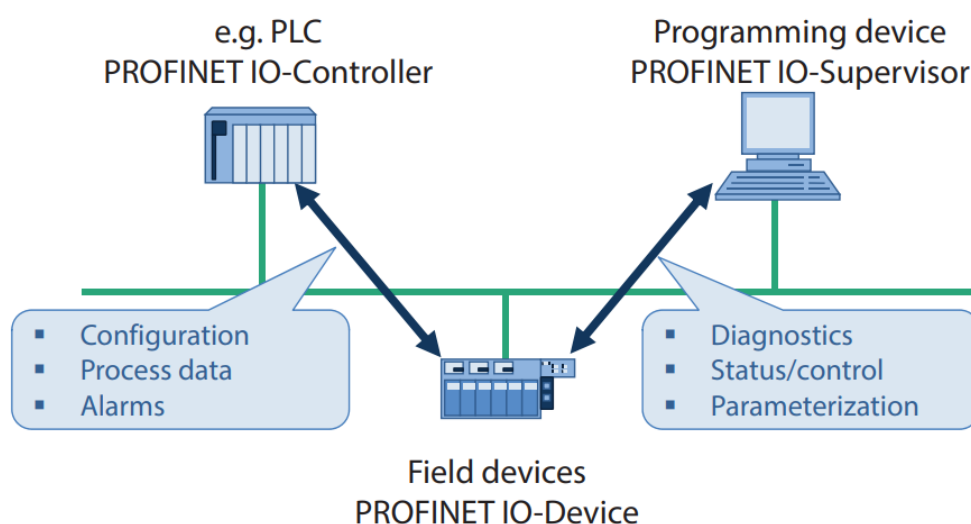
Toisinaan ohjauspaikan valintaan voidaan liittää myös ohjauspaikan hallinnan vapautus, jolloin edeltävältä ohjauspaikalta tarvitaan lupa uuden ohjauspaikan hallintaan ottoon (ns. *kättelysignaali*). Ohjauspaneelissa on kosketusnäyttöinen HMI ja lisäksi usein joitakin painonappeja. (Steerprop Oy, 2022e.)

6 KENTTÄVÄYLÄT SIMULAATION RAJAPINNASSA

Seuraavassa kappaleessa on avattu simulaation rajapinnassa olevia kenttäväyliä. Ethernet-pohjaisista väylistä rajapintana on pääohjausjärjestelmän puolella käytetty Profinet ja varaohjauspuolella Modbus TCP. Muita väylärajoitintoja ovat sarjaliikenne-pohjaiset NMEA 0183, Modbus RTU ja CAN-väylä.

6.1 Profinet

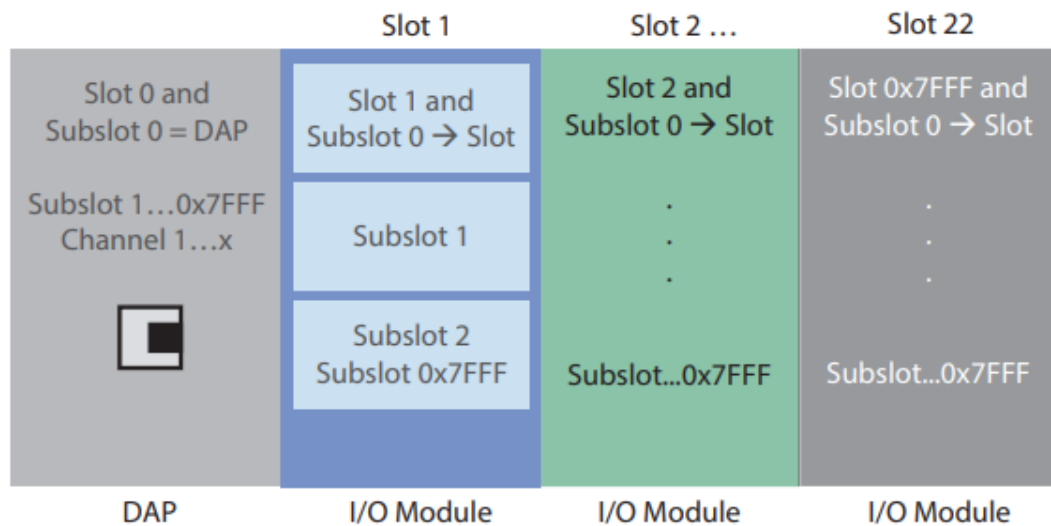
Profinet on teollisuuden Ethernet-pohjainen kenttäväylä, joka noudattaa tuottaja-kuluttaja-tiedonsiirtoprotokollaa (*producer-consumer*). Se on standardoitu IEC 61158 ja IEC 61784 standardeissa. Profinet-väylässä IO-kontrolleri on tyypillisesti ohjelmoitava logiikka, joka toimii väylässä tuottajana lähettämällä dataa väylän kuluttajalaitteille. IO-laite (*IO-device*) on hajautettu kenttälaitte, joka on yhdistetty yhteen tai useampaan kontrolleriin Profinet-väylässä. IO-valvoja (*IO-supervisor*) voi olla esimerkiksi käyttäjän tietokone, HMI tai ohjelmointilaitte (Kuva 7). (PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO), 2014, s. 2–3.)



Kuva 7. Profinet-väylän erityyppiset laitteet (PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO), 2014, s. 3).

Profinetissä laitemalli kuvailee kenttälaitteita niiden teknisten ja toiminnallisten ominaisuuksien perusteella. Laitemalli luokitellaan omaan laiteperheeseensä DAP:n

avulla. DAP tarkoittaa liityntäpistettä ohjelmakoodin ja Ethernet liitynnän rajapinnassa. Profinet-väylässä IO-laitteet on jäsennelty *slotteihin*. Slot kuvailee IO-moduulin sijoittumista modulaarisessa IO-kenttälaitteessa. Slotissa sijaitsevat *subslotit* muodostavat todellisen rajapinnan (tulot/lähdöt) ohjattavaan prosessiin (Kuva 8). Syklinen IO-data osoitetaan slotin ja subslotin yhdistelmän perusteella oikealle laitteelle. (PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO), 2014, s. 3.)



Kuva 8. IO-datan osoitteistaminen PROFIBUS DP-väylässä slottien ja subslottien perusteella (PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO), 2014, s. 3.).

Kenttälaitteille on ladattava niiden GSDML-tiedostot, joissa kuvataan Profinet-kenttälaitteen ominaisuudet ja toiminnot. Nämä laitekuvaustiedostot sisältävät laitteen tekniset ja tiedonsiirtoon tarvittavat tiedot. Kenttälaitteen valmistaja toimittaa XML-pohjaiset GSD-tiedostot. (PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO), 2014, s. 3.)

6.2 Modbus

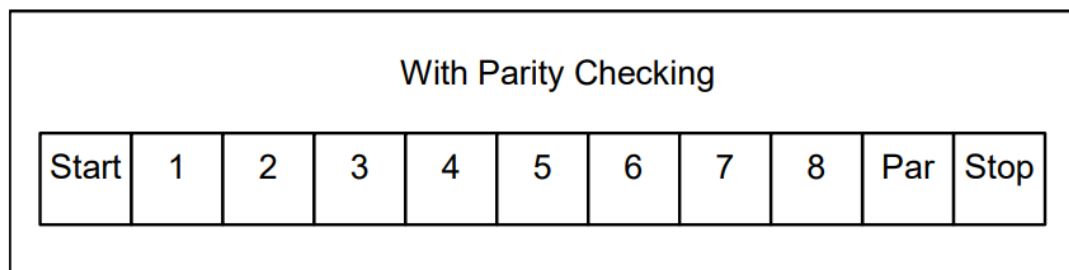
Modbus on isäntä-orja-protokollalla toimiva kenttäväylä, jonka sarjamuotoisesta liikenteestä on olemassa kaksi versiota: datan esitysmuodoltaan tekstipohjainen Modbus ASCII ja kompakti binäärinen Modbus RTU. Sarjaliikenneprotokollan tyyppi kuvaa viestien bittisisältöä ja sitä, miten informaatio on pakattu. Jokaisen Modbus sarjaliikenneväylään liitetyn laitteen tulee käyttää samaa sarjaliikenneprotokollatyyppiä. Tämä asetus käyttäjän täytyy laitteita väylälle liittäessään asettaa. Oletusasetuksina

laitteissa tulee olla Modbus RTU. Modbus ASCII käyttää viestin eheyden tarkistamiseen CRC-summaa ja Modbus RTU LRC-summaa. (Modbus-IDA, 2006, s. 12,19; Viitanen, 2022.)

Modbus-väylään liitettäville laitteille annetaan yksilöllinen osoite ja niistä jokainen pystyy lähettämään Modbus-komennon, joskin isäntä-orja-tyyppinen kommunikointi on tyypillisin. Modbus-komento osoitetaan tietylle laitteelle sen Modbus-osoitteen perusteella, jolloin vain osoitteen omakseen tunnistava laite suorittaa komennon, vaikka kaikki laitteet voivat komennon vastaanottaa. (Viitanen, 2022.)

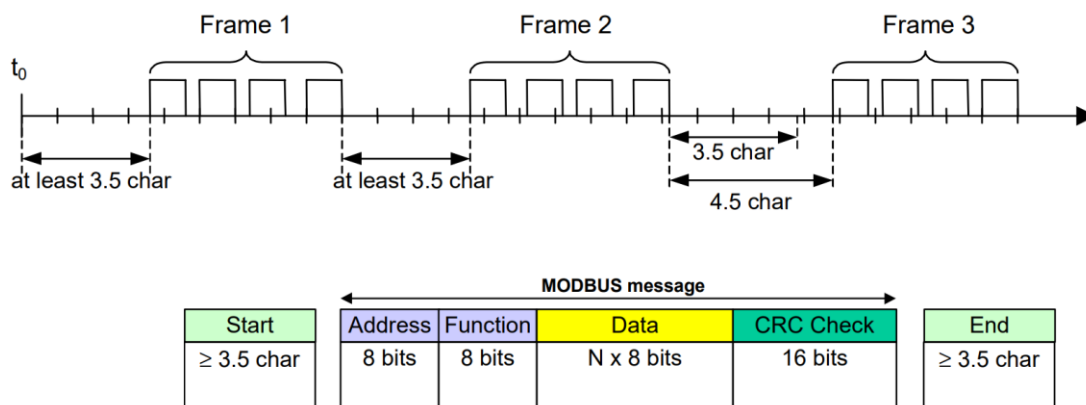
6.2.1 Modbus RTU

Laitteiden kommunikoidessa Modbus sarjaliikenneväylässä käyttäen RTU-moodia, jokainen kahdeksan bitin tavu sisältää kaksi neljä bittistä heksadesimaali merkkiä. Suurempi merkkitiheys verrattuna ASCII-moodiin mahdollistaa paremman datan siirron samalla tiedonsiirtonopeudella. Jokainen viesti lähetetään jatkuvana merkkijonona. Oletuksena Modbus RTU-moodissa käytetään parillista tarkistusbittii (*pariteettibitti*) (Kuva 9).



Kuva 9. 11-bittinen Modbus RTU-sekvenssi sisältää oletuksena parillisen pariteettibitin (Modbus-IDA, 2006, s. 12).

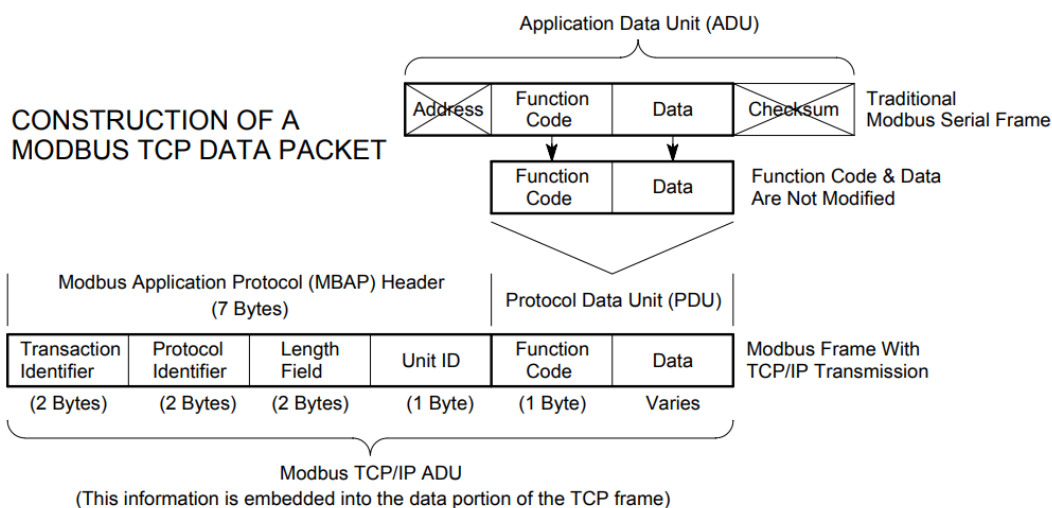
Jos pariteettibitti halutaan jättää pois, täytyy merkkijonossa olla viimeisenä kaksi lopetusbittii. Eniten merkitsevät tavut esiintyvät Modbus RTU-liikenteessä vasemmalta oikealle. Modbus RTU-kehys voi sisältää korkeintaan 256 tavua, josta viestin pituus voi olla 252 tavua (Kuva 10). (Modbus-IDA, 2006, s. 13; Viitanen, 2022.)



Kuva 10. Modbus RTU -kehys voi sisältää korkeintaan 256 tavua, josta data-alueen pituus voi olla korkeintaan 252 tavua (Modbus-IDA, 2006, s. 13).

6.2.2 Modbus TCP/IP

Modbus TCP/IP on yksinkertaisesti Ethernet-verkossa toimiva Modbus RTU-protokolla TCP/IP-liitännällä. TCP/IP määrittelee Modbus TCP-liikenteessä siirtoprotokollan, mutta tiedon tulkintaan tarvitaan Modbus-sovellusprotokolla. Tiivistettynä Modbus TCP/IP-viesti on standardi Modbus-viesti kapseloituna TCP/IP-pakettiin Ethernet-verkossa (Kuva 11). (Acromag Incorporated, 2005, s. 4.)



Kuva 11. Modbus TCP-paketissa ei tarvita aloitus- ja lopetusbittejä, mutta muutoin viestikehys on standardi Modbus-kehys (Acromag Incorporated, 2005, s. 4).

Modbus TCP -liityntää käytettäessä sarjaliikennekehysten aloitus- ja lopetuskenttiä ei tarvita. IP-paketissa määritellyt lähettäjän ja vastaanottajan IP-osoitteet tekevät osoitteen määrittävät aloitusbitit tarpeettomiksi. Viestikehysten päättävän

tarkistussumman sijaan käytetään Ethernetin TCP/IP-linkkikerroksen tarkistussummenetelmiä. (Acromag Incorporated, 2005, s. 4; TRIO Motion Technology, 2012, s. 1.)

6.3 CAN-väylä

CAN-väylä on logistiikkaan suunniteltu sarjaliikennemuotoinen väylä, jonka fyysinen kerros (*High-Speed CAN Physical Layer*) on määritelty ISO 11898- standardissa. CanOpen määrittelee korkeamman tason protokollan CAN-väylässä, niin kutsutun ”Data Link Layer”:n OSI-mallissa. Tämä kerros määrittelee, miten dataa siirretään fyysisen kerroksen läpi solmujen välillä. (CiA, 2022; National Instruments, 2022.) Tässä opin- näytetyössä ei tarkastella syvemmin OSI-mallia.

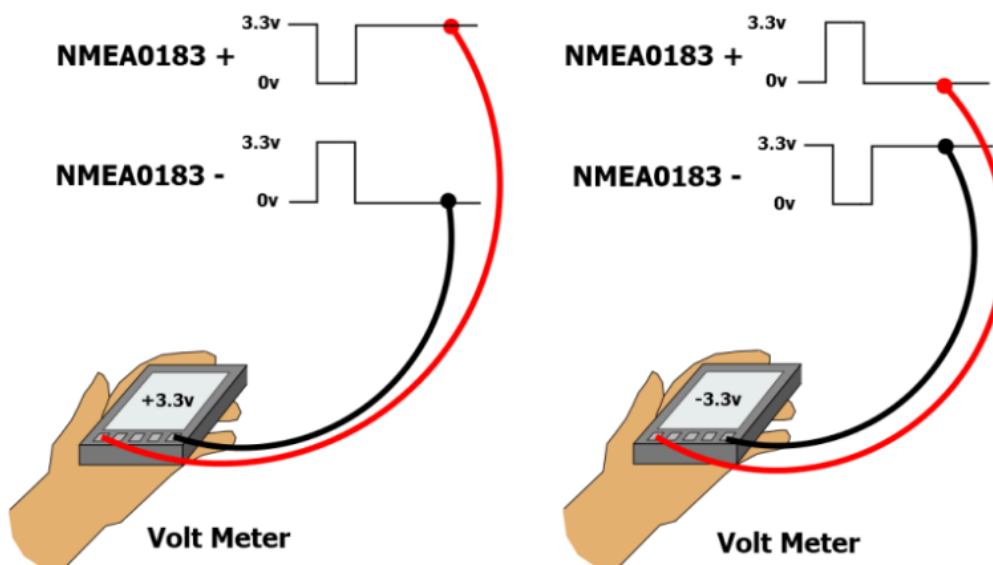
6.4 NMEA 0183

NMEA 0183 -standardi on kehitetty mahdollistamaan yhtenäisen tiedonsiirtomenetelmän merenkulun elektronisten laitteiden välillä, kuten sensorien ja näyttöjen välillä ja se on vakioväylänä myös GPS:ään liitettävien muiden navigointilaitteiden kanssa. NMEA-standardi on yhtenevä IEC 61162 standardin kanssa. Protokolla tukee yksi-suuntaista sarjaliikennettä yhdeltä puhujalta (*talker*, lähettää dataa) yhdelle tai useammalle kuulijalle (*listener*, vastaanottaa dataa). Sen tiedonsiirtonopeus on 4800 bittiä sekunnissa. (Krile ym., 2013, s. 68; National Marine Electronics Association, 2012, s. 1–2.)

Tämä data voidaan esittää ASCII-koodina, joka voi sisältää informaatiota asennosta, nopeudesta, syvyydestä tai vaikkapa taajuudesta. Tyypillinen viesti muodostuu 11–79 merkistä peräkkäin. Se ei sovellu suurta kaistanleveyttä vaativille sovelluksille. NMEA viestien lähettämisen onnistumisesta ei tule vastausta ja sen virheentarkistusmenetelmät ovat rajalliset. Meriteollisuudessa on käytössä useampia versioita NMEA 0183 -standardista, joista 0180, 0182 ja 0183 versiot 2.0:aan asti käyttävät yhtä signaalikaapelia ja yhteistä maadoituskaapelia (*common ground*) (fyysisenä kerroksena TIA-232). Tätä uudemmat standardit perustuvat kahden kaapelin differentiaaliseen

jännite-eroon (fyysisenä kerroksena RS 422). Merkittävä ero on myös tiedon sisällössä tietolauseissa (*data sentences*). (National Marine Electronics Association, 2012.)

RS 422-väylässä looginen 1, OFF tai lopetusbitti, määritellään signaalijohtimien differentiaalisella negatiivisella jännitteellä. ON tai käynnistysbitti määritellään signaalijohtimien differentiaalisella positiivisella jännitteellä. Signaalijohtimien differentiaalista jännitettä havainnollistetaan kuvassa 12. (National Marine Electronics Association, 2012, s. 2.)



Kuva 12. Signaalijohtimien differentiaalinen jännite, jossa looginen 1 havaitaan negatiivisena jännitteellä ja looginen 0 positiivisena jännitteellä (Digital Yacht, 2022).

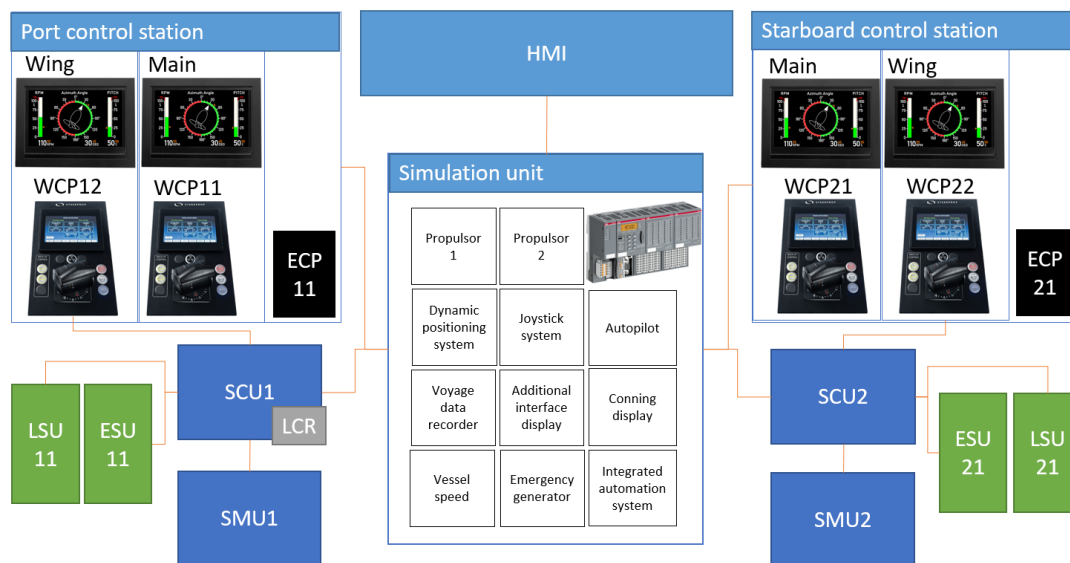
7 OHJAUSJÄRJESTELMÄN TESTAUSYMPÄRISTÖN SUUNNITTELU

Testijärjestelyn mallipohjana oli toimitusprojektin W0354-357 sähkö- ja automaatio-piirroksat. Testijärjestelyn rakenne, sijoittelu ja kytkennät suunniteltiin projektin perusteella testijärjestelyn vaatimuksiin sopiviksi. Esimerkiksi merkittävä osa kytkennöistä tullaan tekemään erotusriviliittimien (*knife disconnect terminal blocks*) kautta, jotta johtokatkoja voidaan manuaalisesti simuloida (Phoenix Contact, 2022b). Simuloitavaksi malliksi suunniteltiin kahden potkurilaitteen mallia, jolloin eri potkurilaitteiden ohjausjärjestelmien tiedonsiirtoa keskenään voidaan myös testata. Toinen simuloituista potkurilaitteen malleista on paapuurin ja toinen styyrpuurin puolen potkuri. Paapuri ja styyrpuuri määrittelevät, kummalla puolen laivan runkoa potkuri fyysisesti sijaitsisi laivan perästä keulaa kohti katsottuna.

7.1 Järjestelmän yleiskuvaus

Testijärjestelyyn sisältyy kaksi moottorinohjausyksikköä (SMU), johon sijoitellaan virtalähteet ohjausjärjestelmän yksiköiden (SCU) ja simulaatioyksikön virransyöttöä varten. Kumpikin SCU sisältää pää- ja varaohjausjärjestelmän. Moottorinohjausyksiköihin sijoitellaan myös taajuusmuuttajien ohjaukseen liittyvät releet ja koskettimet. Simuloituja käänmöottoreita ja niiden taajuusmuuttajia suunniteltiin simulaatiojärjestelyyn tulevan kaksi kummankin puolen potkurilaitteelle.

Taajuusmuuttajia testijärjestelyyn on suunniteltu kaksi kummallekin ohjausjärjestelmälle: yksi käänmöohjauksen taajuusmuuttaja (ESU) ja yksi voitelupumpun taajuusmuuttaja (LSU). Ohjausjärjestelmän yksiköihin suunniteltiin kaksi WCP-ohjauspaneelia ja yksi ECP-ohjauspaneeli, kummallekin simuloitulle potkurilaitteelle omansa. Ohjauspaneeleista WCP-paneeleihin sisältyy ohjaukahvat. Toiseen ohjausjärjestelmän yksikköön suunniteltiin paikallisohjauspaneeli (LCR). Simulaatioyksikkö pitää sisällään ABB:n logiikasta, IO- ja kommunikointimoduuleista koostuvan kokonaisuuden. Simulaatioyksikköön suunniteltiin varaus tulevaisuudessa toteutettavaa käyttöliittymää varten. Yleiskuva kokonaisuudesta on esitetty kuvassa 13. Testausjärjestelyn tarkempi systeemilohkokaavio on esitetty liitteessä 1.



Kuva 13. Simulointijärjestelyn yleiskuva (Kaaviossa käytetyt pikkukuvat: (ABB AG, 2022d; DEIF, n.d.; Steerprop Oy, 2022h).

7.2 Tulojen ja lähtöjen taulukointi

Komponenttien selvitys aloitettiin keräämällä kaikki ohjausjärjestelmän ja simulaation rajapinnassa olevat tulot ja lähdöt, myös väyläraajapinnat, Excel-taulukkoon. Excel-taulukosta käytiin läpi ohjausjärjestelmän eri rajapintojen välillä tarvittavat tulot ja lähdöt. Lista tuloista ja lähdöistä otettiin toimitusprojektin W0354-357 IO-listasta. Rajapinnat käytiin läpi myös projektin sähkö- ja automaatiopiirroksista, sekä PLC-ohjelmasta. Taulukointia käytettiin apuna simulaatiologiikassa tarvittavien IO- ja kommunikointimoduulien valinnassa.

Tässä kappaleessa esitettäviin taulukoihin on tiivistetty edellä mainitusta Excel-taulukosta poimittujen tulojen ja lähtöjen summat. Excel-taulukko muodostui lopulta niin suureksi, että sitä ei voitu kokonaisuudessaan opinnäytetyön raporttiin liittää. Pelkätään digitaalisia ja analogisia tuloja ja lähtöjä käytiin läpi eri rajapinnoista lähes 600. Kyseisessä Excel-taulukossa eriteltiin tarkemmin signaalien tyypit, tietotyypit, muutujien nimet ja kohdelaitteet.

Taulukossa 2 on taulukoitu kaikki päälogiikoiden, sekä paapuurin, että styyrpuurin puolen potkurin ohjausjärjestelmän, välillä siirrettävät tulot- ja lähdöt. Suurin osa signaaleista sisältyy näiden pääohjausjärjestelmien rajapintoihin.

Taulukko 2. SCU1 ja SCU2 päälogiikoiden tulojen ja lähtöjen summa Excel-tilustusta.

Input/Output type	Inputs (from simulation to the control system PLC) Outputs (from control system to the simulation PLC)	Total
Digital	Inputs	82
Digital	Outputs	32
Analog	Inputs	26
Analog	Outputs	14
Fast counter	Inputs	4

Varaohjausjärjestelmä on pidetty yksinkertaisena, sillä sen perimmäisenä tarkoitus on täyttää luokan vaatimus laivan ohjauskyvyn varmistamisesta tilanteessa, jossa päälogiikkaa vioittuu, eikä sitä pystytä käyttämään. Esimerkiksi DNV-luokan säännöissä redundanttisuudesta on määrätty seuraavalla lauseella:

” According to IACS UI SC242 each steering propulsion unit for SOLAS vessels shall have at least two steering actuating systems. A single failure shall neither lead to loss of steering of the vessel, nor consequential damage to the thrusters.” (DNV GL AS, 2020, s. 45.)

Edellä mainitusta seikasta johtuen varaohjausjärjestelmän ja simulaatiologiikan välillä siirrettäviä signaaleja on hyvin vähän (Taulukko 3). Toinen syy on, että iso osa anturiedoista on toteutettu kahdentamalla saman anturin lähettämä signaali rinnakkaisten releiden avulla. Näin ollen, kun tietty anturi on kertaalleen otettu huomioon pääohjausjärjestelmän simuloinnin suunnittelun yhteydessä, tulee se otetuksi huomioon myös varaohjauspuolella. Merkittävin varaohjausjärjestelmälle lähetettävä signaali on kulma-anturin lähettämä kääntökulman asentotieto.

Taulukko 3. SCU1 ja SCU2 varalogiikoiden tulojen ja lähtöjen summa Excel-tilustusta.

Input/Output type	Inputs (from simulation to the control system PLC) Outputs (from control system to the simulation PLC)	Total
Digital	Inputs	0
Digital	Outputs	8

Analog	Inputs	2
Analog	Outputs	2

Myöskin etäyksikön kanssa vaihdettavaa tietoa simulaation rajapinnassa on melko vähän (Taulukko 4), sillä suurin osa signaaleista kulkee etäyksikön, ohjauskahvan sekä pää- ja varalogiikan välillä. Näin ollen laajaa rajapintaa simulaatiologiikan kanssa ei muodostu.

Taulukko 4. SCU1 ja SCU2 etäyksiköiden tulojen ja lähtöjen summa Excel-taulukosta.

Input/Output type	Inputs (from simulation to the control system PLC) Outputs (from control system to the simulation PLC)	Total
Digital	Inputs	2
Digital	Outputs	4
Analog	Inputs	2
Analog	Outputs	2

Merkittävimmät etäyksikön ja simulaatiologiikan välisistä signaaleista ovat autopilot-tijärjestelmän signaalit, sekä NMEA 0183 sarjaliikenne Vessel speed log- ja Additional display -rajapintojen välillä. Myös muut kenttäväyläraajapinnat on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Kenttäväyläraajapintojen lukumäärä simulaatiologiikalle.

Interface	Field bus type	Unit	Ports	Count/SCU	Total
VDR	NMEA 0183	PLC	COM1, COM2	1	2
Conning Display	Mod-bus RTU	RS1	COM1, COM2	1	2
IAS	Mod-bus RTU	RS2	COM1, COM2	1	2

Vessel speed log	NMEA 0183	PNIO	COM1, COM2	1	2
Steering angle feedback for angle indicators BG11	Ca-nOpen	PNIO	COM3	1	2

Edellä esitettyjen taulukoiden lisäksi Excelissä muodostettiin summataulukko (Taulukko 6), jotta simulaatiologiikassa vaadittavien IO- ja kommunikointimoduulien lukumäärä saatiin selville. Taulukossa tulot ja lähdöt on esitetty samalla tavalla ohjausjärjestelmän logiikoiden näkökulmasta, kuin yllä olevissakin taulukoissa.

Taulukko 6. Kaikki tulot ja lähdöt yhteenlaskettuna.

Inputs (from simulation to the control system PLCs)	Total
Outputs (from control system to the simulation PLC)	
Digital Inputs	84
Digital Outputs	44
Analog Inputs	30
Analog Outputs	18
Fast Counter Inputs	4

Tarvittavien komponenttien lukumäärä laskettiin signaalien summien ja moduulien IO-terminaalien tai porttien määrän perusteella. Tulokseksi saadut desimaaliluvut luonnollisesti pyöristettiin aina ylöspäin, jotta kytkentäpisteitä todella on riittävästi. Taulukoinnin perusteella selvitettiin rajapintojen simuloimiseksi tarvittavat merkittävimmät komponentit. Pieniä tarvikkeita, kuten riviliittimiä tai johtimia, ei taulukoitu. Toimeksiantajan toiveena oli, että simulaatio voitaisiin toteuttaa mahdollisuuksien mukaan varsinaisissa toimitusprojekteissa käytettyjä komponentteja käyttäen (Lavanto, 2022). Mitä pidemmälle ohjausjärjestelmä on toteutettu sen todellista laitteistoa käyttäen, sitä luotettavampana testausta voidaan pitää (Skjetne & Egeland, 2005, kohta “Level of modeling”).

7.3 Simulaatiolaitteisto

Simulaatiologiikaksi valittiin ABB:n AC500-sarjan logiikka. Valintakriteereitä olivat ensisijaisesti logiikkasarjan tuttuus automaatiotiimin työntekijöille, riittävä prosessoriteho ja laajennettavuus. AC500-sarjan kontrollerin ympärille voidaan rakentaa useita erityyppisiä automaatiotratkaisuja valikoimalla erilaisia kombinaatioita IO-moduuleista ja kommunikointimoduuleista (ABB AG, 2022d). Simulaatiolaitteiston komponentteja on kuvattu taulukossa 7.

Taulukko 7. Simulaatiologiikka ja tarvittavat IO- ja kommunikointimoduulit sekä lisätarvikkeet.

Product	Quantity	Terminals or Ports/Per. unit	Current consumption [mA]	Technical details
Programmable logic controller	1		150	Local max. 10 extension modules. Up to 4 communication modules.
Digital Input Module	3	32	2	
Digital Output Module	2	32	2	
Analog Input/Output Module	3	16	2	
Encoder, counter and PWM module	2	4	5	
Memory card	1	1	85	
Communication Module PROFINET	1	2	80	
Communication Module SERIAL	2	2		
Terminal Unit	1			
Terminal Unit	10			
Lithium Battery	1			

Terminal Base	1			
Fieldbus communication module	1		0,15	
Power supply	1	AC/DC		480W 24V 20A

ABB:n AC500-sarjan kontrolleriin voidaan kytkeä paikallisesti korkeintaan kymmenen IO-moduulia ja korkeintaan neljä kommunikointimoduulia (ABB AG, 2022d). Mahdollinen laajentaminen tulevaisuudessa voi näin ollen vaatia etäyksikön rakentamisen, jos ylimääräiseksi jääneet IO-terminaalit loppuvat kesken. AC500-sarjaan soveltuva etäyksikkö on ainakin CI506 Profinet-kommunikointimoduuli. Kyseisessä moduulissa on myös CANopen-rajapinta (ABB AG, 2022b). CI506-kommunikointimoduuli mahdollistaisi myös kulmanäytöille CAN-väylässä lähetettävän kulma-anturitiedon simuloinnin simulaatiologiikan kautta.

7.4 Simuloitavat rajapinnat

Tässä kappaleessa on tarkemmin esitetty rajapintoja, joiden perusteella taulukoidut simulaatiolaitteiston komponentit on valittu. Kappaleessa keskitytään etenkin haastavimpien simuloitavien signaalien ratkaisumahdollisuuksiin. Usein toistuvia, etenkin digitaalisia signaaleja, ei käsitellä tarkemmin. Rajapintoja simuloimalla ohjausjärjestelmää pyritään testaamaan niin, kuin se ohjaisi todellista potkurilaitetta.

Rajapinta: Lubrication and cooling, measurement; Lubrication and cooling, air control; Shaft seal; Shaft brake

Voitelu- ja jäähdytysrajapinnan simulointi käsittää anturit, sähkönsyöttöjen tilat, venttiilien ohjaukset ja jarrun ohjaukset ja näiden takaisinkytkennät. Huomioitavaa on, että osa tiedoista täytyy siirtää sekä päälogiikan kanssa, että varalogiikan kanssa. Kommunikointia tulee toteutettavaksi sekä digitaalisena, että analogisena. Esimerkiksi voitelun tilasta indikoivia antureita on sekä digitaalisia paine- ja pintakytkimiä, että analogisia paineantureita. Antureiden ja kytkimien simuloimiseksi simulaatiolaitteistoon varattiin riittävä määrä digitaalisia- ja analogisia IO-moduuleja.

Rajapinta: Steering gear drive control; Lubrication pump drive; Steering gear brake

Taajuusmuuttajia käytetään simulointijärjestelmässä todennäköisesti lähinnä kommunikoinnin testaukseen, sillä taajuusmuuttajan simuloiminen taajuusmuuttajan ohjelmistolla olisi todennäköisesti vaikeasti toteutettavissa. Tähän liittyen yritettiin selvittää, olisiko taajuusmuuttajavalmistajalla olemassa valmista simulaatio-ohjelmaa taajuusmuuttajille. Valitettavasti kysymykseen ei opinnäytetyön aikana saatu vastausta. Ilmeisesti ainakin Danfossilla on olemassa Microsoft Formsilla Visual Studiossa toteutettu Vacon Drivetest -ohjelma, ohjelmointikielenä C# ja Visual Basic (Viljamaa, 2020, s. 12), mutta ohjelma lienee tarkoitettu vain yrityksen omaan käyttöön.

Kääntömoottorien taajuusmuuttajien ja logiikoiden välinen tiedonsiirto (esimerkiksi Control Word ja Status Word) on toteutettu Profinet- ja Modbus kenttävylyissä. Jos taajuusmuuttajia ei voida simuloida niille tarkoitettulla simulaatio-ohjelmalla, on taajuusmuuttajien simulointi rakennettava simulaatiologiikkaan. Simulaatiologiikkaan kirjoitetaan ohjelma, joka palauttaa sille lähetettyjen referenssiarvojen perusteella taajuusmuuttajan teho-, vääntömomentti- ja nopeuspalautteen ohjausjärjestelmälle. Tähän tarvitaan myös Profinet ja Modbus kenttävylyhteydet laitteiden välille.

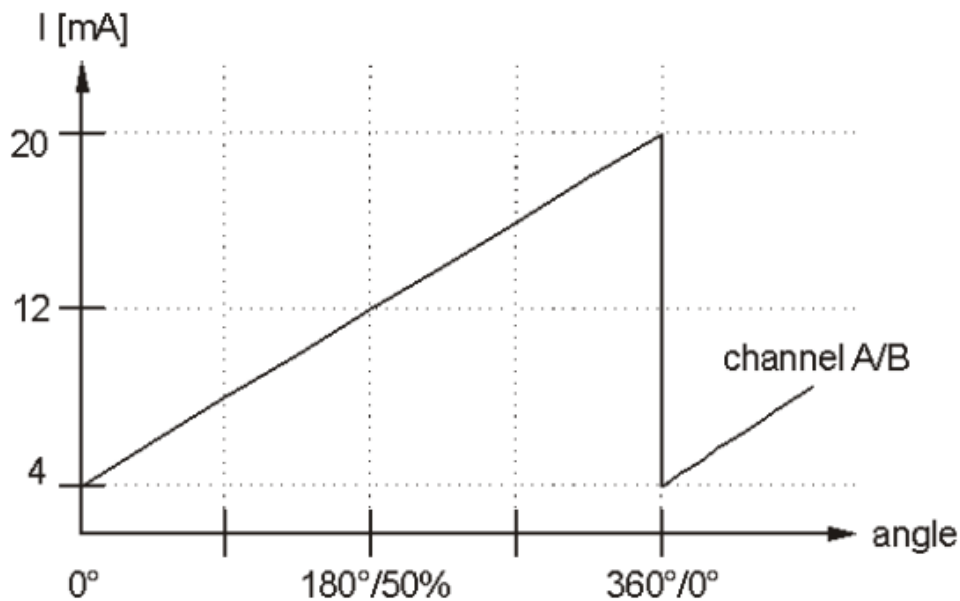
Kääntökehän solenoidijarruja ohjaavat kääntömoottorien taajuusmuuttajat. Koska varmuutta taajuusmuuttajien simuloinnin toteutuksesta ja toiminnan takaamisesta ilman kytkettyä moottoria ei saatu, päätettiin solenoidijarrujen kontrollointi siirtää simulaatiologiikalle. Varsinaiset solenoidijarrut korvataan ledeillä, jolloin jarrujen ohjauksesta saadaan indikaatio muuttamalla jarrujen todellista kytkentää vain vähän. Solenoidijarrujen tilasta ei tule varsinaista takaisinkytkentää, vaan solenoidijarrujen tila todetaan ainoastaan ohjauksella ja solenoidijarrun sulakkeen apukoskettimilla. Logiikalle lähtevän tiedon todentamiseksi sulake voidaan irtikytkeä myös manuaalisesti kääntökytkimestä. Profinet ja Modbus kommunikoinnin testaamiseksi taajuusmuuttajien ja pääsekä varalogiikan kanssa taajuusmuuttajiin tulee kaksi Ethernet-korttia. Kummassakin kortissa on kaksi Ethernet-porttia (Danfoss, 2022).

Mallipohjana käytetyssä projektissa kääntömoottoreissa on käytetty PT100-termistoria ja pumppumoottoreissa PTC-termistoria. Jos termistoria haluttaisiin simuloida tarkemmin, tähän voitaisiin mahdollisesti käyttää jonkinlaista digitaalista potentiometriä.

Löysin esimerkiksi Microchipin valmistaman 6-bittisen digitaalisen potentiometrin, jonka vastusarvoa voitaisiin säätää sarjaliikenneyhteydellä. Kyseinen digitaalinen potentiometri kestää korkeintaan 5,5 voltin jännitteen. (Microchip, 2017, s. 1.) En kuitenkaan löytänyt taajuusmuuttajavalmistajan manuaaleista tietoa, millainen jännite taajuusmuuttajan termistorilähdössä on, eikä automaatiotiimin kollegakaan osannut vastata kysymykseeni. Ohjausjärjestelmän testauksessa ei toisaalta ole olennaista simuloitavan ja todellisen termistorin vastaavuudella ja lineaarisuudella, vaan olennaista on termistorihälytyksen simulointi ja hälytyksen siirtymisen todentaminen ohjausjärjestelmälle. Näin ollen helpompi tapa toteuttaa termistorin simulointi on esimerkiksi tehdä kahdella eri vastuksella kytkennät, joista toinen on resistanssiltaan hälytysrajan alittava ja toinen hälytysrajan ylittävä vastus. Simulaatiologiikalla voitaisiin sitten ohjata digitaalisilla lähdöillä vaihtokosketinrelettä, jonka apukoskettimilla valitaan, kumman vastuksen läpi virta kulkee. Ohjaus voitaisiin toteuttaa käyttöliittymän ja simulaatiologiikan digitaalisen lähdön kautta.

Rajapinta: Steering Angle Feedback; Steering Angle Display

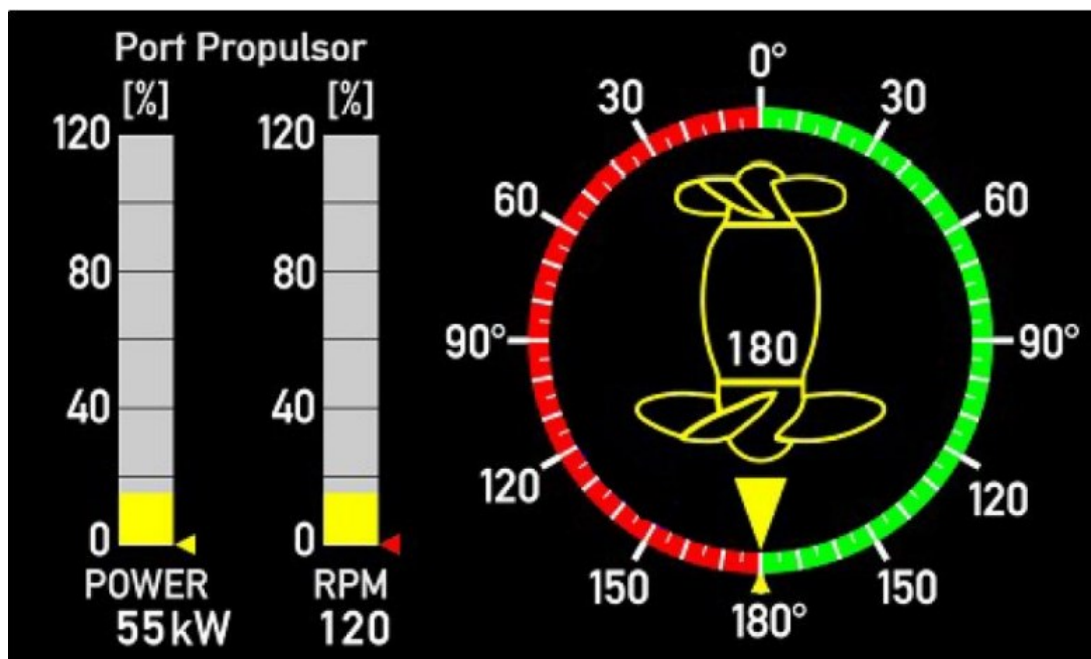
Kulmatieto on toteutettu kahdennetusti kiertymäkulmaa mittaavilla magneettisilla absoluuttiantureilla, joissa on kaksi toisistaan riippumatonta kanavaa A ja B. Anturin kiertymä on täysi 360 astetta ja siinä on erillinen kanava anturin 180 asteen kalibrointia varten. CAN-väylälle anturi lähettää datan 12-bittisenä. Kääntökulma voi siis saada kokonaislukuna arvoja väliltä 0–4095, jolloin askeleita on 4096 ja anturin resoluutioksi saadaan 0,088 astetta. Anturin asentotieto voidaan kummassakin kanavassa lähettää sekä analogiasignaalinä 4...20 mA, että CAN-väyläyhteydellä. Väylän protokolla on CanOpen. Anturi on valmistajalla aseteltu niin, että anturin kiertyessä kellonsuuntaisesti, sen lähettämä virtaviesti kasvaa ja saavuttaessaan 360 astetta putoaa takaisin alimmalle tasolle (Kuva 14). (Fernsteuergeräte, 2012.)



Kuva 14. Magneettisen kiertokulma-anturin asentotieto virtaviestinä. Anturin maksimiarvo on 359,9 astetta, jonka jälkeen sen asentotieto palaa nollaan asteeseen (Fernsteuergeräte, 2012).

Molempien antureiden analogiasignaali on liitetty pää- ja varalogiikan analogiatuloihin. CAN-väylää käytetään välittämään kulmatieto kulmaindikaattoreille. Jos kiertymäkulmaa mittaavat anturit toteutetaan simulaatiologiikalla, tulee pää- ja varalogiikalle lähetettävä analogiasignaali, sekä kulmaindikaattoreille lähetettävä CAN-väyläsignaali, vastata toisiaan. Meriteollisuuden laitteita koskevan standardin ISO 20673 mukaisesti kulmatietoa välittävän anturin väylä on varattu yksin kulmatiedon lähettämiseksi. Oletettavasti tämä seikka täytyy huomioida myös simulaatiojärjestelmässä.

Toimeksiantajayrityksen käyttämät kulmaindikaattorit ovat tanskalaisyhtiö DEIF:n valmistamia meriteollisuuteen kehitettyjä kulmanäyttöjä. Näissä näytöissä on kaksi erillistä CAN-liityntää, joista toista voidaan käyttää muiden parametrien, kuin kulmatiedon välittämiseen. (DEIF, n.d.; DEIF A/S, n.d.) Yleisesti projekteissa käytetty indikaattorityyppi on XDi 192 Multi display indicator (Kuva 15).



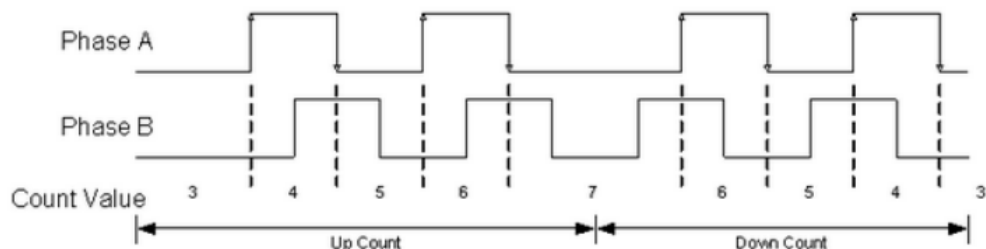
Kuva 15. DEIF:n xDi 192 Multi display kulmaindikaattori. Steerpropin käyttämät indikaatiot ovat kään-
tökulman lisäksi potkurin kierros-luku ja teho ja näiden referenssit. (Tamminen, 2022a, s. 3.)

Simulaatiologiikan pitäisi simuloida molempien antureiden analogiset asentotiedot ja lisäksi lähettää kulmatieto CAN-väylällä kulmaindikaattoreille. Tämä vaatii simulaatiologiikalta CAN-väylää tukevaa kommunikointimoduulia. CAN-väylässä kulkeva data täytyy jakaa neljälle eri kulmaindikaattorille. Vaihtoehtoinen tapa olisi käyttää esimerkiksi protokolla- ja kenttäväylämuunninta tai todellista kiertokulma-anturia, jota pyöritetään esimerkiksi pienellä servomoottorilla. Tällöin servomoottorin ohjaus tapahtuisi simulaatiologiikan kautta. Potkurin teho ja kierros-luku, sekä niiden referenssiarvot, tuodaan logiikalta kulmaindikaattorien toiseen CAN-väyläporttiin Profinet-kytkimen kautta.

Rajapinta: RPM-measurement

Kierros-luvun mittaus potkurin akselilta on toteutettu kahdella induktiivisella lähestymiskytkimellä. Näissä antureissa on kolmijohtiminen DC PNP-transistori ja anturin maksimaalinen pulssitaajuus on 800 Hz (Pepperl+Fuchs Group, 2010). Lähestymiskytkinten pulssit on tuotu logiikan digitaalituloihin omiin tuloihinsa pulsseina A ja B. Pulssien vaihesiirtokulmasta voidaan päätellä pyörimissuunta (Kuva 16). Pulssien las-
kenta varten digitaalisessa IO-moduulissa on nopeat kanavat (*fast input & fast*

output). Näiden kanavien suurin kytkentätaajuus on 50 kHz. (ABB AG, 2022c, s. 4; Viral, 2022.)



Kuva 16. A- ja B-kanavien nousevien ja laskevien reunojen perusteella voidaan tunnistaa pyörimissuunta (Cimon PLC-S, n.d.).

Jotta kierroslukuanturien lähettämiä pulsseja pystytään simuloimaan, on simulaatiologiikassa oltava IO-moduuli, josta löytyy nopea lähtö. Toimitusprojekteissa potkurin maksimaalisena kierroslukuna on käytetty 2000 rpm. Tyypillisesti pulsseja on ollut käytössä 4–6 yhdellä kierroksella. (Halkola, 2022.) Suurin taajuus, joka simulaatiologiikan pitää pystyä simuloimaan on siis 200 Hz (Kaava 1).

$$f = \frac{2000}{60} \left[\frac{1}{s} \right] \cdot 6 = 200 \text{ Hz} \quad (1)$$

Kierroslukuanturien pulssien simuloimiseen löytyi logiikkavalmistajalta IO-moduuli, jossa on kaksi pulssileveysmodulaattorilähtöä (PWM). Lähtöjen maksimi kytkentätaajuus on jopa 100 kHz. (ABB AG, 2022d, s. 6.) Pulssit A ja B pitäisi myös pystyä simuloimaan oikeassa suhteessa toisiinsa nähden.

Rajapinta: Propeller motor drive interface, digitals to drive; Propeller motor drive interface, digitals to Steerprop; Propeller motor drive interface, analog signals; Propeller motor drive interface, emergency stop

Propulsiomootorin taajuusmuuttajan ohjaukseen ohjausjärjestelmästä lähetetään re-
leiden apukoskettimien kautta esimerkiksi käynnistys (*Start drive*), pysäytys (*Stop drive*), vikatilän resetointi (*Fault reset*), käynnistyslupa (*Starting allowed*), ohjauksen nolla-asennon asentotieto, 70 prosentin kierroslukurajoitus, akselin lukitsevan

laitteen lukitustieto ja paikallisohjauksen valinta (*Local steering selected*). Taajuusmuuttajalta ohjausjärjestelmälle tulevia tietoja ovat esimerkiksi Drive ready, Power/RPM-tilatieto, Drive running, Drive off, Drive load limited ja hälytykset. Kaikki edellä mainitut ovat digitaalisia lähtöjä tai tuloja. Analogiaviestinä taajuusmuuttajalle lähetetään kierroslukureferenssi, joka on 4...20 mA analogiasignaali. Potkurin taajuusmuuttajalta ohjausjärjestelmälle tulevia analogiasignaaleja (4...20 mA) ovat teho ja vääntömomenttipalaute. Myös potkurilaitteen hätäseispiiri on kytketty potkurin taajuusmuuttajan tuloon.

Rajapinta: Voyage Data Recorder & Conning display interface

VDR- ja Conning Display -rajapinta vaatii simulaatiologiikkaan Modbus RTU -protokollaa tukevan sarjaliikennemuodulin.

Rajapinta: Integrated Automation System IAS

IAS-rajapinta vaatii simulaatiologiikkaan Modbus RTU -protokollaa tukevan sarjaliikennemuodulin.

Rajapinta: Autopilot system

Kulmareferenssi tuodaan laivan autopilot-järjestelmästä 4...20 mA signaalina Steerpropin ohjausjärjestelmälle, samoin asentokulman palaute autopilot-järjestelmälle. Pyyntö seurata autopilotin antamaa kulmareferenssiä on toteutettu digitaalisena signaalina ohjausjärjestelmältä autopilot-järjestelmälle, jolta saadaan kättelysignaali.

Rajapinta: Local control

Vaihto kauko- ja paikallisohjauksen välillä on toteutettu vaihtokytkimellä, samoin käännön suunnan valinta. Paikallisohjaus tapahtuu varalogiikan kautta. Digitaaliset ja analogiset rajapinnat potkurin moottorin taajuusmuuttajalle ja kääntömoottorien taajuusmuuttajille on toteutettu releiden kautta. Näin on saatu toteutettua sekä pääohjausjärjestelmän, että varaohjausjärjestelmän lähdöt yhteen taajuusmuuttajan tuloon. Tieto

siirtymisestä paikallisohjaukselle täytyy tuoda simulaatiologiikalle Modbus TCP-väylän kautta.

Rajapinta: Dynamic positioning interface

Kulmareferenssi tuodaan laivan DP-järjestelmästä 4...20 mA signaalina Steerpropin ohjausjärjestelmälle, samoin asentokulman palaute DP-järjestelmälle. Pyyntö seurata DP-järjestelmän antamaa kulmareferenssiä on toteutettu digitaalisena signaalina DP-järjestelmästä Steerpropin ohjausjärjestelmälle.

Rajapinta: Joystick interface

Kulmareferenssi tuodaan laivan Joystick-järjestelmästä 4...20 mA signaalina Steerpropin ohjausjärjestelmälle, samoin asentokulman palaute Joystick-järjestelmälle. Pyyntö seurata Joystick-järjestelmän antamaa kulmareferenssiä on toteutettu digitaalisena signaalina Joystick-järjestelmästä Steerpropin ohjausjärjestelmälle.

Rajapinta: Vessel speed log

Vessel speed log -rajapinta vaatii simulaatiologiikkaan ASCII-protokollaa tukevan sarjaliikennemuodulin.

8 VÄYLÄLIIKENTEEEN MONITOROINTI

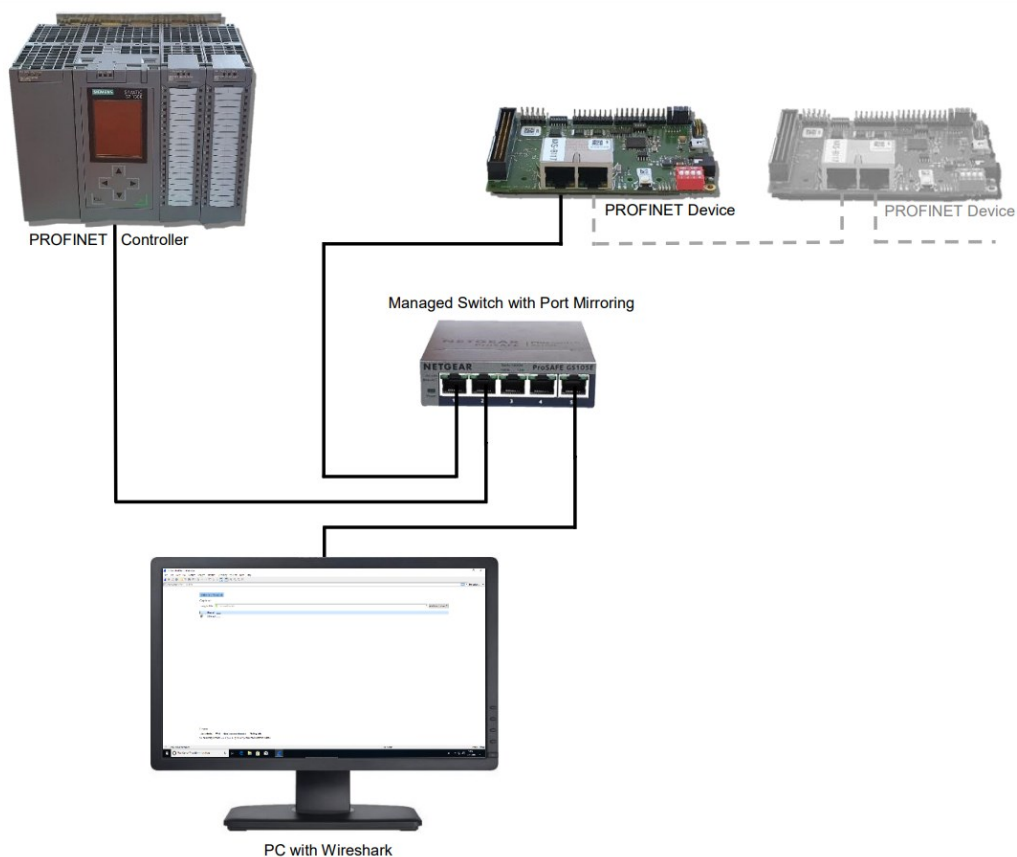
Jotta ohjausjärjestelmän testauksessa mahdollisesti ilmenneet tiedonsiirron ongelmat voitaisiin paremmin havaita ja paikantaa, haluttiin testausjärjestelyyn lisätä väyläliikenteen monitorointia. Väyläliikenteen monitorointia tai toisin sanoen Ethernet-kytkimen porttien peilausta käytetään, kun halutaan lähettää kopio yhden kytkimen portin läpi kulkevista datapaketeista toiseen porttiin, ns. monitorointiporttiin. (Hilscher, 2019, s. 33.) Porttien peilausta voidaan käyttää dataliikenteen analysointiin ja vianetsintään, sekä selvittämään kaistanleveyden käyttöä. Monitoroinnilla voidaan selvittää datapaketien törmäyksiä, lähetyksen uudelleenyrityksiä, kuittaus- ja kättelysyklejä. Nämä vaikuttavat verkon yleiseen suorituskykyyn ja kaistanleveyden käyttöön. Monitoroinnin toistamiseen käytettävässä tietokoneessa on luonnollisesti oltava vähintään yksi Ethernet-portti. (TRIO Motion Technology, 2012, s. 1.)

Väyläliikenteen monitorointia ei voida toteuttaa tavallisella Ethernet-kytkimellä. Monitorointiin vaaditaan hallittava kytkin, jonka yksi portti voidaan määrittää niin kutsutuksi peiliportiksi. Peiliportin kautta voidaan toistaa toisen portin tai porttien kautta kulkeva dataliikenne monitorointia varten. (TRIO Motion Technology, 2012, s. 1.) Kytkin asetetaan monitorointi moodiin, jolloin se varaa yhden portin väyläliikenteen peilaukseen. Lisäksi tulee valita portti, jota halutaan peilata. Monitoroitavien porttien tulee olla yhtä nopeita portteja, jotta datapaketteja ei katoa. Kaikki kytkimet eivät tue kaiken tietoliikenteen monitorointia, vaan mahdollistavat vain tietyn portin tietoliikenteen monitoroinnin. (Hilscher, 2019, s. 31.)

8.1 Profinet

Ohjausjärjestelmän testausympäristön Profinet-väyläliikennettä on tarkoitus peilata hallittavan Profinet-kytkimen kautta (Kuva 17). Peilattava kytkin on Phoenix Contactin hallittava kytkin, jonka tiedonsiirtonopeus on 100 Mbps (*full duplex, kaksisuuntainen samanaikainen tiedonsiirto*) (Phoenix Contact, 2022a). Kaikkien ohjausjärjestelmän Profinet-väylään liitettyjen laitteiden RT-luokka on RT Class 1 (Steerprop Oy, 2022c), joten erityistä IRT-kytkintä ei tarvita. Jos väylästä haluttaisiin peilata IRT-luokan tiedonsiirtoa, tätä varten tulisi hankkia oma IRT-kytkin (Hilscher, 2019, s. 32).

RT-luokka määrittelee kommunikoinnin reaaliaikaisuudelle asetetut vaatimukset. IRT on vaatimuksiltaan tiukemmin määritelty kuin RT, mutta RT on reaaliaikaisuudeltaan riittävä suurimpaan osaan sovelluskohteita. (Bowne, 2021.) RT-luokkien eroja ei käsitellä syvällisemmin tässä opinnäytetyössä.

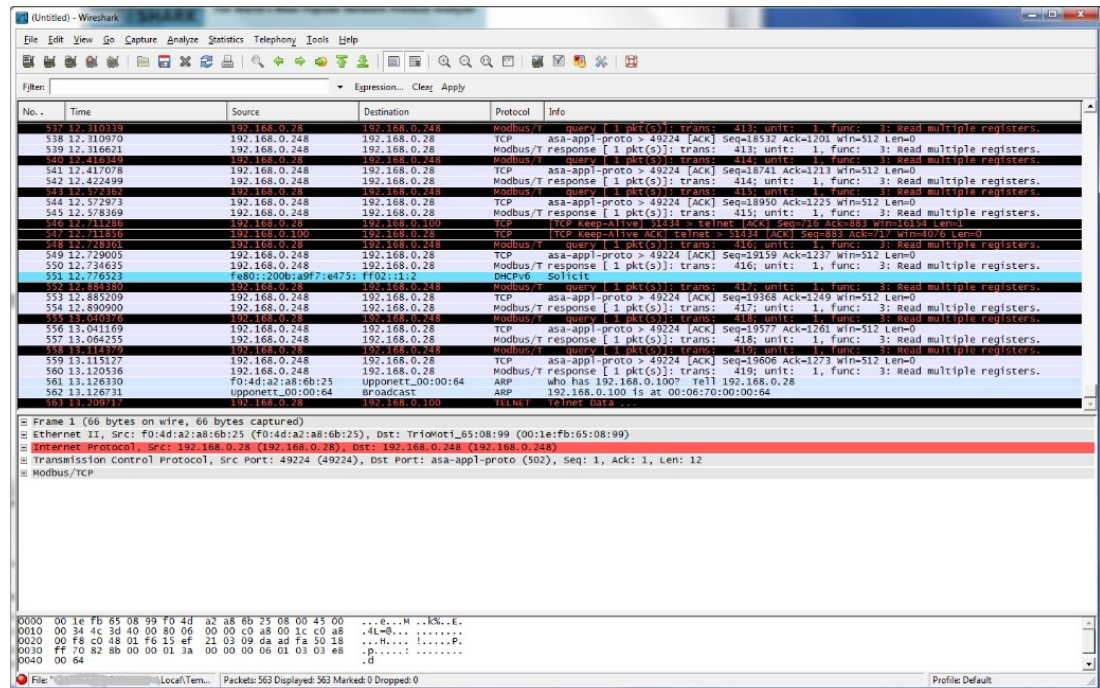


Kuva 17. Profinet-liikenteen peilaus kytkimestä Wiresharkilla (Hilscher, 2019, s. 32).

Kun kytkimen peilaamiseen käytetään tavallista hallittavaa kytkintä, voidaan kytkimestä peilata vain yhden portin kautta kerrallaan (Hilscher, 2019, s. 31). Peilattavia portteja voi olla useampia, mutta kaikkien toistettavien porttien data kulkee saman peilausportin kautta (Phoenix Contact, 2022a). Väylänmonitorointiin hankittavalle tietokoneelle asetettiin vaatimukseksi kuitenkin kaksi erillistä verkkokorttia, jotta Profinetväylästä voidaan samanaikaisesti peilata sekä SCU, että WCP-kytkimen porttia (Lavano, 2022).

Varsinainen tietoliikenteen toistaminen ja analysointi toteutetaan Wiresharkilla, joka on ilmainen avoimen lähdekoodin pakettien analysointiin tarkoitettu ohjelmisto. Wireshark esittää datan yksittäisinä paketteina dataliikenteen aikana. Dataliikennettä

voidaan myös tallentaa ja tulkita jälkeenpäin (Kuva 18). Wiresharkilla voidaan käyttää myös erilaisia suodattimia ja tilastointeja binääridatan selektiiviseen poimintaan. Wireshark mahdollistaa Ethernet-pohjaisen verkkoliikenteen analysoinnin, mutta sillä voidaan myös analysoida langattomassa lähiverkossa ja Bluetoothin kautta siirrettyä dataa. Microsoftin käyttöjärjestelmässä Wireshark käyttää tietoliikenteen tallennukseen WinPcapia. (Hilscher, 2019, s. 9–10.)

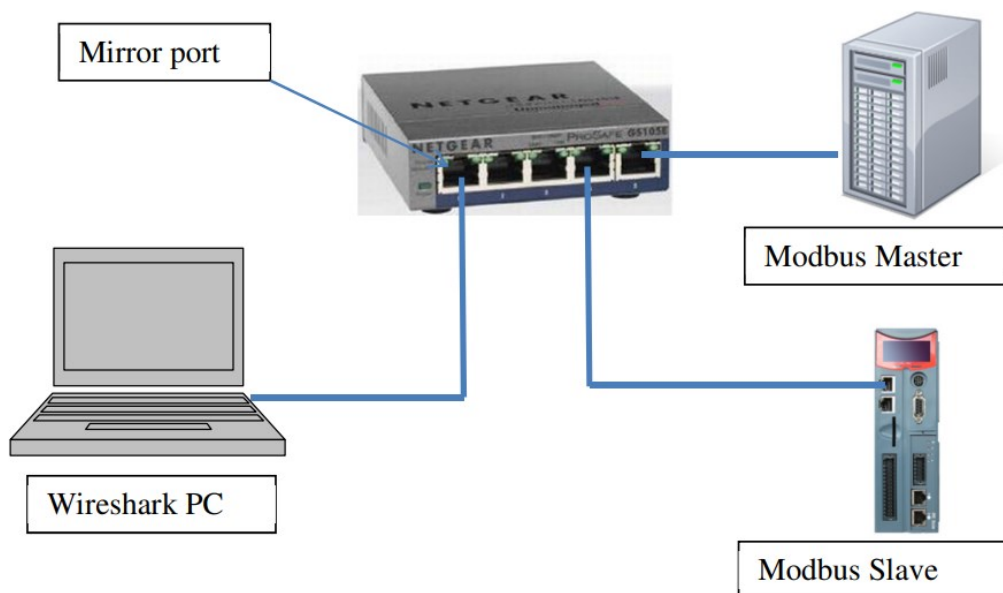


Kuva 18. Dataliikenteen monitorointia Wiresharkilla (TRIO Motion Technology, 2012, s. 4).

8.2 Modbus TCP

Modbus TCP kytkimenä käytetty Hartingin kytkin ei ole hallittava (Harting Technology Group, 2018), joten se ei sovellu väyläliikenteen monitorointiin. Koska ohjausjärjestelmän testausasetelma haluttiin pitää mahdollisimman samankaltaisena todellisen järjestelmän kanssa, toivottiin Modbus TCP-liikenteen monitorointiin hankittavan rinnalle vaihtoehtoinen, hallittava kytkin, jota voidaan käyttää varsinaisen kytkimen tilalla, kun Modbus-liikennettä halutaan monitoroida (Lavanto, 2022). Yhtenä vaihtoehtona tälle kytkimelle olisi Netgearin ProSafe Plus GS105E -kytkin (2000 Mbps), josta löytyy porttipeilaus mahdollisuus (Netgear, 2019, s. 1). Myös pääohjausjärjestelmässä käytettyä Phoenixin kytkintä voidaan käyttää. Tällöin uusia tuotenimikkeitä ei

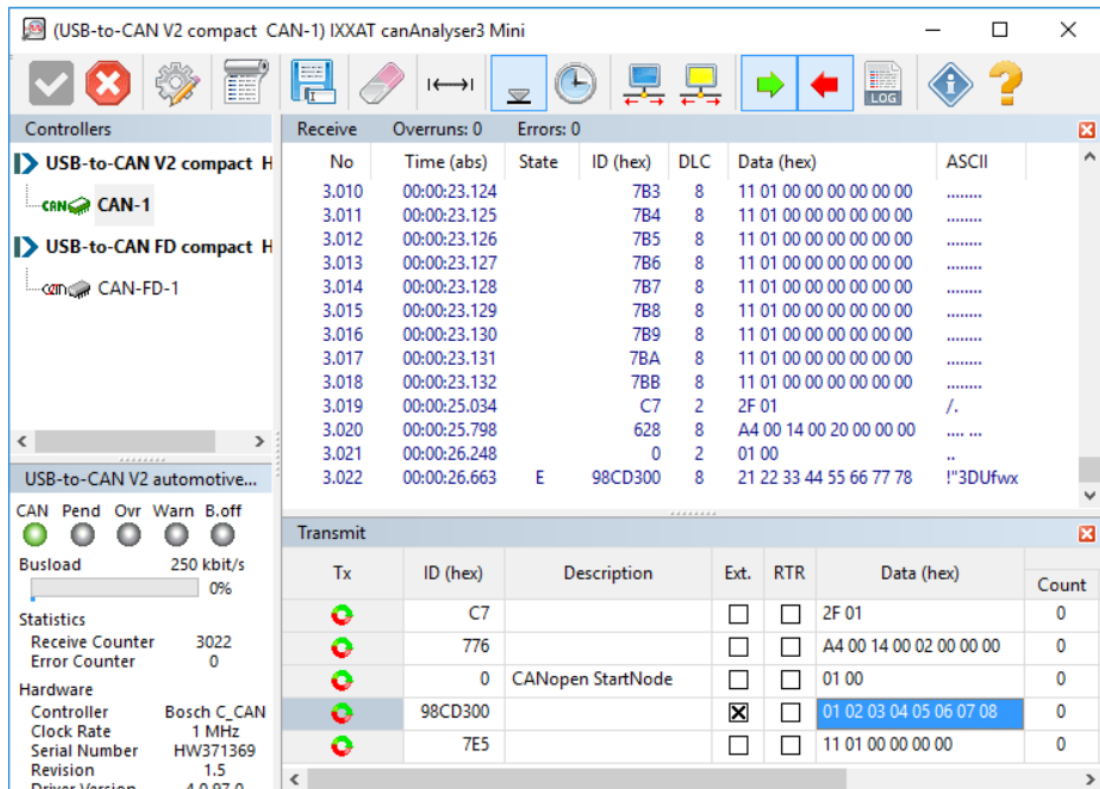
tarvitse avata ja kytkimen konfigurointi on automaatiotiimin jäsenille tuttua. (Lavanto, 2022.) Modbus TCP-liikenteen monitorointia on havainnollistettu kuvassa 19.



Kuva 19. Modbus TCP-liikenteen monitorointi peilattavasta portista Wiresharkilla (TRIO Motion Technology, 2012, s. 3).

8.3 CAN-väylä

CAN-väylän monitorointiin voidaan käyttää USB/CAN-muunninta, jollainen on esimerkiksi HMS Networksin valmistama Ixxat USB-to-CAN V2 muunnin, jonka Professional mallista löytyy kaksi CAN-väylä liityntää (CAN1, CAN2), RJ45 fyysisenä kerroksena. Datan monitorointi tapahtuu Ixxat canAnalyser-ohjelmalla (Kuva 20).

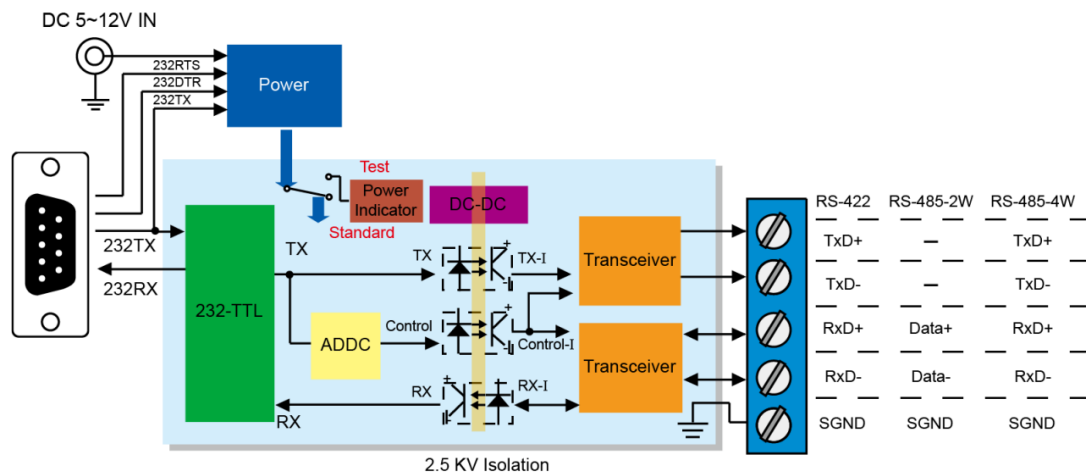


Kuva 20. Ixxat USB-toCAN V2 monitorointiin käytettävä canAnalyser3 Mini -ohjelmisto (HMS Technology, 2018).

Liityntä tietokoneeseen on USB 2.0, Hi-Speed. CAN-kontrollerin versio 2.0 ja tiedon siirtonopeus 10 kbit/s...1Mbit/s. Virtalähteenä toimii tietokoneen USB-portti. (HMS Industrial Networks, 2020.)

8.4 Sarjaliikenneväylät

Modbus RTU ja NMEA-sarjaliikenteen monitoroimiseen voidaan käyttää Moxan TCC-80/80I-sarjan muunninta. Muunnin konvertoi RS-232 liikenteen RS-422/485 fyysiselle kerrokselle sopivaksi (Kuva 21).



Kuva 21. Moxan TCC-80/80I-sarjan muuntimen kytkentäkaavio (Moxa, 2022).

TCC-80- tai TCC-80I-muunninta asennettaessa tulee kiinnittää huomiota virrankulutukseen, RS-232-kaapelin pituuteen ja RS-422/485-siirtoetäisyyteen. RS-232-kaapelin tulee olla lyhyempi kuin 15 m, jotta jännitehäviöt eivät kasva liian suureksi. Muuntimen tehontarve on noin 50 mW. (Moxa, 2022.) Näitä tarvitaan vähintään kolme, jotta voidaan monitoroida VDR-, Vessel speed log- ja IAS-sarjaliikennettä.

9 POHDINTA

Aivan opinnäytetyöprojektin alussa etsin tietoa mahdollisuudesta toteuttaa virtuaalinen kaksonen Speedgoatin HIL-simulointiin tarkoitettulla laitteistolla, jolloin simulointi olisi toteutettu Matlabilla ja Simulinkillä (Speedgoat, 2022). Selvityksen jälkeen todettiin, että näin tarkan mallin toteuttaminen ei ole kannattavaa, sillä hinta järjestelmälle nousisi liian korkealle suhteessa saavutettaviin hyötyihin. Varsinaista kustannustarkastelua ei tehty tämän opinnäytetyön puitteissa, vaikka keräsinkin komponentteja taulukoidessani myös niiden hintoja ylös ja arvioin esimerkiksi tietyn ratkaisun suurpiirteisesti liian kalliiksi verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Tässä vaiheessa työtä testauksen tarkkuudelle asetettuja vaatimuksia tarkennettiin. Koska yrityksen toiveena oli tiedonsiirron testaaminen ja erityisesti pitkän ajan testien tekeminen, eikä niinkään ympäristöolosuhdetestaus, jossa testattaisiin laitteen reagointia muuttuviin olosuhteisiin (SESKO, 2022), päätettiin simulaatiolaitteisto suunnitella logiikkaohjausta käyttäen. Tarkoitus oli huomioida myös hydrauliiikan, mekaniikan, huollon ja kunnonvalvonnan toiveita testausympäristön toteutuksessa, mutta ehdotuksia saatiin lopulta pääasiassa sähkö-automaatio-osaston henkilöstöltä.

Ei voida varmuudella ennustaa, miten simulaatio-ohjelman tekeminen ABB:n logiikkasarjalla tulee onnistumaan, sillä simulaatio-ohjelman suunnittelu ja toteutus ei sisällynyt tähän opinnäytetyöhön. Opiskelijalla ei myöskään ollut merkittävästi kokemusta CoDeSys-ohjelmoinnista. Olennaista simuloitavan mallin ohjelmoinnissa on riittävän luotettavan ja yleispätevän mallin luominen. Mallin tarkkuudella ja laajuudella on merkitystä myös simulaatiokontrollerin prosessitehon kannalta. Usein simuloitavat prosessit ovat laajoja ja tulosten luotettavuuden vuoksi ne rakennetaan usein mahdollisimman tarkoiksi. Raskas malli voi aiheuttaa viivettä laskentaan ja tällöin sen vaikutusta reaaliaikaisuuteen ja sen merkitykseen tulee pohtia. Järjestelmän tulojen ja lähtöjen osalta olisi hyvä pohtia vielä niiden riittävää tarkkuutta ja näytteenottoaajuutta. (Kinnanen, 2009, s. 6–8.) Millainen kunkin signaalin resoluution tulee olla, toisin sanoen kuinka tarkasti simuloitavan signaalin tulisi vastata todellisen signaalin tarkkuutta? Täytyykö epälinearisuuksia ottaa huomioon? Kuinka usein ja missä tilanteissa signaalia täytyy lähettää? Signaalien resoluutiot, syklit ja puutteet reaaliaikaisuudessa saattavat vaikuttaa simulointiin yllättävilläkin tavoilla. Näitä yllätyksiä

saattaa tulla vastaan sitten, kun simulaation ohjelmakoodia aletaan toteuttaa. Todellisten anturien ja toimilaitteiden käyttäminen simuloitujen sijaan voi lisätä johtopäätösten luotettavuutta (Kinnanen, 2009, s. 8), mutta toisaalta hankaloittaa ja monimutkaistaa simulaatiojärjestelyn toteutusta.

Koska taajuusmuuttajilta ei simulaatiojärjestelmässä voida ilman moottoreiden kytkentää saada virta- ja momenttipalautetta, on mahdollista, että tämä aiheuttaa epävarmuutta simulaatiosta vedettäviin johtopäätöksiin. Toisaalta, jos taajuusmuuttajat päätetään toteuttaa simulaatiologiikalla, haasteeksi saattaisi osoittautua taajuusmuuttajien simulaatio-ohjelman kirjoittaminen. Simulaation ulostulona pitäisi saada referenssiarvoista ja todennäköisistä kuormituksista lasketut arvot teholle, vääntömomentille ja nopeudelle, sekä mahdollisesti myös jännitteille ja virroille. Taajuusmuuttajien ja kääntömoottorien testaukseen on suunniteltu erillistä sähkökäyttöjen testausjärjestelyä. Eri järjestelmissä tehdyistä testeistä ei kuitenkaan voida vetää suoraan toisiinsa liittyviä johtopäätöksiä.

Kehittämistyön onnistumisen tarkastelu olisi helpompaa ja mielekkäämpää, jos koko kehittämisprojekti voitaisiin sisällyttää työhön. Tällöin olisi voitu pohtia opinnäytetyön tulosten todellisia vaikutuksia. Se ei kuitenkaan olisi ollut toteutettavissa yhden opiskelijan työnä opinnäytetyön ohjeellisen laajuuden, resurssien ja aikataulurajoitteiden vuoksi. Näin ollen ratkaisun toimivuuden tarkastelu ja teorioiden toteennäyttäminen jää opinnäytetyön jälkeen toteutettavaksi. Opinnäytetyön tuloksia voidaan kuitenkin käyttää osana testausympäristön muuta suunnittelua ja toteutusta. Merkittävimpinä hyötyinä voidaan ehkä pitää opinnäytetyöprojektin aikana esille nousseita kysymyksiä ja tarkennusta vaativia seikkoja. Sen uutuusarvo on yleisellä tasolla kuitenkin melko vähäinen, sillä opinnäytetyössä keskityttiin hyvin paljon pelkästään toimeksiantajayrityksen tuotteeseen. Myöskään varsinaisia tieteellisiä tutkimuksia tai testejä ei tämän opinnäytetyön puitteissa toteutettu. Testausympäristön kehittämisprojekti, uusien tuotantotilojen ja automaation testauksien suunnittelu ja kehittäminen jatkuvat edelleen opinnäytetyön päättymisen jälkeen.

Opinnäytetyön teoriaosuuden rajaaminen oli aiheen laajuuden vuoksi melkoisen haastavaa. Opinnäytetyön projektisuunnitelmaan kirjatut tehtävät toteutuivat lopulta enemmän limittäin, kuin olin suunnitellut. Toisinaan piti palata edeltäviin tehtäviin, jos

projektin aikana tuli uusia ideoita toteutuksen suhteen. Pääsin opinnäytetyön ohessa myös tekemään asetteluja ja testauksia ohjausjärjestelmälle, sekä seuraamaan potkurilaitteen käännön tehdaskokeita. Koin osallistumisen ohjausjärjestelmän asetteluihin, käyttöön ja testaamiseen liittyvän kokemuksen lisäävän merkittävästi ymmärrystä oman työn aihetta kohtaan. Vaikka tuotantotiloissa käytetty aika oli pois opinnäytetyöltä, sen merkitys lopputulokselle on kuitenkin oleellinen. Opinnäytetyö pysyi haasteista ja muutoksista huolimatta aikataulussa ja sille asetetut tavoitteet saavutettiin mielestäni melko hyvin. Olisin kuitenkin voinut vielä syvemmminkin paneutua kohtamiini mielenkiintoisiin kysymyksiin. Kiinnostus tiettyjä aihepiirejä kohtaan meinasikin toisinaan venyttää opinnäytteen aikataulua.

Opinnäytetyöprosessin myötä sain mahdollisuuden syventää osaamistani laivan potkurilaitteen ohjausjärjestelmän toteuttamisesta ja vaatimuksista. Pidin toimeksiantoa, sen laajuutta lukuun ottamatta, erinomaisena vaihtoehtona opinnäytetyön aiheeksi, sillä aihe oli selkeästi automaatiotekniikkaan liittyvä ja sisälsi insinööritä vaadittavaa itsenäistä työskentelyä ja kriittistä pohdintaa. Toisaalta opinnäytetyön laajuuden vuoksi opinnäytetyössä ei ollut mahdollista keskittyä yksittäisiin seikkoihin kovin syvällisesti. Aiheen vuoksi merkittävin riski oli työn aikataulun venyminen, toisin sanoen rajauksen epäonnistuminen. Näin ollen rajauksia jouduttiin tekemään myös opinnäytetyöprosessin aikana. Optimaalinen opinnäytetyöaihe olisi ollut selkeämpi, tarkasti rajattuun ja syvällistä tutkimusta sekä pohdintaa vaativa aihe, mutta tällaista toimeksiantoa ei aina ole tarjolla. Lisäksi aiheen olisi hyvä olla myös tekijälleen mielenkiintoinen.

Jatkotutkimusehdotukset

1. Tilasuunnittelun ja riskinarvioinnin tekeminen
2. Tarkempien piiri- ja kytkentäkaavioiden piirtäminen
3. Testijärjestelmän asentaminen ja käyttöönotto, toimivuuden testaaminen
4. Testaustilan ja testaamisen käyttöohjeiden ja toimintaohjeiden tekeminen
5. Simulaatio-ohjelmakoodin kirjoittaminen
6. Simulaatiolaitteiston käyttöliittymän suunnittelu
7. Kestomagneettimoottorin ja reluktanssiavusteisen kestomagneettimoottorin vertailu

LÄHTEET

- ABB. (n.d.). Azipod® electric propulsion - The driving force behind safe, efficient and sustainable operations. Haettu 23.6.2022 osoitteesta <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/azipod>
- ABB AG. (2022a). CD522 Encoder, Counter and PWM module. Datalehti. ABB Automation Group Ltd. <https://new.abb.com/products/fi/1SAP260300R0001/cd522>
- ABB AG. (2022b). CI506 PROFINET communication interface module. Datalehti. ABB Automation Group Ltd. <https://new.abb.com/products/fi/1SAP150000R0271/pm590-eth>
- ABB AG. (2022c). DI524 Digital Input Module. Datalehti. ABB Automation Group Ltd. <https://new.abb.com/products/fi/1SAP240000R0001/di524>
- ABB AG. (2022d). AC500 - CPUs. Haettu 23.5.2022 osoitteesta <https://new.abb.com/plc/programmable-logic-controllers-plcs/ac500/cpus>
- Acromag Incorporated. (2005). Introduction To Modbus TCP/IP. Instrumentation (Osa. 44, numero 248). Acromag, Inc. Wixom, USA. https://www.prosoft-technology.com/kb/assets/intro_modbustcp.pdf
- Amini, H. (2011). Azimuth Propulsors in Off-design Conditions [Väitös-kirja, Norwegian University of Science and Technology]. <https://www.researchgate.net/publication/262764822>
- Anderson, W. (2004). Rocket Engines. Encyclopedia of Energy (Osa. 5, s. 483). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1038/196912b0>
- Babicz, J. (2015). Wärtsilä encyclopedia of ship technology (Toinen painos, osa 2). Wärtsilä Corporation. www.shippingencyclopedia.com
- Bowne, M. (7.4.2021). A complete comparison: Profinet RT vs IRT. Haettu 20.7.2022 osoitteesta <https://us.profinet.com/profinet-rt-vs-irt/>
- CiA. (2022). CANopen – The standardized embedded network. Haettu 23.5.2022 osoitteesta <https://www.can-cia.org/canopen/>
- Cimon PLC-S. (n.d.) High Speed Counter User Manual. Manuaali. Haettu 21.7.2022 osoitteesta <https://cimon.com/wp-content/uploads/2017/08/PLC-S-HSC-USER-MANUAL.pdf>
- Danfoss. (2022). OPT-E9-V: 2-Port Ethernet. Tekniset tiedot. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- DEIF. (n.d.). XDi - Flexible display bridge indicator. Haettu 18.5.2022 osoitteesta <https://www.deif.com/>

DEIF A/S. (n.d.). XDi, fleXible Display indicators - Data sheet. Datalehti. <https://www.electro-meters.com/wp-content/uploads/pdf/deif/xdi-data-sheet-4921250067-uk.pdf>

Dictionarypro.net. (2022). English-Finnish translations for propeller. Haettu 30.6.2022 osoitteesta <https://dictionarypro.net/english-finnish/propeller>

Dietmer, D. (2006). Principal Aspects of Thruster Selection. [Konferenssiesitelmä]. Marine Technology Societ (Ed.), Dynamic Positioning Conference (Osa. 40, Numero 1, s. 2). https://dynamic-positioning.com/proceedings/dp1997/prop_deter.pdf

Digital Yacht. (2022). Are you Positive about that Negative? Haettu 27.5.2022 osoitteesta <https://digitalyacht.net/2017/08/02/are-you-positive-about-that-negative/>

DNV GL AS. (2020). RULES FOR CLASSIFICATION - Ships - Part 4 Systems and components, Chapter 5 Rotating machinery - driven units (s. 33–36). DNV GL AS. <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2020-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch5.pdf>

Fernsteuergeräte. (2012). Magnetic Double Rotary Transducer Type: MH 620-II/4-20/CAN - Data sheet. Datalehti. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.

Halkola, H. (2022). Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköpostikeskustelu 18.3.2022.

Harting Technology Group. (2018). Ha-VIS eCon 2000 Fast Ethernet Basic (s. 3–4). Datalehti. <https://www.harting.com/DE/en-gb/solutions/ha-vis-econ-2000>

Hietaharju, T. (2015). Laivojen peräsinrakenteet ja -koneet [AMK-Opinnäytetyö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2015060211912>

Hilscher. (2019). Capturing PROFINET with Wireshark (s. 1–55). Application Note. Hilscher Gesellschaft für Systemautomation mbH.

HMS Industrial Networks. (2020). USB-to-CAN V2 Active USB interface. Datalehti. <https://www.ixxat.com/products/products-industrial/can-interfaces/usb-can-interfaces>

HMS Technology. (2018). canAnalyser3Mini (3.2.0.7588). [Sovellusohjelma]. DUNDAS SOFTWARE LTD. <https://www.ixxat.com/products/products-industrial/tools-overview/cananalyser/canalyser-lite-standard>

Huijgens, L., Vrijdag, A., & Hopman, H. (2021). Hardware in the loop experiments with ship propulsion systems in the towing tank: Scale effects, corrections and demonstration. In *Ocean Engineering* (Osa. 226). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108789>

International Maritime Organization. (2019). Voyage Data Recorders. Safety of Navigation, General: Profinet communication. Haettu 24.5.2022 osoitteesta <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/VDR.aspx>

ISO 20673:2022. (2022). Ships and marine technology — Electric rudder angle indicators. International Organization for Standardization. <https://online.sfs.fi/>

Johansen, T. A., Fossen, T. I., & Vik, B. (2005). Hardware-in-the-loop Testing of DP systems. In Dynamic Positioning Conference. [Konferenssiesitelmä]. Marine Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology. https://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2005/control_johansen.pdf

Kauppalehti. (2022). Steerprop Oy. Haettu 8.5.2022 osoitteesta <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/steerprop+oy/1612737-2>

Kinnanen, V. (2009). Hardware in the loop -simuloinnin käyttö tuotekehityksessä. IHA-3300 / ELE-3350 Mekatroniikan erityiskysymyksiä -tutkielma. Tampereen teknillinen yliopisto.

Kokko, O. (2017). Reaktiivinen laivamallin automaattiohjausjärjestelmä [Diplomityö, Aalto-yliopisto]. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201707045988>

Koskinen, J. (2022). Henkilökohtainen tiedonanto 4.7.2022.

Krile, S., Kezić, D., & Dimc, F. (2013). NMEA communication standard for ship-board data architecture. *Nase More*, 60(3–4)/2013, s.68–69. <https://hrcak.srce.hr/file/162159>

Kwant Controls. (2017). RSCU-H96² AND H144² - Installation and user manual (s. 3–9). Manuaali. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.

Kylmänen, H.-R., Lakkala, M., Carver, E., & Kamppari, K. (2016). Opas projektityöskentelyyn. Tieteestä toimintaa -verkosto. Helsingin yliopisto. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/157964>

Lavanto, L. (2022). Henkilökohtainen tiedonanto. Automaatiotiimin viikkopalaveri 30.3.2022.

MathWorks. (2022). Basics of Hardware-In-The-Loop simulation. Haettu 20.5.2022 osoitteesta <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html>

Merivoimien Esikunta. (2010). Merisotilaan käsikirja. Edita Prima Oy. <https://puolustusvoimat.fi/documents/1948673/2258487/PEVIESTOS-Merisotilaan-kasik.pdf/fb7a3056-8695-4094-ad65-6447b8419c36/PEVIESTOS-Merisotilaan-kasik.pdf>

Microchip. (2017). MCP4021/2/3/4 Low-Cost NV Digital POT with WiperLock Technology (s. 1). Datalehti. Microship Technology Inc. <https://www.microchip.com/>

Modbus-IDA. (2006). MODBUS over serial line specification and implementation guide. Versio 1.02. <http://www.modbus.org/>

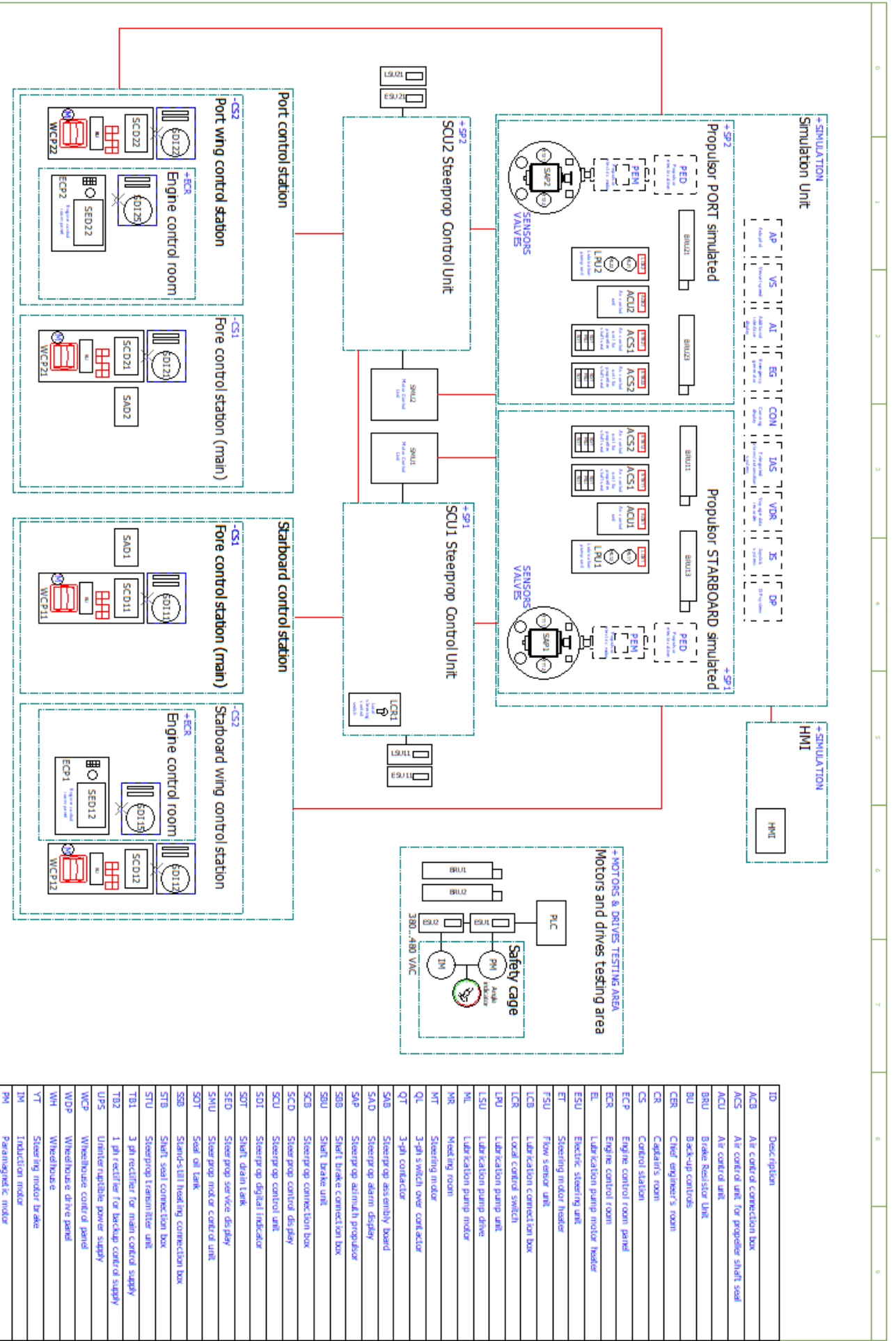
Molland, A. F. (2008). Maritime Engineering Reference Book - A guide to ship design, construction and operation. Elsevier Ltd.

- Moxa. (2022). TCC-80 / 80I Series (s. 1–5). Datalehti. <https://cdn-cms.azureedge.net/getmedia/d9a26273-829e-4d66-8386-a658e169a2ac/moxa-tcc-80-80i-series-datasheet-v1.4.pdf>
- National Instruments. (2022). The Basics of CANopen. Haettu 23.5.2022 osoitteesta <https://www.ni.com/fi-fi/innovations/white-papers/13/the-basics-of-canopen.html>
- National Marine Electronics Association. (2012). NMEA 0183 - Standard For Interfacing Marine Electronic Devices. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Netgear. (2019). Gigabit Ethernet Plus Switches (s. 1–8). Datalehti. https://www.netgear.com/images/datasheet/switches/Gigabit_Ethernet_Plus_Switches_DS.pdf
- Offshore Engineering. (2022). Haettu 8.5.2022 osoitteesta Introduction to Dynamic Positioning. <https://www.offshoreengineering.com/dp-dynamic-positioning/what-is-dynamic-positioning/>
- Ojasalo, K., Moilainen, T., & Ritalahti, J. (2015). Kehittämistyön menetelmät - Uudenlaista osaamista liiketoimintaan (L. Koskua, M. Uusitalo, J. Koski, E. Högman, & E. Sinivuori, Eds.; 3.-4. Painos). Sanoma Pro Oy.
- Orädd, P. (2010). Integroidut komentositratkaisut ja niiden kehittyminen [AMK-opinnäytetyö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201004016074>
- Pepperl+Fuchs Group. (2010). Inductive proximity switch (s. 1–3). Data-lehti. <https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/edb/mdoc4050a.pdf?v=20200316232216>
- Phoenix Contact. (2022a). Industrial Ethernet Switch. Datalehti. <https://www.phoenixcontact.com/en-pc/products>
- Phoenix Contact. (2022b). Disconnect and knife-disconnect terminal blocks. Haettu 7.7.2022 osoitteesta <https://www.phoenixcontact.com/fi-fi/tuotteet/terminal-blocks/disconnect-and-knife-disconnect-terminal-blocks>
- PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO). (2014). PROFINET System Description, Technology and Application (s. 28). PROFIBUS & PROFINET International (PI). http://us.profinet.com/wp-content/uploads/2012/11/PI_PROFINET_SystemDescription_EN_2014_01.pdf
- Rensvik, E., Sørensen, A. J., & Rasmussen, M. (2003). Maritime Industrial IT. [Konferenssiesitelmä]. ICMES'03 International Conference on Marine Engineering Systems, Finland. <https://www.sintef.no/globalassets/upload/marintek/pdf-filer/papers-articles/avd-28/maritime-industrial-it.pdf>
- SESKO. (2022). Ympäristöolosuhdetestaus. Standardoinnin Aihe-alueita. Haettu 6.6.2022 osoitteesta <https://sesko.fi/standardointi/ymparistoolosuhdetestaus/>
- Skjetne, R., & Egeland, O. (2005). Hardware-in-the-loop testing of marine control systems. *Modeling, Identification and Control*, 27(4), s.1–11. <https://doi.org/10.4173/mic.2006.4.3>

- Speedgoat. (2022). Hardware-in-the-loop. Haettu 14.6.2022 osoitteesta <https://www.speedgoat.com/solutions/testing-workflows/hardware-in-the-loop>
- Steerprop Oy. (2021). W0354-0357 Steerprop Control System Description (s. 4). [Control System Description]. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Steerprop Oy. (2022a). SP25WD Cross Section. [Mechanical Drawing]. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Steerprop Oy. (2022b). W0354-357 Control Station Program (Versio 220512v1). [PLC-ohjelma]. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Steerprop Oy. (2022c). W0354-357 Main Program (Versio. 220512v1). [PLC-ohjelma]. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Steerprop Oy. (2022d). W0354-357 Prime Mover Program (Versio. 220512v1). [PLC-ohjelma]. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Steerprop Oy. (2022e). W0354-357 Steering Gear Program (Versio. 220512v1). [PLC-ohjelma]. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Steerprop Oy. (2022f). About us. Haettu 8.5.2022 osoitteesta <https://steerprop.com/about-us>
- Steerprop Oy. (2022g). Azimuth Propulsion. Haettu 23.6.2022 osoitteesta <https://steerprop.com/solutions/azimuth-propulsion>
- Steerprop Oy. (2022h). Electrical and Automation. Steerprop Control System. Haettu 7.7.2022 osoitteesta <https://steerprop.com/solutions/electrical-automation>
- Tamminen, T. (2020). W0354-357 Circuit diagram. Sähkö- ja automaatiopiirroksat. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Tamminen, T. (2022a). Steerprop Control Panel and Display Instruction (s. 3). [Instructions]. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Tamminen, T. (2022b). W0356 Operation Manual. Steerprop Oy sisäinen tietokanta.
- Tampereen yliopisto. (2019). Opinnäytetyön kirjoitusohje tekniikan alalla (s. 1–6). https://content-webapi.tuni.fi/proxy/public/2019-10/tau_tekniikan_alan_opinnaytetyoohje_2019_versio3.pdf
- TRIO Motion Technology. (2012). Using Wireshark to monitor Ethernet traffic (s. 1–5). Application note. [http://mat.transtechnik.fr/TRIO/manuals/AN_TN/AN-283_Wireshark Et-hernet monitor.pdf](http://mat.transtechnik.fr/TRIO/manuals/AN_TN/AN-283_Wireshark_Et-hernet_monitor.pdf)
- Vänttinen, T. (2020). Sähköisten signaalien käsittely ja datan analysointi laivan ohjauksjärjestelmässä. [Kandidaatintyö, Tampereen Yliopisto]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202005225564>
- Viitanen, T. (2022). Teollisuuden Ethernet - Kenttäväylät kurssimateriaali. Satakunnan ammattikorkeakoulu.

Viljamaa, J. (2020). Vacon Drivetest-käyttöohje. [AMK-opinnäytetyö, Vaasan ammattikorkeakoulu]. <https://doi.org/https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020120726701>

Viral, N. (2022). What are High-Speed inputs in PLC? Haettu 26.5.2022 osoitteesta <https://instrumentationtools.com/high-speed-inputs-in-plc/>



© The information contained in this document is the intellectual property of Steerprop Ltd. Any reproduction or distribution in part or whole without the prior written permission is prohibited.

Project name	Client name	Scale	Project no.	System	Block Diagram	Simulation & control system general layout	Created by	Reviewed by	Checked by	Date	
		1:1					AM	AM	AM	1.1	
C111524							1.a /				