

Peter Ågren

# Hydraulipumppujen ja -moottorien testausjärjestelmän ohjauksen ja säädön suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri

Kone- ja tuotantotekniikka

Opinnäytetyö

26.11.2013

Tekijä Otsikko	Peter Ågren Hydraulipumppujen ja -moottorien testausjärjestelmän ohjauksen ja säädön suunnittelu
Sivumäärä Aika	33 sivua 26.11.2013
Tutkinto	Insinööri
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaajat	Lehtori Heikki Paavilainen Lehtori Jari Savolainen
<p>Työn tavoitteena oli suunnitella toimiva ohjaus ja säätö hydraulisten pumppujen ja moottoreiden testipenkkiin logiikkaohjausta käyttäen.</p> <p>Ohjauksen ja säädön toteuttamiseen käytettiin Beckhoff Oy:n PLC-komponentteja, Twincat 2.0 -PLC-ohjelmaa, sekä Codesys V2.3 -PLC-ohjelmaa.</p> <p>Työ suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun tiloissa ja Metropolian resursseilla. Työ tehtiin hydraulikka alalla toimivalle yhtiölle ja Metropolia Ammattikorkeakoululle. Logiikan ohjelmointi toteutettiin standardin IEC-61131-3 mukaan.</p> <p>Työn lopputuloksena valmistui järjestelmän simulointimalli.</p>	
Avainsanat	Testipenkki, PLC, hydraulikka.

Author Title	Peter Ågren Design of control for testbench of hydraulic pumps and motors
Number of Pages Date	33 pages 26 Nov 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineer
Specialisation option	Machine automation
Instructors	Heikki Paavilainen, Lecturer Jari Savolainen, Lecturer
<p>This final thesis was carried out for a company involved in hydraulics and for Metropolia University of Applied Sciences in order to produce a functional plan of designing a program for controlling a hydraulic pump and motor testbench. Components used in this final thesis were from Beckhoff Automation Corporation.</p> <p>Programmig tools for this project were from Beckhoff Automation Corporation and from 3S Software Corporation. Beckhoff's TwinCAT 2.0 -PLC-programming tool and 3S Software Corporation's CodeSys 2.3 were used to build the program.</p> <p>The programming of the logic controller in this project was done in accordance with IEC-61131-3 standard of programmable logic controllers.</p> <p>As a result of this final thesis a simulation model of the hydraulic system was created.</p>	
Keywords	Test bench, PLC, hydraulics.

## Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Työn taustat	1
1.2	Hydrauliikka	1
1.2.1	Paine	2
1.2.2	Virtaus	2
1.3	Ohjaus ja säätö	2
1.3.1	Ohjaus	2
1.3.2	Säätö	2
1.3.3	Ziegler-Nichols	3
2	Testausjärjestelmän yleinen kuvaus	4
2.1	Sähköinen voimantuotto	4
2.2	Hydraulinen voimantuotto	4
2.3	Vaihteisto ja tehon takaisinkierrätys	5
2.4	Tehtävät mittaukset	5
2.5	Testattavat tuotteet	5
3	Hydrauliset järjestelmät	6
3.1	Paineen tuotto	6
3.2	Sovellukset	6
3.3	Suunnittelu	7
4	Säätötekniikka	9
4.1	Ohjearvo	9
4.2	Eroarvo	9
5	Ohjelmointi	10
5.1	Standardi IEC-61131-3	10
5.1.1	ST strukturoitu teksti	11
5.1.2	IL instruction list	11
5.1.3	LD ladder diagram	12
5.1.4	SFC sequential flow chart	13
5.1.5	FBD function block diagram	14
5.2	CoDeSys	15

5.3	Beckhoff TwinCat	15
5.4	EtherCat	16
5.5	Ohjelman suunnittelu	16
6	Testijärjestelmän ohjelma	17
6.1	Yleistä	17
6.2	Käyttöliittymä	17
6.3	Testattavan tuotteen valinta ohjelmassa	18
6.4	Järjestelmän eheyden tarkastus	18
6.5	Sähkömoottorin käynnistäminen	19
6.6	Suljetun piirin työpaineiden nosto	20
6.7	Tehon takaisinkierätyksen säätö	20
6.8	Pyörintänopeuden hallinta	21
6.9	Nestepinnan tason seuranta	21
6.10	Valuma-altaan tyhjentäminen	22
7	Järjestelmän komponentit	23
7.1	Tulot	24
7.1.1	Digitaaliset sisääntulot	24
7.1.2	Analogiset sisääntulot	25
7.2	Lähdöt	26
7.2.1	Digitaaliset lähdöt	26
7.2.2	Analogiset lähdöt	26
7.3	Hydraulipumput	27
7.4	Hydraulimoottorit	27
7.5	Sähkömoottori	27
7.6	Vaihteisto	27
7.7	Hydraulikomponentit	28
7.8	Testattavat tuotteet.	28
8	Järjestelmän simulointi	29
9	Loppusanat	32
	Lähteet	33

# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin hydraulisen testausjärjestelmän ohjaus ja säätö ohjelmoitavalle logiikkakontrollerille ja IEC-61131-3-standardin mukainen logiikkaohjelma.

## 1.1 Työn tausta

Järjestelmän suunnittelun alulle panija on suomalainen hydraulikka-alan yritys, jonka erityisosaamiseen kuuluu Kawasaki Hydraulics Corporation yhtiön hydraulipumppujen ja hydraulimoottorien kunnostaminen ja huoltaminen. Yhtiöllä oli tarve parantaa palvelujaan ja halu kehittyä kattavammaksi Kawasaki pumppujen KV-tuoteperheen huolto- ja kunnossapitopalvelujen tarjoajaksi. Yhtiö aloitti kehitystyön, jossa haluttiin luoda itsenäinen testausjärjestelmä, joka tulisi olemaan suurimmilta osin automatisoitu. Kuitenkin yhtiössä ymmärrettiin järjestelmän luomisen vaativuus ja yhdessä yhtiön ja Metropolia Ammattikorkeakoulun kanssa päädyttiin asteittaiseen kehitystyöhön, jonka ensimmäisenä askeleena tämä työ osaltaan toimii.

Työlle asetettiin reunaehdot, jossa määrättiin ensimmäisesen vaiheen suunnitelma. Ensimmäisen vaiheen päämääränä oli luoda automaatiojärjestelmä, joka toteuttaa käyttäjän eli testaajan pyynnöt, jotka annetaan testijärjestelmään PLC-ohjelman kautta. PLC on lyhenne sanoista programmable logical controller ja tarkoittaa ohjelmoitavaa logiikkakontrolleria. Näiden asetettujen reunaehtoien mukaan suunnitelmaa alettiin työstämään.

## 1.2 Hydraulikka

Hydraulikka on yksinkertaistaen tehon muuttamista nestepaineeksi ja tilavuusvirraksi sekä siihen sidotun voiman käyttämistä edelleen valitun kohteen mukaan. Yleisimpiä käyttökohteita hydraulikalle ovat koneiden hydraulisylinterit ja niillä toteutettu lineaariliike.

Hydrauliikan keskeisimpiä suureita ovat paine ja virtaus. Paineella tuotetaan voima ja virtauksella liikenopeus.

### 1.2.1 Paine

Paine on fysiikan suure, joka on määritelty voiman suhteeksi vaikutettuun pinta-alaan. Paine vaikuttaa jokaiseen suuntaan yhtäsuuruisesti, eikä sitä voi suunnata. Hydraulikassa painetta käytetään voimantuottoon nesteen välityksellä ja koska neste on hydrostaatiikan lain mukaan kokoonpuristumatonta, saadaan voima ja liike aikaiseksi ilman tilavuuden muutoksia.

### 1.2.2 Virtaus

Virtaus on fysiikan suure, joka voi olla, joko massavirtaa tai tilavuusvirtaa. Hydrostaatiikan lain mukaisesti neste on kokoonpuristumatonta, joten voidaan yleisesti sanoa, että hydraulisesti tuotetun liikkeen ja liikenopeuden suuruus on suoraan verrannollinen tuotettuun virtaukseen.

## 1.3 Ohjaus ja säätö

Ohjaus on herätteen antamista järjestelmään. Säätö on herätteen ja vasteen manipulointia siten, että heräte ja vaste vastaisivat toisiaan.

### 1.3.1 Ohjaus

Ohjaus on ohjearvon antamista jollekin laitteelle, joka vastaa arvoon jollain toiminnalla. Esimerkkinä RC-auton kauko-ohjain. Kauko-ohjainta käytettäessä RC-auto toteuttaa ohjaimelta annetut pyynnöt sellaisena, kuin ne annetaan.

### 1.3.2 Säätö

Säädön olennaisin mekanismi on takaisinkytkentä. Ohjauksen takaisinkytkennällä mahdollistetaan järjestelmän säätötapahtuma. Luvussa 1.2.1 Ohjaus annetussa esimerkissä voitaisiin soveltaa säätötekniikkaa siten, että kun RC-autolle annetaan ohjaimelta nopeuspyyntö ja maaston kaltevuudesta johtuen RC-auto ei pysty sitä toteuttamaan ohjaimelta annetulla arvolla, niin säätömekanismi pyytäisi lisää nopeutta, kunnes RC-auto saavuttaisi alkuperäisen pyydetyn nopeuden.

### 1.3.3 Ziegler-Nichols

PID-säätimen säätäminen perustuu loogiseen päättelyyn ja kokeelliseen toimintaan ja sen perusteella syntyi Ziegler-Nicholsin sääntö, joka väittää, että PID-säädin voidaan karkeasti säätää siten, että P-arvoa kasvatetaan siihen asti kunnes järjestelmä alkaa värähdellä, minkä jälkeen P-arvo lasketaan puoleen. Tämän jälkeen integraattorivakiota muutetaan siihen arvoon, jolla saadaan järjestelmä vastaamaan ohjeeseen halutulla tavalla. Viimeiseksi säädetään D-arvo, joka vaikuttaa muutoksen suuruuteen säätimessä.

Tarkemmin tarkasteltuna Ziegler-Nicholsin sääntö ei päde jokaisessa tapauksessa johtuen säätötapahtuman aiheuttamasta nk. yliampumisesta, joka aiheutuu voimakkaasta P-arvosta. Ziegler-Nicholsin sääntö nimen mukaisesti on luotu menetelmä, jonka taulukkoa (taulukko 1) käyttämällä saadaan arvot hyvin lähelle optimaalista arvoa.

Taulukko 1. Ziegler-Nichols -menetelmän taulukko. Taulukossa esitetyt arvot,  $K_u$  eli minimi K-arvo, jolla järjestelmä alkaa värähtelemään vakiotajuudella.  $T_u$  esittää arvoa, joka on  $K_u$  arvolla saatu värähdysaika.

<b>Ziegler-Nichols menetelmä</b>			
Säädön tyyppi	$K_p$	$K_i$	$K_d$
P	$K_u/2$	-	-
PI	$K_u/2,2$	$1,2 \cdot K_p/T_u$	-
PID	$0,60 \cdot K_u$	$2,0 \cdot K_p/T_u$	$K_p \cdot T_u/8$
Pessenin sääntö	$0,70 \cdot K_u$	$2,5 \cdot K_p/T_u$	$0,15 \cdot K_p \cdot T_u$
Lievä ylimeno	$0,33 \cdot K_u$	$2,0 \cdot K_p/T_u$	$K_p \cdot T_u/3$
Ilman ylimenoa	$0,20 \cdot K_u$	$2,0 \cdot K_p/T_u$	$K_p \cdot T_u/3$

Tehdyssä opinnäytetyössä ei käytetty suoranaisesti PID-säädintä, mutta tietyissä komponenteissa, joita työhön valittiin, PID-säädin oli sisäänrakennettu.



## 2 Testausjärjestelmän yleinen kuvaus

Testausjärjestelmän ohjauksen ja säädön suunnittelu oli osa suurempaa kokonaisuutta, johon kuului järjestelmän rungon, nestesäiliön ja putkituksen tekeminen. Komponenttien sijoittelu kuului putkituksen osuuteen. Testausjärjestelmä koostui sähköisestä voimantuotosta, hydraulisesta voimantuotosta, hydraulisen tehon takaisinkierrätyksestä ja PLC-ohjelmasta, joka ohjasi kaikkia aiemmin mainittuja osia. Sähköinen voimantuotto toteutettiin valtakunnan sähköverkkoon kytketyllä sähkömoottorilla ja hydraulinen voimantuotto saatiin aikaiseksi hydraulipumppuja- ja hydraulimoottoreita käyttäen. Hydraulisen tehon takaisinkierrätys toteutettiin käyttämällä hydraulipumppujen ja hydraulimoottorin välillä mekaanista vaihteistoa ja hydraulikomponentteja, jotka oli kytketty työssä käytettyihin pumppuihin ja moottoreihin.

Järjestelmän keskeisenä ajatuksena oli mahdollistaa hydraulisen tehon takaisinkierrätys.

### 2.1 Sähköinen voimantuotto

Järjestelmään tuleva teho otettiin valtakunnanverkosta, joka syötettiin 45 kW:n kolmivaihesähkömoottoriin. Tällä sähkömoottorilla ajettiin suoraan suljetun piirin hydraulipumppua, jolla tuotettiin järjestelmän hydraulinen teho. Sähkömoottoria suunniteltiin käytettäväksi vakiokierrosnopeudella.

Sähkömoottorille suunniteltiin oma sähkönsyöttö, koska työn tilanneen yrityksen tiloissa ei ollut riittävää syöttöä valmiina. Moottoriksi valittiin IEC-standardin mukainen kolmivaihemoottori WEG 400/690V, jonka maksimikierrosnopeus oli 1460 kierrosta minuutissa.

### 2.2 Hydraulinen voimantuotto

Hydraulinen voimantuotto toteutettiin ottamalla sähkömoottorin tuottama teho hydraulipumpun kautta hydrauliselle moottorille, joka oli kytketty vaihteistoon, jossa oli kolme tuloa ja yksi lähtö. Lähtö oli varattu testattavalle tuotteelle. Hydraulisen voimantuoton ideana on muuttaa järjestelmän pyörintänopeutta muuttamalla

sähkömoottorin pyörintänopeutta. Tarvittaessa muuttettiin suljetun piirin moottorin kierrostilavuutta, jolloin järjestelmän pyörintänopeus muuttuu.

### 2.3 Vaihteisto ja tehon takaisinkierätys

Järjestelmän keskeisenä osana oli vaihteisto, joka alentaa sähkömoottorilta tulevan pyörintänopeuden 1460 kierrosta minuutissa tuhanteen kierrokseen minuutissa ja toimii samalla vääntömomentin muuntimena.

Testattava tuote on kytkettynä vaihteistoon, josta tuotteelle välitettiin ottoteho. Ottoteholla oli tarkoituksena tehdä kaksi asiaa. Ensimmäisenä asiana oli nostaa testattavan tuotteen ja vaihteistoon kytkettyjen apumoottorien ja muiden komponenttien välille paine, jolla saadaan testattua tuotteen eheys huollon tai kunnostamisen jälkeen. Toisena asiana oli hyödyntää testattavaa tuotetta siten, että sen tuottamalla teholla käytettiin apumoottoreita ja saatiin osa tehosta palaamaan järjestelmään, jolloin ottotehon tarpeen oletettiin pienenevän.

### 2.4 Tehtävät mittaukset

Järjestelmän ajon aikana oli tarkoitus tehdä reaaliaikaisia mittauksia siinä ajassa joka on ihmiskehölle havaittavissa. Testattavasta tuotteesta haluttiin luettavaksi tuotettu paine, tuotettu virtaus, tuotettu kotelovuoto ja hydraulinesteen lämpötila. Näille tiedoille oli olemassa referenssiarvot, joihin mitattuja arvoja voitiin verrata ja todeta tuotteen eheys.

### 2.5 Testattavat tuotteet

Järjestelmä oli tarkoitettu suunnitella sellaiseksi, että sillä voitaisiin testata monia erilaisia tuotteita. Pääpiirteittäin tuotteet jaettiin kolmeen ryhmään, jotka olivat avoimen piirin hydrauliiikkapumput, suljetun piirin hydrauliiikkapumput ja hydraulimoottorit. Lisäksi näiden kolmen ryhmän sisään suunniteltiin tuoteperhe ja mallikohtaiset ryhmät.

### 3 Hydrauliset järjestelmät

Hydraulijärjestelmät ovat järjestelmiä, joissa mekaanisesti tuotettu voima muutetaan nestepaineeksi ja paineeseen sidottu energia muutetaan liike-energiaksi. Hydraulisten järjestelmien ominaispiirteitä ovat hitaat liikkeet ja suuret voimat.

#### 3.1 Paineen tuotto

Hydraulisen paineen tuottamiseen on erilaisia tapoja. Paine voidaan tuottaa pumpuilla tai erilaisilla prässeillä. Yleisin käytetty tapa on tuottaa paine käyttäen pumppua. Paineen tuottamiseen tarvitaan suhteellisen suuri määrä energiaa, koska paineen tuottavien pumppujen käyttämiseen tarvitaan moottori, joka pyörittää pumppua. Suuri energiantarve johtuu hydraulijärjestelmien kokonaishyötyprosentista, jota laskee pumppujen hyötyprosentti, toimilaitteiden hyötyprosentti ja hydraulijärjestelmää käyttävän moottorin hyötyprosentti. Kokonaishyötyprosentin ollessa pieni suuri osa järjestelmään otetusta energiasta muuttuu lämpöenergiaksi. (3.)

#### 3.2 Sovellukset

Hydraulisten järjestelmien yleisin sovellutus on tuottaa lineaariliike ja suuri voima. Lineaariliikkeellä saadaan aikaiseksi monimutkaisia liikkeitä, kun yhdistetään useita lineaariliikkeitä toisiinsa käyttämällä nivelpisteitä lineaaristen liike-elementtien, kuten hydraulisylinterien välissä. Hydraulisylinterit ovat toimilaitteita, jotka koostuvat pääosin kahdesta osasta, sylinteristä ja männästä. Mäntä ja sen varsi ovat sylinterin sisässä erottamassa sylinterin kahteen eristetyyn tilaan. Sylinteriä täytettäessä toisesta päästä mäntä ja männän varsi työntyvät vastakkaiseen päähän aikaansaaden lineaarisen liikkeen. Seuraavaksi yleisin sovellutus on tuottaa pyörivä liike. Pyörivä liike tuotetaan ohjaamalla paine ja nestevirta hydrauliseen moottoriin, jossa on pesään keskitetty akseli ja järjestelmä, jossa nestevirta otetaan sisään tietyistä kohdista ja päästetään ulos toiselta puolen pesää. Järjestelmässä on sisällä esimerkiksi hammaspyörä, joka on liukukosketuksessa pesän seinämiin ja kiinteästi akselissa kiinni. Nestevirran kulkiessa moottorin läpi akseli saadaan pyörimään. (3.)

### 3.3 Suunnittelu

Hydraulijärjestelmien suunnittelun keskeisinä tietoina pidetään tarvittavia voimia ja momentteja, liikenopeuksia, liikeaikoja, ohjaustapaa ja mekaniikkaa. Hydraulijärjestelmän suunnittelu aloitetaan alustavan hydraulikaavion laadinnasta, jossa määritellään miten hydraulikomponentit kytketään toisiinsa, jotta saadaan halutut liikkeet aikaiseksi. Hydraulijärjestelmän suunnittelun seuraavassa vaiheessa mitoitetaan ja valitaan toimilaitteet. Mitoitus ja valinta perustuvat toimilaitteilta vaadittuihin voimiin tai momentteihin. Laskenta perustuu fysiikan perussuureeseen paine. (3.)

Toimilaitteiden valinnan jälkeen määritellään tilavuusvirrat, joita järjestelmän toiminta vaatii. Useita toimilaitteita sisältävissä järjestelmissä on otettava huomioon samanaikaiset liikkeet eri toimilaitteiden välillä. Samanaikaiset liikkeet vaativat järjestelmän tuotolta enemmän virtausta kuin järjestelmät, joissa on ainoastaan sekventaalisia liikkeitä. Tämä johtuu siitä, että samanaikaisissa liikkeissä tilavuusvirrat summataan yhteen. Yleinen tapa määrittellä samanaikaiset liikkeet on laatia toiminta diagrammi, jossa on esitettyä toimilaitteiden liikkeet ajan suhteen. Tilavuusvirran kasvaessa huomattavan suureksi toimintadiagrammia voidaan käyttää määrittämään viiveitä tiettyjen toimilaitteiden kesken, joiden liikkeet eivät ole aikakriittisiä. Tilavuusvirtojen määrittelyn avustamiseksi voidaan tehdä tilavuusvirtadiagrammi toimintadiagrammin rinnalle. (3.)

Tilavuusvirran tuottamiseen tarvitaan pumppu, jonka koko riippuu maksimaalisesta tilavuusvirrasta, käyttömootorin akselin pyörintänopeudesta ja volymetrisestä hyötysuhteesta. Pumppua käytetään usein oikosulkumootoreilla, jotka pyörivät vakionopeudella. Pyörimisnopeus vaikuttaa pumpun tuottamaan käyntiääneen ja kierrostilavuuteen. Käyttömootorin valinnassa ratkaisevina tekijöinä ovat järjestelmän tyyppi. Tyyppi määrää, millä kierrosnopeudella käyttömootorin kuuluu pyöriä. Pumpun pyöriessä matalilla kierrosnopeuksilla ääni on alhaisempi, mutta pumpulta vaaditaan enemmän kierrostilavuutta. Järjestelmän tyyppi vaikuttaa myös käyttömootorin tyyppin valintaan. Työkoneissa käytetään yleisesti polttomootoreita, mutta esimerkiksi trukeissa käytetään myös pyörimisnopeudeltaan säädettäviä sähkömootoreita. Käyttömootorit jaetaan kahteen päätyyppiin, sähkömootoreihin ja polttomootoreihin. Pumppujen valinnassa otetaan huomioon järjestelmän toiminta, jolloin tiedetään

minkälaisia lämpökuormia pumppuun syntyy. Lämpökuormia kyetään hillitsemään parhaiten säätötilavuuspumpulla, jolloin hyötysuhde paranee. (3.)

Hydraulijärjestelmissä syntyy aina lämpöä, joten suunnittelussa on otettava huomioon syntyvä hukkalämpö ja jäähdytystarve. Jäähdytystarve riippuu järjestelmän koosta, hyötysuhteesta ja tilasta, johon järjestelmä on asennettu. Jäähdytystapoja on useita, mutta useimmiten lämpö johdetaan ilmaan, joko suoraan tai jäähdytysveden välityksellä. (3.)

Hydraulijärjestelmien tehonsiirron suunnittelussa täytyy ottaa huomioon käytetäänkö järjestelmässä nesteen siirtoon putkia vai letkuja. Putkia käytettäessä tehonsiirron hyötysuhde on hieman korkeampi, mutta liikuteltavuus on huonompi. Letkuja käytettäessä paineen noustessa letku myötää ja sen tilavuus muuttuu, joka vaikuttaa hyötysuhteeseen menetettynä energiana. Putkituksessa on otettava huomioon aiemmin mainittujen seikkojen lisäksi putkituksen pituus, putkituksessa olevat mutkat ja liitokset, sekä putkien paineen kesto. Putkiston pituus vaikuttaa nestevirtaukseen. Pituuden kasvaessa viskositeetin aiheuttama vastus, putken seinämän ja nesteen välillä aiheuttaa painehäviöitä. Putkituksessa olevat mutkat aiheuttavat epäsuotuisia turbulensseja virtaukseen, jotka alentavat hyötysuhdetta. Putkituksen liitoksilla on vaikutus hyötysuhteeseen suorasti ja epäsuorasti. Suora vaikutus johtuu liitoksen tyypistä, esimerkiksi kulmaliitoksessa kulman jyrkkyys saattaa aiheuttaa voimakkaita turbulenteja virtauksia ja painehäviöitä järjestelmään. Liitosten epäsuora vaikutus hyötysuhteeseen tulee vuodoista. Kaikki liitokset saattavat alkaa vuotaa ja vuoto vaikuttaa suoraan hyötysuhteeseen hukkaan menneenä energiana. (3.)

## 4 Sääntöteknikka

Sääntöteknikka tutkii laitteen ohjauksen ja toimilaitteen välistä yhteyttä. Sääntöteknikassa pyritään saamaan laite vastaamaan ohjaukseen mahdollisimman tarkasti ja nopeasti. Sääntöteknikan perusajatus on korjata annettua ohjausarvoa mittaamalla toteutunut arvo toimilaitteelta. Arvon korjaamisen mahdollistamiseksi järjestelmän täytyy olla takaisinkytketty, jotta mitattu arvo voidaan syöttää ohjaukseen takaisin.

### 4.1 Ohjearvo

Ohjearvo on järjestelmään syötetty heräte, joka saa järjestelmän pois tasapainotilasta eli ohjearvo saa järjestelmässä tapahtuman, kuten liikkeen aikaiseksi. Ohjearvon suuruutta muuttamalla voidaan tapahtuman, kuten nopeuden, suuruuteen vaikuttaa. Järjestelmään syötetyn herätteen ja tapahtuman välillä on jokaisessa järjestelmässä yksilöllinen vasteaika ja se muuttuu sen mukaan kuinka suuren herätteen järjestelmään syöttää. (1.)

### 4.2 Eroarvo

Järjestelmän säätäminen vaatii takaisinkytkennän, jotta ohjearvoon saataisiin lisättyä eroarvo. Eroarvo saadaan mittaamalla tapahtuman ja herätteen eroa, kun heräte on annettu järjestelmään ja järjestelmässä on tapahtuma käynnissä. Riippumatta siitä, onko eroarvo positiivinen tai negatiivinen järjestelmän takaisinkytkentä pyrkii nollaamaan eroarvon, jotta haluttu tapahtuma saataisiin aikaiseksi. (1.)

## 5 Ohjelmointi

Opinnäytetyössä suoritettu ohjelmointi tehtiin IEC-61131-3-standardin (2.) mukaisesti, käyttäen vain ja ainoastaan standard.lib -kirjastoa, jottei yhteensopivuusongelmia esiintyisi kirjastojen lähteiden takia. Kaikki ohjelmointi suoritettiin alusta loppuun itse, eikä valmiita ohjelmarunkoja käytetty. Ohjelmoinnin lähtökohtana oli oppia käyttämään olio-ohjelmoinnista tuttua rakennetta, jossa pääohjelmasta (Main) kutsuttiin funktioita, joita kutsutaan olioiksi. Lisäksi ohjelma tehtiin siten, että toimiakseen se ei vaadi erityiskomponentteja, vaan kaikki tietojen käsittely, poislukien proportionaaliventtiilien ohjaus, tehtiin ohjelmassa.

### 5.1 Standardi IEC-61131-3

IEC-61131 on IEC:n luoma avoin kansainvälinen standardi ohjelmoitaville loogisille ohjaimille. IEC-61131-standardissa on kahdeksan osaa, josta kolmas IEC-61131-3 käsittelee loogisten ohjaimien ohjelmointikieliä. Standardi pitää sisällään kaksi tekstimuotoista ohjelmointikieltä nimeltään ST (strukturoitu teksti) ja IL (instruction list), sekä kolme graafista ohjelmointikieltä, FBD (function block diagram), LD (ladder diagram) ja SFC (sequential flow chart). (2.)

### 5.1.1 ST strukturoitu teksti

Strukturoitu teksti on muodoltaan samanlaista kuin Pascal-ohjelmointikieli ja se pitää sisällään IEC-61131-3-standardin mukaan kaikki samat toiminnot kuin muut standardin kielet ja sillä voidaan luoda muuttujia sekä kutsua ohjelmia. Kieli muistuttaa hyvin paljon C-kieltä, koska ne jakavat kaikki samat perustoiminnot ja käskyt, kuten kaikki toistorakenteet ja if/else-lauserakenteet. (2.)

Esimerkki strukturoidusta tekstistä.

```
IF ResetClock = TRUE THEN
ResetClock:= FALSE;
END_IF;

IF RevCounterFB.TimerReady = TRUE THEN
RPM:=RevCounterFB.TriggerCount*60;
ResetClock:=TRUE;
END_IF;
```

Esimerkin ensimmäisessä ehtolauseessa määrätään ResetClock-muuttujan ollessa tosi kirjoitettavaksi epätodeksi. Toisessa ehtolauseessa määrätään RevCounterFB-funktiolohkossa olevan TimerReady-muuttujan ollessa tosi RPM-muuttujalle arvo, joka noudattaa RevCounterFB-funktiolohkossa olevan TriggerCount-muuttujan arvoa kerrottuna kuudellakymmenellä. Lisäksi ResetClock-muuttuja määrätään todeksi.

Tehdyssä opinnäytetyössä käytettiin pääosin strukturoitua tekstiä.

### 5.1.2 IL instruction list

Instruction list -ohjelmointikieli toimii nimensä mukaisesti eli ohjelma käy läpi standardoidun käskyjen listaa ja toteuttaa käskyt listan mukaan. Instruction list -ohjelmasta voidaan kutsua muita ohjelmia, jotka on kirjoitettu eri kielellä. (2.)

Esimerkki instruction list -kielestä:

```
LD      Speed
GT      1000
JMPCN  VOLTS_OK
LD      Volts
VOLTS_OK LD 1
ST      %Q75
```

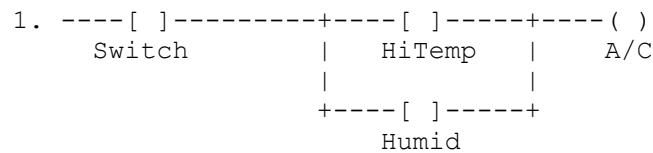
Työssä ei käytetty instruction list -kieltä.



### 5.1.3 LD ladder diagram

Ladder diagram eli tikapuukaavio (kuva 1.) noudattaa samoja periaatteita kuin perinteinen relelogiikka ja perustuu relelogiikan piirustustapaan. Tikapuukaavion yleisin käyttökohde on teollisuuden prosessit, joissa tarvitaan sekventaalista toimintaa. Tikapuukaaviota on käytetty teollisuuslaitosten modernisoinnissa, jossa vanhoja releytkentä tauluja on korvattu ohjelmoitavilla logiikoilla. Tikapuukaaviolla on myös toteutettu hyvinkin vaativia logiikkaohjauksia. Kaikista IEC-61131-3-standardin mukaisista kielistä tikapuukaavio on vanhin ja yleisimmin käytetty kieli. Parhaiten tikapuukaavio soveltuu järjestelmiin, joissa käytetään vain binääritietoja. (2.)

Esimerkki tikapuukaaviosta on esitetty kuvassa 1.

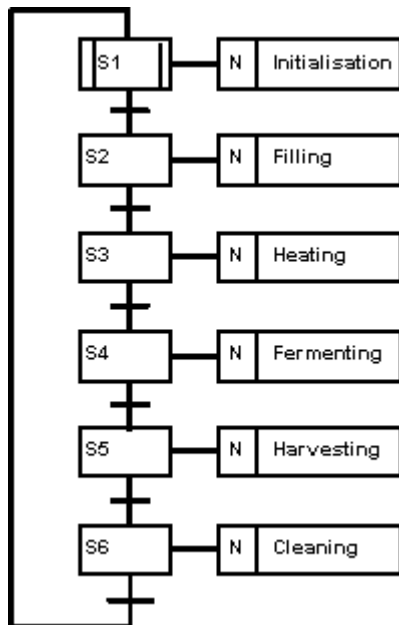


Kuva 1. Tikapuukaavioesimerkki. Katkasijan ollessa painettu ja lämpötilan tai kosteuden ollessa suljettuna ilmastointi käynnistyy.

Työssä ei käytetty tikapuukaavio-kieltä.

#### 5.1.4 SFC sequential flow chart

Sequential flow chart ohjelmointikieli on graafinen kieli, jossa ohjelman eteneminen on kuvattu alaspäin kulkevalla vuokaaviolla, jossa on askeleet ja transiioehdot, joilla askeleista pääsee seuraavaan. SFC-kielessä voi olla alaspäin kulkevia vuokaavioita, jotka toteutuvat sekventaalisesti ja sivuhaaroja, jotka toteutuvat samanaikaisesti. Sivuhaarasta voi aloittaa oman sekventaalisen vuokaavion, joka joko on tai ei ole riippuvainen päähaarasta ja sen tapahtumista. (Kuva 2.) (2.)

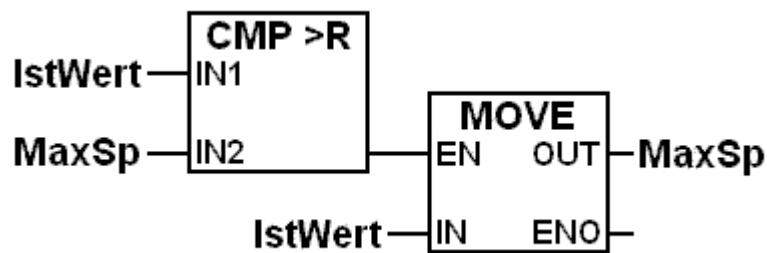


Kuva 2. Sequential Flow Chart. Askeleessa S1 järjestelmä alustetaan. Alustuksen päätyttyä siirtoehto on toteutunut ja siirrytään askeleeseen S2, jossa aloitetaan toiminto Filling. Toiminnon saavutettua asetetun arvon siirtoehto on toteutunut ja siirrytään askeleeseen S3. Näin jatketaan, kunnes päästään viimeiseen askeleeseen. Viimeisen askeleen siirtoehdon toteuduttua siirrytään alkuun.

Tehdyssä opinnäytetyössä käytettiin pääohjelman (Main) tekemiseen SFC-kieltä.

### 5.1.5 FBD function block diagram

FBD eli funktiolohkokaavio (kuva 3) on tikapuukaavion tapainen graafinen ohjelmointikieli, jossa on yksi lähtö ja kaikki siihen kyseiseen lähtöön vaikuttavat tulot ja ehdot määriteltynä sitä ennen. FBD:ssa voi olla useampi samanaikainen vuo, koska yhdessä vuossa ei voi olla kuin yksi lähtö esiteltynä. Sama lähtö ei siten voi esiintyä samassa ohjelmassa kahta kertaa, ellei lähtöä käytetä tulotietona jollekin toiselle lähdölle. (2.)



Kuva 3. Esimerkki funktiolohkokaaviosta. Kaikki tulotiedot on esitelty lohkojen vasemmalla puolella ja lähtötieto on esitelty lohkojen oikealla puolella.

Työssä käytettiin funktiolohkokaaviokieltä.

## 5.2 CoDeSys

CoDeSys on PLC-ohjelmointi alusta, joka noudattaa toiminnaltaan IEC-61131-standardia. CoDeSys on saksalaisen 3S-Smart Software Solutions gmbh -yhtiön valmistama ja markkinoima, se julkaistiin vuonna 1994. CoDeSys-nimi on akronyymi, joka juontuu sanoista Controller Development System. CoDeSys on kaikille käyttäjille ilmainen ja asentaminen on laillista kaikille työasemille. IEC-61131-3-standardin lisäksi CoDeSys tukee standardin ulkopuolista ohjelmointikieltä nimeltä Continuous Flow Chart eli CFC. CoDeSys ohjelmassa ei kuitenkaan ole runtime-ohjelmaa, jolla voisi ohjata suoraan älykkäitä kontrollereita, vaan CoDeSysillä tehty ohjelma täytyy ladata kontrollerille.

CodeSys tukee yleisimpiä kenttäväyläteknikoita, kuten EtherCat, ProfiBus, EtherNet, CANopen ja ProfiNet. CoDeSys ohjelmaan saa ladattua protokollia joillekin järjestelmille, minkä lisäksi kolmansien osapuolten laitekohtaisia protokollia saa integroitua järjestelmään.

Ohjelmassa on myös visualisointimahdollisuus, jossa voidaan visualisoida muuttujien toimintaa ohjelmoinnin ja käyttöönoton helpottamiseksi. CoDeSys mahdollistaa myös lisäosilla järjestelmän ohjaamisen visuaalisen käyttöliittymän avulla. Visualisoinnissa ohjelman muuttujat linkitetään visualisointikentän objekteihin, joita voi olla esimerkiksi viisarinäytöt ja muut vastaavat objektit.

CoDeSysiin on saatavilla myös Soft Motion lisäosa komplekseiden liikkeiden ohjaamiseen.

## 5.3 Beckhoff TwinCat

TwinCat on Beckhoff Oy:n luoma PLC-ohjelma, joka pohjautuu CoDeSys-ympäristöön. Toiminnaltaan TwinCat on samanlainen kuin CodeSys, mutta siinä on Beckhoff Oy:n omia toimintoja ja suoria yhteensopivuuksia Beckhoff Oy: laitteiden kanssa. Työssä käytettiin 2.0-kehitysversiona simuloinnin suorittamiseen. TwinCat on Beckhoff Oy:n lisensoima tuotemerkki, jonka käyttämiseen tarvitaan Beckhoff Oy:n myöntämä lisenssi. Metropolia Ammattikorkeakoululla on vaadittavat lisenssit opiskelijoiden töiden tekemiseen.

## 5.4 EtherCat

EtherCat on Beckhoff Oy:n kehittämä EtherNet-väylätekniikkaan perustuva kenttäväylä tiedonsiirtojärjestelmä, jossa siirrettävä tieto kulkee koko järjestelmän läpi yhtenä pakettina, josta vastaanottaja saa vain sinne tarvittavat tiedot.

Järjestelmän orjalaitteet lukevat master-laitteen lähettämästä viestistä vain sille orjalaitteelle osoitetun viestin, kun viesti kulkee laitteen läpi. Viesti ei kopioidu, kuten perinteisemmissä automaatiojärjestelmien tiedonsiirtoverkoissa.

## 5.5 Ohjelman suunnittelu

Ohjelman suunnittelu aloitettiin tekemällä prosessista yksinkertaistettu vuokaavio. Vuokaavion pohjalta suunniteltiin ohjelmalle pääohjelma, jossa käytettiin sekvenssikaaviota, jolla mahdollistettiin portaittainen toiminta. Sekvenssien sisään rakennettiin prosessit, joita järjestelmässä haluttiin esiintyvän, kuten kierrosluvun säätö ja paineenalennusventtiilien ohjaus. Ohjelman toiminnasta kerrotaan enemmän luvussa 4 Testijärjestelmän ohjelma.

Ohjelmaa suunniteltaessa käytiin läpi eri ohjelmointitapoja ja käytiin keskustelua siitä, millä ohjelmointialustalla työ pitäisi tehdä. Alussa työlle annettiin kaksi mahdollista tapaa toteuttaa se, joita olivat C-kielellä toteutettu ohjelma, jossa käyttöliittymä suunniteltaisiin itse ja PLC-ohjelma, jossa käyttöliittymänä käytettäisiin valittua IEC-standardin mukaista alustaa. Työssä päädyttiin käyttämään jälkimmäistä vaihtoehtoa, koska sitä pidettiin yksinkertaisempänä ja helpompana vaihtoehtona toteuttaa.

## 6 Testijärjestelmän ohjelma

### 6.1 Yleistä

Testijärjestelmän ohjelmointi tehtiin IEC-61131-3-standardin mukaisesti käyttäen sekä Codesys 2.3- että Beckhoff TwinCat 2.0 -PLC-ohjelmaa.

Ohjelman lähtökohtana pidettiin yksinkertaista käyttöliittymää, jossa käyttäjän ei tarvitse tietää, mitä automatiikassa tapahtuu, eikä käyttäjän tarvitse kohdata ohjelman rakennetta. Käyttöliittymä suunniteltiin visuaaliseksi kokonaisuudeksi, jossa perinteiset potentiometrit ja muut säätimet näkyvät näytöllä erilaisina liukupalkkeina, viisari- ja lukunäyttöinä. Käyttöliittymän oli tarkoitus toimia ohjauksen herätteiden säätimenä ja näyttönä mittausten tiedoille. Käyttöliittymään ei suunniteltu sisällytettäväksi mitään säätötekniisiä kokonaisuuksia tai toimintoja, koska ne haluttiin sisällyttää ohjelman automatiikkaan.

Ohjelma suunniteltiin toimivaksi siten, että ohjelman käyttöliittymästä valitaan testattava tuote ja testitapa, jolloin ohjelma aloittaa toimintansa. Ohjelman suorittamia toimintoja olivat järjestelmän eheyden tarkastus, hydraulikkakomponenttien asetusarvojen asettaminen, sähkömoottorin käynnistys, suljetun piirin työpaineiden nosto, tehon takaisinkierrätyksen säätö, pyörintänopeuden hallinta, haluttujen suureiden mittaukset ja järjestelmän toiminnan tarkkailu. Testattavan tuotteen hallinta jätettiin käyttäjälle, jotta käyttäjän olisi helpompi toteuttaa tuotteen huollon jälkeinen mekaaninen säätö.

### 6.2 Käyttöliittymä

Käyttöliittymänä suunniteltiin käytettävän PLC-ohjelman omaa käyttöliittymää ja seuraavaan kehitysversioon suunniteltiin tehtäväksi oma visuaalinen käyttöliittymä, joka tehtäisiin C++ -koodauksella. Uuteen käyttöliittymään suunniteltiin tehtäväksi kaikki käyttäjän tarvitsemat toiminnot, kuten alavetovalikot, säätimet paineelle, näyttötaulut mitattaville suureille ja datan tallennuskansiot.

PLC-ohjelman oman käyttöliittymän yksipuolisuudesta todettiin, että seuraavan kehitysversion luominen käyttöliittymäksi on pakollista, koska PLC-ohjelma

käyttöliittymällä ei pystyttäisi tekemään kaikkia tarvittavia toimintoja ja sen kehittäminen tulevaisuudessa saattaisi olla hankalaa.

### 6.3 Testattavan tuotteen valinta ohjelmassa

Ohjelma suunniteltiin käynnistettäväksi yhdellä tulotiedolla, joka saadaan visuaalisesta käyttöliittymästä, joka kertoo mitä tuotetta ollaan testaamassa. Käyttöliittymään suunniteltiin alavetovalikot, joissa olisi pumppujen valmistaja, tyyppi ja malli. Riippuen valinnasta ohjelma antaa lähtötietona hydraulikkakomponenteille tiedon, joka muuttaa niiden tilan halutuksi.

### 6.4 Järjestelmän eheyden tarkastus

Järjestelmän eheys suunniteltiin tarkastettavaksi siten, että kaikilta komponenteilta saadaan PLC-ohjelmaan tulotietona niiden tila. Tätä tulotietoa verrataan ohjelmaan kirjoitettuun parametriin, joka saatiin ohjelmaan valittaessa testattavaa tuotetta käyttöliittymässä.

Järjestelmän eheys tarkastetaan kaikilta niiltä laitteilta ja komponenteilta, joilla on välitön vaikutus järjestelmän toimintaan, esimerkiksi painesuodattimilta. Oletetaan, että painesuodatin tukkeutuu ja aiheuttaa virtaushäiriön järjestelmään. Tällöin olisi mahdollista, että paine alkaisi kasvamaan järjestelmässä eikä paineenalennusventtiilin avaaminen hyödyttäisi, koska painesuodatin on kytketty järjestelmään ennen paineenalennusventtiiliä. Tapahtuma voisi johtaa järjestelmän rikkoontumiseen, ja se on estettävä. Toisena esimerkkinä paluukanavan suuntaventtiilin asento määrää, kumpaa kautta paluuvirtaus tankkiin tapahtuu, suuntaventtiilin vai virtauksensäätöventtiilin kautta. Jos ohjelmassa on valittuna suljetun pumpun testi ja paluukanavan suuntaventtiili on auki ei painetta pääse syntymään ja testiä ei voida suorittaa.

Järjestelmän eheys tarkastettiin pääohjelman sekvenssissä "Alustus", joka koostui ehdosta, jossa Boolean muuttujien, joiden nimet olivat "SwashPlateChecked", "S1S2PressureReliefValveOperatorCheck" ja "SystemCheckOK", saadessa arvon tosi, boolean muuttuja "Ok" saa arvon tosi ja sekvenssistä voidaan poistua. Alustus-sekvenssissä olleet muuttujat olivat pääohjelmassa esiteltyjen funktiolohkojen sisältä saatuja muuttujia.

Funktiolohkossa "SwashPlateCheck" olevat käskyt alustavat pumppuja ohjaavien liukukulmalevyjen kulmat haluttuun tilaan, jotta jokaisella kerralla, kun ohjelma käynnistetään alkutilanne olisi sama. Tästä funktiolohkosta saadaan arvo "SwashPlateChecked" true tai false.

Funtiolohkossa "ProportionalValveCheck" olevat käskyt alustavat paineenrajoitusventtiilien arvot halutuksi, jotta ohjelmaa käynnistettäessä tilanne olisi vakio. Tästä funktiolohkosta saadaan arvo "S1S2PressureReliefValveOperatorCheck" true tai false.

Funktiolohkossa "SystemCheck" olevien ehtojen toteutuessa muuttuja "SystemCheckOK" saa arvon tosi. Näitä ehtoja ovat valittu ohjelma, suodattimien tukkeutumisindekaattorien tila ja kahden suuntaventtiilin asento. Suodattimien tukkeutumisindekaattorien tilan täytyy olla epätosi ja suuntaventtiilien asennon valitun ohjelman mukainen.

## 6.5 Sähkömoottorin käynnistäminen

Hankitussa sähkömoottorissa on ns. soft start -toiminto, joka mahdollistaa pienempien virtojen käytön käynnistyksessä, jolloin käynnistystapahtuma rasittaa toimitilojen sähköjärjestelmää vähemmän. Ohjelmallisesti toiminnolla ei ole merkitystä, koska sähkömoottori käynnistetään ohjelman lähtötiedon avulla. Lähtötieto syötetään Beckhoff Oy:n digitaalisen ulostulokortin kautta sähkömoottorin ohjaustaulussa olevalle releelle, joka ohjaa sähkömoottorin käynnistysjärjestelmää.

Ohjelmallisesti käynnistys suoritetaan pääohjelman sekvenssissä "Tyopaineennosto" kutsumalla funktiolohkoa nimeltä "ElectricMotorStartUp". Funktiolohko on esiteltyä sekvenssin headerissa nimellä "ElectricMotorStartUpFB". Funktiolohkoon on kirjoitettu globaalille boolean muuttujalle "ElectricMotorStart" arvo true, joka syötetään digitaaliseen ulostulokorttiin. Funktiolohkoon kirjoitettiin ehto, jonka toteutuessa lokaali muuttuja "StartOK" saa arvon tosi, ja sitä käytetään tyopaineennostosekvenssin siirtymäehtona funktiolohkokutsulle "SetWorkPressureCLC". Ehdoksi kirjoitettiin globaalin muuttujan nimeltä "StartButton" arvo true.



## 6.6 Suljetun piirin työpaineiden nosto

Suljetussa piirissä täytyi noudattaa valmistajan ohjeita työpaineiden nostossa, jotta järjestelmä saataisiin toimimaan halutulla tavalla. Järjestelmässä on ajettava moottori ensin täysin auki ja sen jälkeen täysin kiinni, jotta hydraulineeste saadaan virtaamaan oikein ja pystytään nostamaan paineita suljetussa piirissä. Toimintoa ei suunniteltu suoraan ohjelmaan, vaan toiminto suunniteltiin jätettäväksi käyttäjän suoritettavaksi.

Ohjelman sekvenssissä ”Työpaineennosto” kutsutaan funktiolohkoa nimeltä ”SetWorkPressureCLC”. Kyseisessä funktiolohkossa käyttäjän antaman virtaviestin 8-bittinen arvo muutetaan vastaamaan suuruudeltaan 16-bittistä arvoa, joka annetaan globaalille muuttujalle nimeltä ”ClosedCircuitPumpSwashPlateAngleLeft”. Tällä muuttujalla ohjataan suljetunpiirin toisiopumpun kierrosluvun säätävää proportionaaliventtiiliä. Ohjelmaan suunniteltiin ehto, kun muuttuja ”ClosedCircuitSwashPlateAngleLeft” saa arvon, joka ylittää 65000, muuttuu lokaali muuttuja nimeltä ”SetWorkPressureFlag” todeksi. Tämän muuttujan ollessa tosi päästään sekvenssissä seuraavaan vaiheeseen, jossa Boolean muuttuja nimeltä ”WorkPressureSetOK” saa arvon tosi. Boolean muuttujan ”WorkPressureSetOK” ollessa tosi tullaan ”Työpaineennosto”-sekvenssistä pois.

## 6.7 Tehon takaisinkierätyksen säätö

Tehon takaisinkierätyksen suunnittelussa työ aloitettiin olettamuksesta, että testattavan tuotteen virtauksen on oltava suurempi kuin apumoottoreiden yhteen lasketun virtauksen määrä, sillä pyörintänopeudella, millä järjestelmän halutaan pyörivän.

Järjestelmään suunniteltiin säätö mitatun tuoton (l/min) ja apumoottoreiden kierrosluvun ja vaihteiston pyörimisnopeuden välille (l/min). Ohjelmaan suunniteltiin koodi, jossa eroarvoa mitatun tuoton ja apumoottoreille annetun tuoton välillä summataan arvoon nolla. Ylimääräisestä virtauksesta syntynyt paine vapautetaan proportionaalisen paineenalennusventtiilin kautta paluukanavaan.

Tehon takaisinkierätyksen säätö oli haastavin ja tärkein osa koko työtä. Säädön suunnittelu päätettiin jättää tehtäväksi siinä vaiheessa, kun simulointia aletaan suorittaa, jotta nähdään säädön vaikutus suoraan simulointitilanteessa.

## 6.8 Pyörintänopeuden hallinta

Pyörintänopeuden hallinta suunniteltiin toteutettavaksi siten, että mitattua arvoa (1/min) verrattiin asetettuun vakioarvoon 1000 kierrosta minuutissa ja niiden eroarvoa summattiin yhteen kohti nollaa. Kun eroarvo saavuttaa arvon nolla on järjestelmän pyörintänopeus stabiloitu.

Pyörintänopeuden stabilointi suunniteltiin toteutettavaksi ohjaamalla suljetunpiirin järjestelmää lasketun eroarvon suhteen. Koska suljetunpiirin järjestelmässä on yksi kierrostilavuudeltaan säädettävää pumppu ja kierrostilavuudeltaan säädettävä moottori, voidaan toisen pyörintänopeutta kasvattaa tai pienentää muuttamalla pumpun ja moottorin kierrostilavuuden suhdetta.

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_{k1} * n_1 = V_{k2} * n_2$$

$$V_{k1} / V_{k2} * n_1 = n_2$$

Ohjelmaan suunniteltiin funktio, joka toteuttaa yllä mainitut ehdot.

Pyörintänopeuden hallintaa tarvittiin järjestelmässä pääosin järjestelmän vaihtelevan vääntömomentin tarpeen takia. Vääntömomentin tarpeen kasvu alentaa käyttömoottorin pyörintänopeutta.

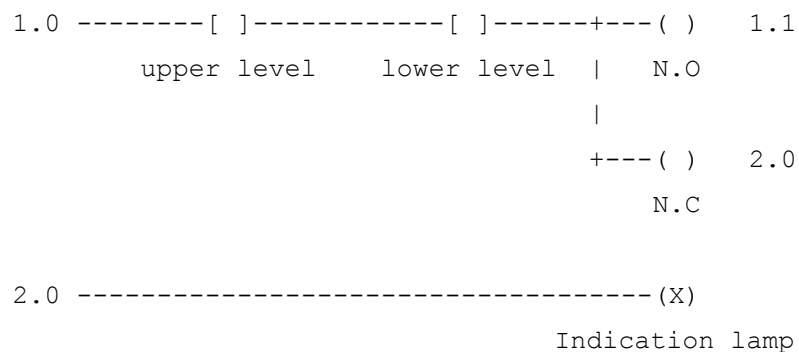
## 6.9 Nestepinnan tason seuranta

Ohjelmaan suunniteltiin nestepinnan tasoa tarkkaileva ohjelma, joka lukee kolmelta eri anturilta tulevaa tietoa. Kaikkien anturitietojen ollessa aktiivisia järjestelmä tulkitsee nestepinnan olevan riittävällä tasolla tuotteiden testaukseen. Nestetankissa ylimpänä sijaitsevan anturitiedon puuttumisesta seuraa käyttäjälle annettu varoitus alhaisesta nestepinnantasosta. Nestetankissa sijaitsevien kahden ylimmän anturitietojen puuttumisesta seuraa pyyntö täyttää nestetankki. Kaikkien anturitietojen puuttuessa järjestelmä suunniteltiin pysähtymään hallitusti ja käynnistämään hälytys sireeni ja hälytysvalo. Järjestelmä suunniteltiin käynnistettäväksi manuaalisesti uudelleen manuaalisen alasajon jälkeen.

Ohjelmallisesti nestepinnan tason seuranta toteutettiin luomalla funktiolohko, jossa yllä mainittujen anturien tiedot käsiteltiin ja niiden arvojen mukaisesti toteutuivat ehdot, jotka määrsivät lähtötietojen tilan. Lähtötiedoiksi suunniteltiin "SystemShutDown", "FillTank", "TankLow" ja "TankOK" -nimiset muuttujat. "SystemShutDown" muuttujan ollessa tosi, ohjelma avaisi paineenalennusventtiilit ja pysäyttäisi sähkömoottorin.

#### 6.10 Valuma-altaan tyhjentäminen

Järjestelmään suunniteltiin valuma-altaan tyhjennysautomaatiikka, joka ei olisi riippuvainen muun järjestelmän tilasta. Automaatiikka suunniteltiin tehtäväksi sähkökytkennöillä toimiviksi, jolloin minkään logiikkaohjelman ei tarvitsisi olla päällä. Valuma-altaan tyhjentämiseen suunniteltiin käytettävän kahta sähkökytkintä, jotka mittaavat valuma-altaan nesteen pinnankorkeuden. Kytkennässä käytettiin normaalisti avoinna olevia kytkimiä. Kummankin kytkimen ollessa suljettuna tyhjennyspumppu käynnistyy. Alemman kytkimen ollessa avoinna ja ylemmän kytkimen ollessa suljettuna pumppu sammuu. Kummankin kytkimen ollessa avoinna järjestelmä sytyttää indikointivalon, joka indikoi valuma-altaan olevan tyhjä. Indikointivalon syttyminen toteutetaan normaalisti suljettuna olevalla releellä, joka kytketään indikointivaloon, syöttöjännitteeseen ja alemman kytkimen lähtöön. (Kuva 4.)

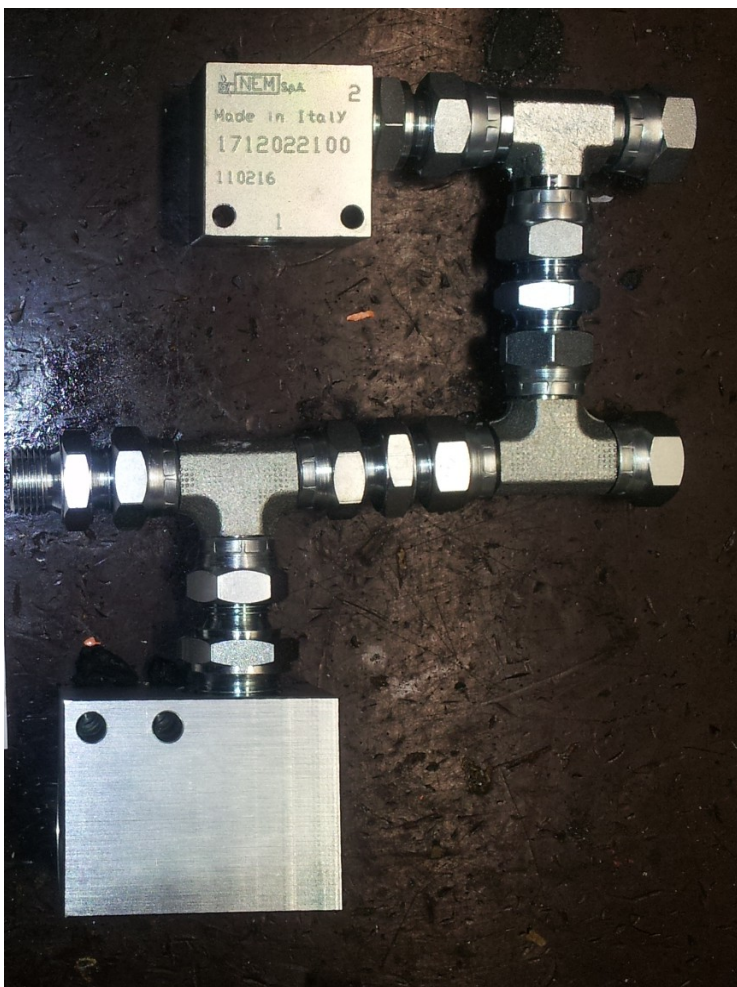


Kuva 4. Indikointivalon kytkentä.

Tyhjennysautomaatiikan kytkennä suunniteltiin tehtäväksi sähkökaappiin, johon tulisivat kaikki järjestelmän sähkökomponentit ja logiikkakomponentit.

## 7 Järjestelmän komponentit

Järjestelmässä käytetyt logiikkakomponentit tämän työn osalta olivat kaikki Beckhoff Oy:n tuotteita. Pumput ja moottorit olivat Linde Oy:n tuotteita ja muut hydraulikomponentit, kuten suodattimet, virtausmittarit ja liittimet (kuva 5) tulivat eri välittäjiltä. Tässä työssä käytetyt komponentit olivat tyypiltään peruskomponentteja, eikä esimerkiksi turvalaitekomponentteja käytetty. Kaikkien elektronisesti ohjattujen komponenttien maksimivirta rajattiin kahteen ampeeriin, jotta välttyttäisiin vahvistinkorttien käytöltä.



Kuva 5. Esimerkkikuva hydraulikkakomponenteista.

Kuvassa esitetyjä komponentteja käytettiin järjestelmän osien mallintamiseen.

## 7.1 Tulot

Tulotietojen käsittelyyn tarvittavat komponentit olivat digitaali- ja analogituloja, joiden käyttöjännite oli 24 VDC. Tulotietojen määrä ja tyyppi saatiin laskettua globaaleiden muuttujien listasta.

### 7.1.1 Digitaaliset sisääntulot

Työssä käytetyt digitaaliset sisääntulot olivat tyypiltään 8-kanavaisia 10 µs:n syklillä toimivia EL 1018 -kortteja, joita työssä suunniteltiin käytettäväksi kaksi kappaletta. Näillä kahdella kortilla suunniteltiin kaikkien globaalien boolean muuttujien lukeminen.

Esimerkki globaaleista Boolean muuttujista.

```
SystemOn AT%IX0.0: BOOL; (*Järjestelmän virransyöttö*)
DrainTankLow AT%IX0.1: BOOL; (*Valuma-altaan alarajan kytkin*)
DrainTankHigh AT%IX0.2: BOOL; (*Valuma-altaan ylärajan kytkin*)
TankFluidTemperature AT%ID15: REAL; (*Tankin nesteen lämpötila*)
CirculationFilterClogIndicator AT%IX0.3: BOOL; (*Kiertosuodatusjärjestelmän
suodattimen tukkeutumisindikaattori*)
ReturnFilterClogIndicator AT%IX0.4: BOOL; (*Tankin paluusuodattimen
tukkeutumisindikaattori*)
S1PressureFilterClogIndicator AT%IX0.5: BOOL; (*S1 kanavan
painesuodattimen tukkeutumisindikaattori*)
S2PressureFilterClogIndicator AT%IX0.6: BOOL; (*S2 kanavan
painesuodattimen tukkeutumisindikaattori*)
MotorReturnfilterClogIndicator AT%IX0.7: BOOL; (*Moottoritestaustinjan
paluulinjan suodattimen tukkeutumisindikaattori*)
```

Esimerkissä on esiteltynä työssä käytettyjä globaaleja boolean muuttujia.

Boolean muuttuja voi saada vain arvon tosi tai epätosi, joten sen käyttäminen digitaalisissa sisääntuloissa on perusteltua, koska digitaalitieto voi olla vain tosi tai epätosi.

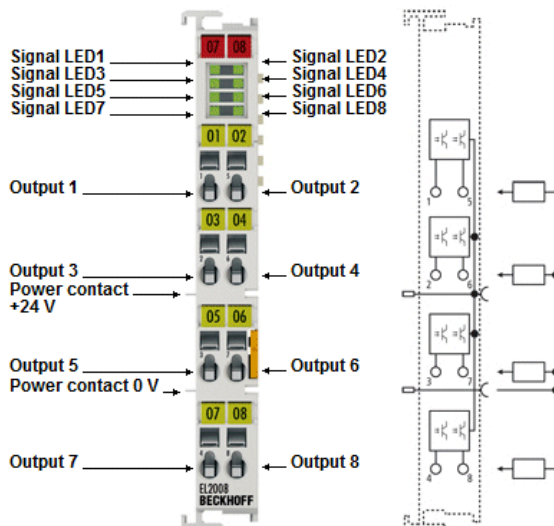
## 7.1.2 Analogiset sisääntulot

Työssä suunniteltiin käytettäväksi 4-kanavaisia 0...20 mA tulotietovirralla toimivia 12-bittisiä EL 2014 -kortteja. EL 2014 -kortteja suunniteltiin käytettäväksi kaksi kappaletta. Näillä korteilla suunniteltiin kaikkien globaalien monibittisten muuttujien lukeminen. Kuvassa 6 on esitettyinä kortti, jolla voidaan mitata tulevia analogisignaaleja. Analoginen tulokortti on vastaavanlainen ulkonäöltään.

Esimerkki työssä käytetyistä analogisista globaaleista muuttujista.

ClosedCircuitPumpOperator AT%ID10: SINT; (\*Suljetun käyttöpiirin pumpun levykulman säädön potikka\*)  
 AuxilliaryPumpOperator AT%ID12: SINT; (\*Apupumpun levykulman säädön potikka\*)  
 TestPumpAndMotorOperator AT%ID14: SINT; (\*Testattavan yksikön levykulman säädön potikka\*)  
 S1S2PressureReliefValveOperator AT%ID16: SINT; (\*Proportionaaliventtiilin ohjaus.\*)

Esitellyt muuttujat ovat käyttäjän hallinnassa olevien fyysisten laitteiden jännite- ja virtaviestien tiloja.



Kuva 6. Analogisen lähtökortin Beckhoff EL 2008 havainnekuva.

Työssä käytettiin kuvassa olevan tapaista tulokorttia, johon kerättiin analogiset tuloviestit.

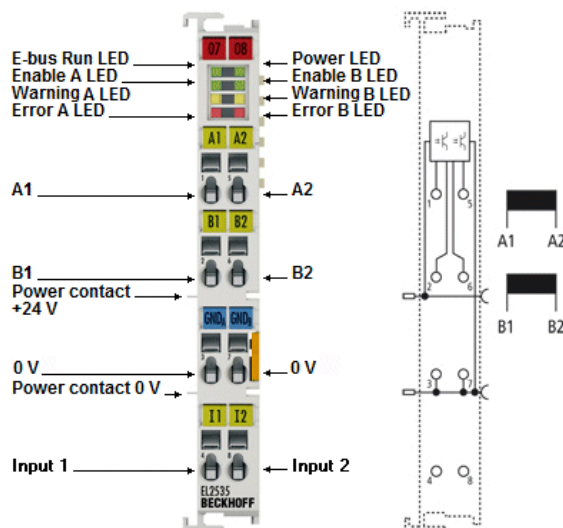
## 7.2 Lähdöt

Työssä käytetyt lähtöjen käsittelyyn vaaditut komponentit olivat analogilähtöjä. Lähtötietojen määrä ja tyyppi saatiin laskettua globaaleidenmuuttujien listasta.

### 7.2.1 Digitaaliset lähdöt

Työhön suunniteltiin käytettäväksi EL 2008 -kortteja kaksi kappaletta, joissa kummassakin on kahdeksan digitaalista 0,5 ampeerin lähtöä.

Proportionaalikomponenttien ohjaukseen suunniteltiin käytettäväksi EL 2535 -pulssileveysmodulaattoria (kuva 7), joka on digitaalinen lähtökortti, jolla voidaan luoda riittävän nopeaa lähtötietoa, jotta se voidaan tulkita analogilähtönä.



Kuva 7. Beckhoff EL 2535 -pulssileveysmodulaattori.

EL 2535 tuottaa maksimissaan kahden ampeerin lähtötietovirran, jolla pystytään ohjaamaan kaikkia työssä tarvittavia proportionaalikomponentteja. Käyttämällä EL 2535 -korttia välttyttiin käyttämästä vahvistinkortteja.

### 7.2.2 Analogiset lähdöt

Työssä ei käytetty analogisia lähtöjä, koska kaikkia virtaviestillä ohjattuja venttiilejä ohjattiin digitaalisella pulssileveysmodulaattorilla.

### 7.3 Hydraulipumput

Hydraulipumpuiksi valittiin Linde HPV-02 -sarjan pumput, jotka olivat mitoitettu tuottamaan 420 bar:n paine. Suljetunpiirin pumpuiksi valittiin HPV75-02R E1 -pumppu, jossa on 75 cm<sup>3</sup> kierrostilavuus, pyörintäsuunnan vaihdon mahdollisuus ja elektroninen ohjaus. Vaihteistoon kytkettäviksi apupumpuiksi valittiin HPV165-02R E1 ja HPV165-02R H1, joissa on 165 cm<sup>3</sup> kierrostilavuus, pyörintäsuunnan vaihdon mahdollisuus ja elektroninen ohjaus E1-mallissa ja hydraulinen ohjaus H1-mallissa. Toinen pumpuista valittiin ohjattavaksi hydraulisesti, koska toisesta pumpusta, jota ohjattiin elektronisesti, saatiin otettua pilottivirtaus, jolla hydraulisesti ohjattavaa pumppua pystyttiin pitämään samoissa säätöarvoissa elektronisesti ohjattavan pumpun kanssa. Elektronisesti ohjattava pumppu toimi virtaviestillä, joka annettiin pumpussa olevaan proportionaaliventtiin, joka muuttaa pumpun kierrostilavuutta.

### 7.4 Hydraulimoottorit

Hydraulimoottoriksi valittiin Linde HVM-02 -sarjan moottori HVM135-02 H1, jossa on 135 cm<sup>3</sup> kierrostilavuus ja hydraulinen ohjaus. Hydraulimoottorin kierrostilavuus on säädettävä ja se toimii hydraulisesti. Tämä moottori tuli osaksi suljetun piirin järjestelmää.

### 7.5 Sähkömoottori

Sähkömoottoriksi valittiin WEG-merkkinen 45 kW:n sähkömoottori testijärjestelmän rungonsuunnittelun yhteydessä. Sähkömoottoriin valittiin nk. Soft start -toiminto, jolla käynnistysvirta saatiin pienemmäksi, jolloin kiinteistön sähköverkko rasittuu vähemmän.

### 7.6 Vaihteisto

Työhön valittu vaihteisto oli italialaisen Breivin vaihteisto malliltaan BZ3-470/00/0,69/ADI.1/S. Vaihteistossa oli vaatimuksina korkea väännönkesto, ja vaihteistossa piti olla kolme tuloa ja yksi lähtö. BZ3 470 -vaihteiston väännönkesto jatkuvalla kuormituksella oli 1200 Nm/akseli 1500 kierroksen minuuttinopeudella ja välityssuhteella 0,69.



## 7.7 Hydraulikomponentit

Hydraulikomponenttien valinta kuului yritykselle, ja niiden valinnassa otettiin huomioon logiikkaohjauksen tarpeet. Komponentit valittiin siten elektronisesti ohjattaviksi ja luettaviksi logiikkaohjaukselle sopivilla virta- ja jänniteviesteillä. Työssä käytettyjä hydraulikomponentteja olivat proportionaaliset paineenalennusventtiilit, suuntaventtiilit, painesuodattimet, virtausmittarit, painemittarit, lämpömittarit ja paluusuodattimet.

## 7.8 Testattavat tuotteet.

Testattavina tuotteina työssä oli Kawasakin KV-sarjan aksiaalimäntäpumput, joissa oli elektroninen tai hydraulinen ohjaus. Työn suunnittelun lähtökohtana pidettiin suurimman KV-sarjalaisen testaamisen mahdollistamista, josta johtui tiettyjen komponenttien suuri koko. Suurin KV-sarjalaisen yhteenlaskettu tilavuusvirta 1000 kierroksen minuuttinopeudella oli 560 l/min mallissa K3V280, jossa oli kaksi 280 cm<sup>3</sup> pumppua.

Kawasakin KV-sarjan pumppujen kierrostilavuutta ohjattiin pumpun omalla hydraulisella tai elektronisella säätimellä.

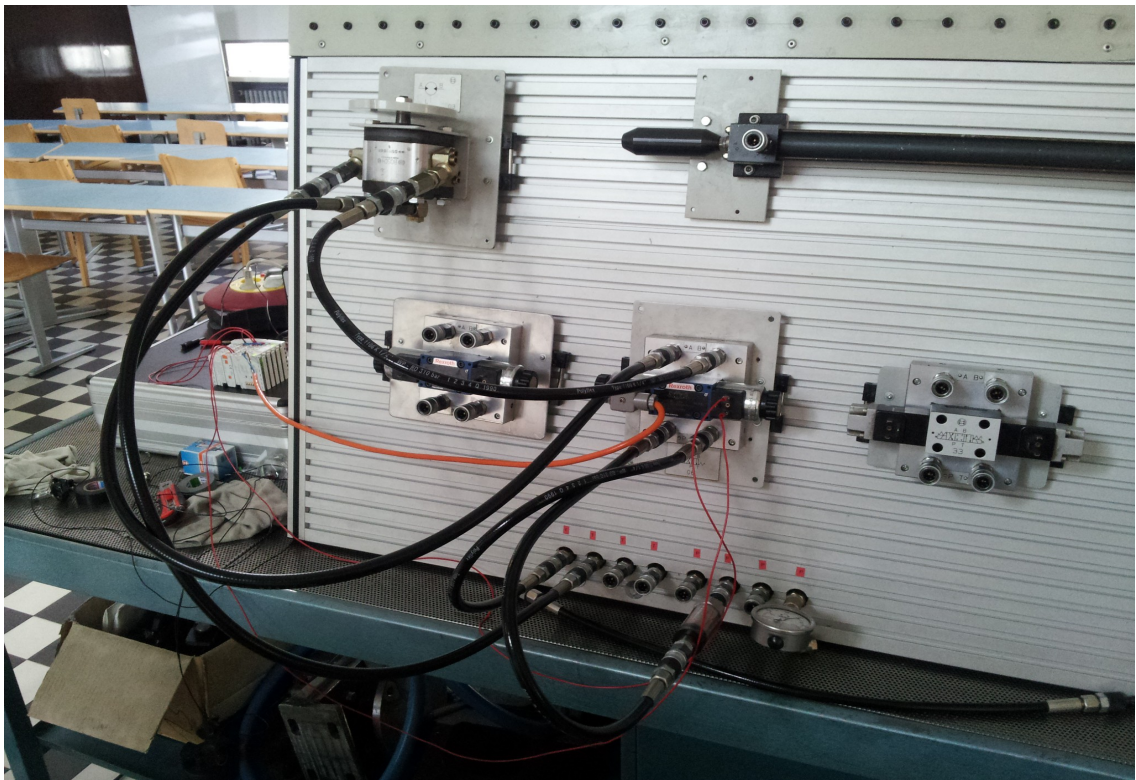
Kawasakin KV-sarjan pumppuja oli suljetunpiirin pumppuja sekä avoimen piirin pumppuja. Avoimelle piirille ja suljetulle piirille tehtiin omat kytkennät testijärjestelmään, jotta virtaus suunnat saatiin oikeiksi. Tämä vaikutti myös ohjelman tekemiseen, koska virtauksen suuntaa järjestelmässä hallittiin ohjelman kautta muuttamalla suuntaventtiilien asentoja. Avoimen piirin testauksessa kaikki hydraulineste johdettiin paluukanavasta tankkiin ja suljetussa järjestelmässä hydraulineste pidettiin käytännössä järjestelmän sisällä.

Lisäksi ohjelmalla haluttiin testata hydraulimoottoreita, joiden kytkennässä testijärjestelmään oli huomattavia eroja verrattuna suljetunpiirin ja avoimen piirin pumppuihin. Ohjelman suunnittelussa hydraulimoottoreiden testaus otettiin huomioon, mutta jätettiin seuraavaan kehitysversioon toteutettavaksi.

## 8 Järjestelmän simulointi

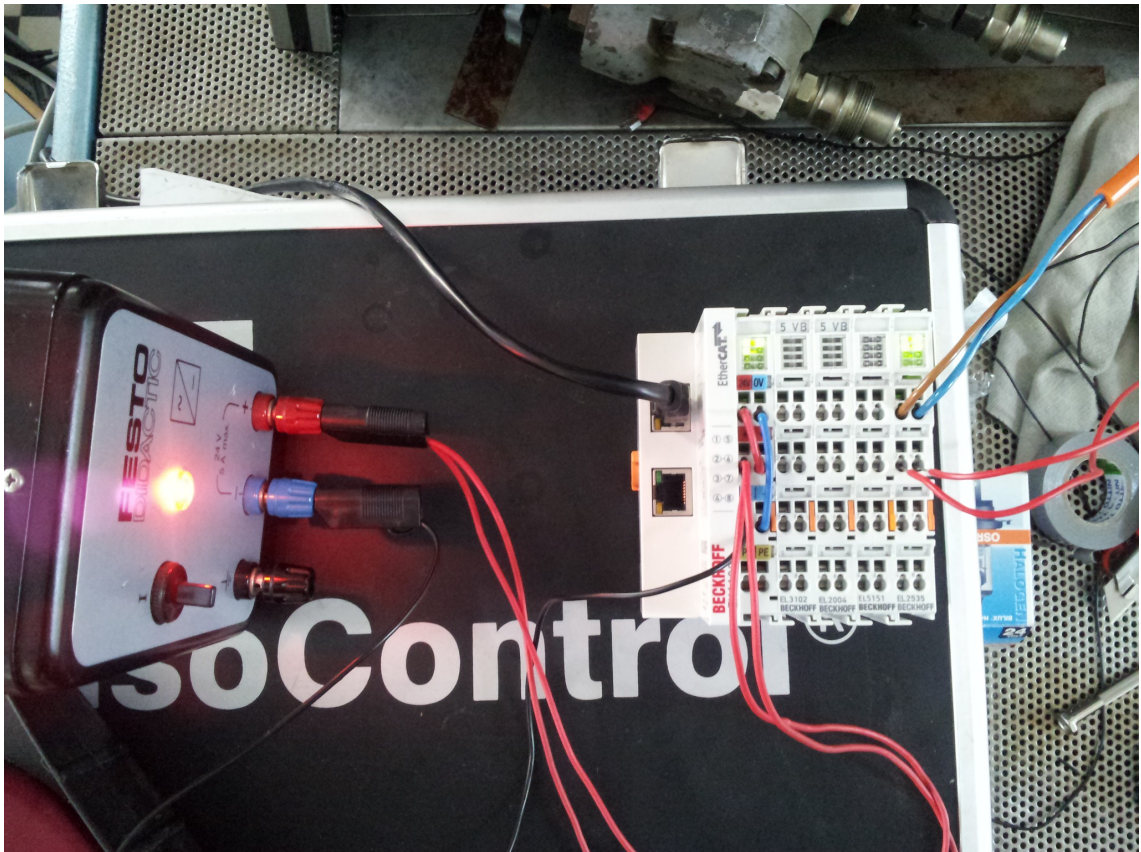
Järjestelmää ohjaavan ja säätävän ohjelman tekemiseksi oli luotava simulointi ympäristö, jossa vastaavilla tuotteilla simuloitiin järjestelmän komponentteja ja niiden toimintaa. Ohjelmoinnin kannalta tällä vaiheella oli suuri merkitys työn etenemisessä ja onnistumisessa. Tässä opinnäytetyössä simulointi oli työn päätepiste, jossa tehty suunnitelma testattiin siinä kokonaisuudessa kuin mihin se oli saatu.

Järjestelmää simuloitiin kokoamalla Metropolia ammattikorkeakoulun energiatekniikan laboratorioon hydraulinen järjestelmä (kuva 8), joka oli toiminnaltaan sen kaltainen, että sillä voitiin simuloida osaa tulevasta järjestelmästä. Simulointijärjestelmä koostui virtausmittarista, painemittarista, proportionaalisuuntaventtiilistä, hydraulimoottorista, laboratorion hydrauligregaatista, sekä tietokoneohjatusta Beckhoff Oy:n logiikkajärjestelmästä. Simuloinnin tarkoituksena oli testata proportionaaliventtiilien ohjauksen toimintaa ohjelman kannalta.



Kuva 8. Järjestelmän simulointimalli.

Simulointi onnistui ja siitä saatua tietoa voitiin käyttää suoraan järjestelmän ohjelman luomiseen. Tieto saatiin kerättyä työssä käytetyillä logiikkakomponenteilla (kuva 9).



Kuva 9. Simulointimallin virtalähde ja logiikkakomponentit.

Järjestelmän osaa, jota simuloitiin ohjattiin suoraan tietokoneelta antamalla muuttujille arvoja manuaalisesti. Simuloinnissa ohjattiin proportionaalista suuntaventtiiliä Beckhoff Oy:n pulssileveysmodulaattorilla. Venttiilille annattujen arvojen mukaan saatiin järjestelmässä olevaa hydraulimoottoria käytettyä eri nopeuksilla. Nopeuden säädössä päästiin lähes portaattomaan säätöön.

Proportionaaliventtiilien ohjauksessa käytettiin Beckhoff EL 2535 -pulsileveysmodulaattoria, joka toimi 16-bittisellä arvoalueella. Simuloinnin yhteydessä todettiin, että EL 2535 -kortissa oli sisäänrakennettu takaisinkytkentä, joten aiemmin suunnitellusta takaisinkytkennän ohjelmallisesta toteuttamisesta luovuttiin. Toimilaitteen ohjaus pulssileveysmodulaattorilla EL 2535 oli toteutettu siten, että toimilaitteen ohjaustiedoksi voitiin antaa maksimissaan puolet 16-bittisestä arvosta ja loput oli varattu takaisinkytkennälle. Takaisinkytkennällä saatiin säädettyä toteutunut arvo vastaamaan annettua ohjearvoa, joka tässä yhteydessä tarkoitti virran määrää proportionaaliventtiilin kelalla.

Simuloinnissa huomattiin, että valituilla komponenteilla tarvittiin yli puolen ampeerin virta proportionaaliventtiilille, jotta hydraulimoottori saatiin liikkeelle. Alemmilla virroilla proportionaaliventtiilin läpi kulkenut virtaus ei riittänyt pyörittämään moottoria vaan kaikki virtaus johtui moottorin ohivirtauskanavaan ja sitä kautta tankkiin. Kun pulssileveysmodulaattorilta annettua virtaa nostettiin yli puolen ampeerin ja lähestyttiin yhtä ampeeria, mikä oli maksimivirta, jota hankitulla pulssileveysmodulaattorilla voitiin tuottaa, saatiin hydraulimoottori pyörimään. Tämä johtui valitun hydraulimoottorin korkeasta käynnistymismomentista, jota ei voi sähköisesti korjata. Hydraulimoottorin saavutettua tasainen pyörivä liike, voitiin pulssileveysmodulaattorin antamaa virran määrää pienentää ilman, että hydraulimoottorin liike pysähtyi. Antovirran pienentämisen jälkeen voitiin hydraulimoottorin nopeutta säätää melkein portaattomasti.

Simulointijärjestelmään kytketyt paine- ja virtausmittarit olivat kytkettynä järjestelmään, jotta voitiin tarkkailla laboratorion järjestelmän toimintaa. Käytetyissä mittareissa ei ollut elektronisia liityntöjä, joten niiltä ei voitu lukea dataa logiikkaohjausjärjestelmään.

## 9 Loppusanat

Toteutukseltaan työn vaativuus vastasi insinööriyön vaatimuksia ja laajuudeltaan työ oli riittävä. Työn aikana ei käytetty projektin suunnittelemisen, toteutuksen, eikä hallinnoinnin työkaluja, mikä näkyi selkeänä viiveenä työn valmistumisessa. Työn myöhästymisen johdosta ohjelmaa ei päästy testaamaan varsinaisessa testausjärjestelmässä vaan ohjelma testattiin CoDeSysin simulointitilassa muuttamalla muuttujien arvoja ja Metropolia Ammattikorkeakoulun laboratoriossa käyttäen Twincatin runtime-tilaa. Tehty simulointi ei vastaa todellista tilannetta oikeassa järjestelmässä, mutta antaa selkeän kuvan siitä minkälainen valmiin tuotteen olisi pitänyt olla. Myöskään yrityksen järjestelmä ei ollut riittävän valmis ohjelman testaamiseen.

Työn suorittaminen antoi hyvän kuvan siitä miten ohjelmia voidaan tehdä käyttämällä IEC-standardin mukaisia kieliä. Työssä ilmennyt projektinhallinnan puute osoitti, miten tärkeästä asiasta projektinhallinnassa on kyse liike-elämässä ja teollisuudessa tehdyissä projekteissa. Vaikkakin työnä oli suunnitella ohjelma testausjärjestelmälle, työssä pääsi lukemaan hydraulikaaviota, tutustumaan erilaisiin komponentteihin ja niiden toimintaan sekä laskemaan hydraulikkasuunnittelussa tarvittavia laskuja. Työn eri vaiheet selkeyttivät sitä kokonaisuutta, jota tarvitaan ohjelmoinnin onnistumiselle ja sitä kuinka monta samanaikasta ja eriaikaista vaihetta ohjelman suunnittelussa ja toteutuksessa on.

Työn suorittaminen antoi hyvät lähtötiedot työelämään siirtymiselle hydraulikan, ohjelmoinnin ja suunnittelun pariin. Itsenäisen suorittamisen kautta työ antoi parhaan mahdollisuuden kehittyä koneautomaatioinsinööriä.

## Lähteet

- 1 Bolton, W. 2011. Mechatronics. Harlow: Pearson Education.
- 2 IEC-standardi. 2013. Verkkodokumentti. International Electrotechnical Commission. <[www.iec.ch](http://www.iec.ch)>. Luettu 27.8.2013.
- 3 Paavilainen Heikki. 2012. Hydraulijärjestelmät. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.