

Tomi Ilonen

# Sytronix -koelaitteiston suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

6.5.2013

Tekijä Otsikko	Tomi Ilonen Sytronix -koelaitteiston suunnittelu
Sivumäärä Aika	41 sivua + 2 liitettä 6.5.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Koneautomaatio
Ohjaaja(t)	Lehtori Heikki Paavilainen Tekninen asiantuntija Ville Vidqvist
<p>Tämän insinöörityön tarkoituksena oli tutustua toimeksiantajan, Bosch Rexrothin kehittämään Sytronix-sähkömoottorihjausjärjestelmään. Työn toimeksiantona oli rakentaa koelaitteisto, jolla voidaan testata kyseistä järjestelmää ja verrata sen ominaisuuksia venttiili-ohjattuun hydraulikkajärjestelmään. Tavoitteeksi asetettiin tarvittavien sähkökuvien piirtäminen, koelaitteiston rakennuksessa avustaminen sekä testaus ja tulosten analysointi. Koelaitteisto ja sen vaatima tila olivat toimeksiantajan puolelta jo valmiiksi valittuina.</p> <p>Työn toteutuminen ei kaikilta osin täysin onnistunut. Suunnitellut sähkökaaviot piirrettiin, mutta koelaitteelle varattua tilaa tarvittiinkin muuhun käyttöön, eikä rajallisen ajan vuoksi uutta tilaa keritty järjestämään. Niinpä koelaitteisto jäi tekemättä ja käytännön kokeiden sijaan testit jouduttiin tekemään simuloimalla. Simulointia varten luotiin kaksi eri alustaa, toinen Sytronix-järjestelmälle ja toinen venttiili-ohjausta varten.</p> <p>Simuloidessa kummallekin järjestelmälle määriteltiin omat parametrit järjestelmien todellisten arvojen mukaan sekä samat parametrit niiden toimilaitteiden osalta, jotka ovat molemmissa järjestelmissä samoja. Simulaatioiden jälkeen tarkasteltiin ja vertailtiin saatuja tuloksia keskenään. Keskeisimpinä tuloksina voitiin todeta, että Sytronix-järjestelmä on energia- tehokas ja yhtä nopea kuin venttiili-ohjaus.</p> <p>Opinnäytetyötä varten tutkittu teoria sai tukea simulaatioiden tuloksista, joten tämän työn pohjalta toimeksiantaja voi jatkaa projektia koelaitteiston rakentamisen ja käytännön testusten parissa, kun sopiva aika ja paikka löytyvät.</p>	
Avainsanat	Sytronix, sähkömoottorihjaus, venttiili-ohjaus

Author Title	Tomi Ilonen Planning of Sytronix testing environment
Number of Pages Date	41 pages + 2 appendices 6 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Machine Automaton
Instructor(s)	Heikki Paavilainen, Lecturer Ville Vidqvist, Technical Support
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to explore Bosch Rexroth's Variable Speed Pump Drive called Sytronix. The target of this thesis was to sketch schematic diagrams for Sytronix electronics, and to assist with the installations of the testing environment and test the Sytronix system and valve-controlled hydraulic system with it and finally compare the results. All the components and space for the testing environment were already chosen by the client.</p> <p>The schematic diagrams were sketched as planned, but the testing environment, however could not be created because there was another use for the space where the testing environment was supposed to be built in. Instead of practical testing, the results of the tests were achieved by simulating. Two templates were created for the simulations, one for Sytronix and the other for the valve-controlled hydraulic system.</p> <p>Both templates were adjusted by parameters based on the current system particles and by similar parameters for the common parts. After simulation the results were compared to each other. The most interesting and important results were that the Sytronix system is energy efficient and as fast as the valve controlled hydraulic system.</p> <p>In conclusion, it was discovered that the theory researched for this thesis got support from the simulations. Based on this thesis, the employer is going to continue this project in future by creating the testing environment and accomplishing the practical tests as soon as there will be enough time and a suitable space has been found.</p>	
Keywords	Sytronix, Variable speed pump drive, valve

# Sisällys

## Lyhenteet

## Käytetyt SI-järjestelmän suureet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoite	1
2	Bosch Rexroth	2
2.1	Yritysesittely	2
2.1.1	Liikkuvan kaluston sovellukset	2
2.1.2	Teollisuussovellukset	2
2.1.3	Uusiutuvat energiat	3
2.2	Bosch Rexroth lukuina	3
3	Hydrauliikkajärjestelmät	4
3.1	Edut ja haitat	4
3.2	Avoin ja suljettu järjestelmä	5
3.3	Venttiilisäätöinen hydrauliikkajärjestelmä	8
3.3.1	Proportionaali- ja servoventtiilit	8
3.3.2	Proportionaaliventtiilien toimintaperiaate	9
3.3.3	Venttiilien staattiset ja dynaamiset ominaisuudet	10
3.4	Pumppusäätöinen hydrauliikkajärjestelmä	14
3.4.1	Vakiotilavuuspumput	15
3.4.2	Muuttuvatilavuuksiset pumput	16
3.5	Sytronix	19
3.5.1	FcP 5000 (Frequency Controlled Pump Drive)	20
3.5.2	DFEn 5000 (Druck- und Förderstrom-Regelsystem)	21
3.5.3	SvP 7000 (Servo Variable Pump Drive)	22
4	Koelaitteisto	23
4.1	Moottori	24
4.2	Hydrauliikkakomponentit	24
4.2.1	Pumppu	25
4.2.2	Venttiilit	26
4.2.3	Sylinterit	26
4.3	Sähköohjauskomponentit	27

4.4	Ohjelmistot	28
5	Testitulokset	28
5.1	Simulointi	28
5.1.1	Asemaanajo	29
5.1.2	Vasteajat	32
5.1.3	Energiankulutus	34
5.2	Esimerkkejä energiatehokkaammista ratkaisuista	36
5.3	Käytännön kokeet	38
6	Yhteenveto	39
	Lähteet	41
	Liitteet	
	Liite 1. Kytkenäkaaviot	
	Liite 2. Osaluettelo	

## Lyhenteet

CP	Constant Pressure, vakiopaine
CPU	Constant Pressure Unloaded, kevennetty vakiopaine
DC	Direct Current, tasavirta
DFEn	Druck- und Förderstrom-Regelsystem, paineen- ja tilavuusvirranohjausjärjestelmä
ELS	Electric Load Sensing, sähköhydraulinen kuormantuntevasäätö
FcP	Frequency Controlled Pump Drive, taajuusmuuntajalla ohjattava sähköpumppujärjestelmä
LS	Load Sensing, kuormantunteva säätö
SvP	Servo Variable Pump Drive, servomootorilla säädettävä tilavuusvirtasäätöinen pumppujärjestelmä

## Käytetyt SI-järjestelmän suureet:

bar	Baari, ilmanpainetta kuvaava suure
dB	Desibeli, tehosuureiden suhdetta logaritmisella asteikolla mittaava yksikkö
kW	Kilowatti, tehoa mittaava yksikkö, tuhat wattia
min <sup>-1</sup>	Kierrosta minuutissa, kierrosnopeutta kuvaava yksikkö
ms	Millisekunti, aikaa mittaava suure, sekunnin tuhannesosa
Nm	Newton-metri, momenttia mittaava yksikkö
p	Muuttujan tunnus, kuvaa tässä työssä painetta
Q	Muuttujan tunnus, kuvaa tässä työssä tilavuusvirtaa

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Tuotantoteollisuuden hydraulikkajärjestelmät ovat pääsääntöisesti venttiiliohjattuja, paljon melua aiheuttavia ja kustannuksiltaan kalliita. Laitteistot, joiden käsittelemät paineet ja kuormat ovat suuria, tarvitsevat erillisiä jäähdytysjärjestelmiä, jotka nostavat kustannuksia entisestään. Pumppujen ja moottoreiden jatkuva paineen- ja tilavuusvirranto kuluttavat osia, aiheuttavat ylimääräisiä vuotoja sekä tuottavat painehäviötä. Moottoreiden suuret kierrosnopeudet ja venttiilien jatkuva liike tuottavat melua niin paljon, että niiden erillinen vaimennus on lähes välttämätöntä.

Tämän työn tilaaja Bosch Rexroth on kehittänyt uudenlaisen Sytronix-järjestelmän, jonka tarkoitus on yhdistää hydraulikan teho ja sähköohjauksen tarkkuus yhdeksi, hyötysuhteiltaan ja kustannustehokkuudeltaan paremmaksi hydraulikkajärjestelmäksi. Sytronix-järjestelmien luvataan olevan 30 - 80 % energiatehokkaampia kuin tavalliset venttiiliohjatut hydraulikkajärjestelmät. Sytronixin eri variaatioiden myötä löytyy ratkaisu niin pieniin kuin todella suuriinkin hydraulikkajärjestelmiin.

## 1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoite ja tarkoitus on verrata Sytronix-järjestelmän staattisia ja dynaamisia ominaisuuksia nopean vasteajan proportionaaliventtiileillä ohjattujen hydraulikkajärjestelmien vastaaviin ominaisuuksiin. Vertailua varten rakennetaan koelaitteisto, jonka avulla saadaan mitattua kummastakin järjestelmästä ainakin askelvaste, paikoitustarkkuus ja energiatehokkuus. Koelaitteistosta tehdään myös simulaatio siltä varalta, ettei koelaitteistoa päästä rakentamaan.

Ensimmäinen käsittelykappale pitää sisällään yritysesittelyn työn tilaajasta Bosch Rexrothista. Sen jälkeen käsitellään ensin yleisesti hydraulikkajärjestelmiin kuuluvia komponentteja sekä käydään läpi erilaisia hydraulikkajärjestelmämalleja ja myöhemmin paneudutaan tarkemmin Sytronix-järjestelmien toimintaan ja sen tuomiin etuihin.



## 2 Bosch Rexroth

### 2.1 Yritysesittely

Bosch Rexroth on kone- ja rakennusteollisuuden yritysten maailmanlaajuinen kumppani, joka toimittaa monipuolisesti automaatiokomponentteja ja innovatiivisia ratkaisuja. Tuulivoimaloiden vaihteistojen lisäksi Bosch Rexrothin mobiilihydrauliikka liikuttaa nostimia, kaivinkoneita tai muita ajoneuvoja maailman pisimmissä tunneleissa ja korkeimmissa rakennuksissa. Vuosikymmenien ajan yritys on toimittanut käyttölaite- ja ohjausjärjestelmiä aina auto- ja terästeollisuudesta konditoriatuotteiden valmistukseen saakka. Bosch Rexroth on jaoteltu markkinasegmenttien ja toimialojen mukaan kolmeen Business Unit -liiketoimintayksikköön: liikkuvan kaluston sovellukset, teollisuussovellukset sekä uusiutuvat energiat. /7./

#### 2.1.1 Liikkuvan kaluston sovellukset

Suurien työkonoiden kehityksessä on sopeuduttava jatkuvasti muuttuviin reunaehtoihin. Esimerkiksi päästöstandardit rajoittavat päästömääriä merkittävästi, mutta työkonon pitäisi silti tuottaa vähintään tavanomainen teho. Tällaisiin haasteisiin Bosch Rexroth luo yhdessä asiakkaan kanssa ratkaisuja. Uusien työ- ja ajohydrauliikkakonseptien myötä yritys varmistaa, että siirrettävät työkonot ovat kaikkien määräysten mukaisia ja tunnelien poraaminen, rakennuskuopan kaivaminen sekä mahdollisimman luontoystävällinen metsätalous onnistuvat niiden puitteissa. /7./

#### 2.1.2 Teollisuussovellukset

Teollisuussovellukset jakautuvat koneenrakennukseen sekä tehdasautomaatioon. Rakennusteollisuuden ainutlaatuisiin haastaviin projekteihin Bosch Rexrothilta löytyy lukuisia käyttölaite- ja ohjaustekniikkaratkaisuja. Tehdasautomaatioon yritys luo energiatehokkaita ja tuottavia järjestelmäratkaisuja yhdistämällä hydrauliikan, pneumatiikan ja mekaniikan edut sähköisten käyttölaitteiden ja ohjauksen tarkkuuteen. Standardien mukainen turvallisuus ja energiatehokkuus ovat tärkeimpiä asioita näitä suunniteltaessa. /7./

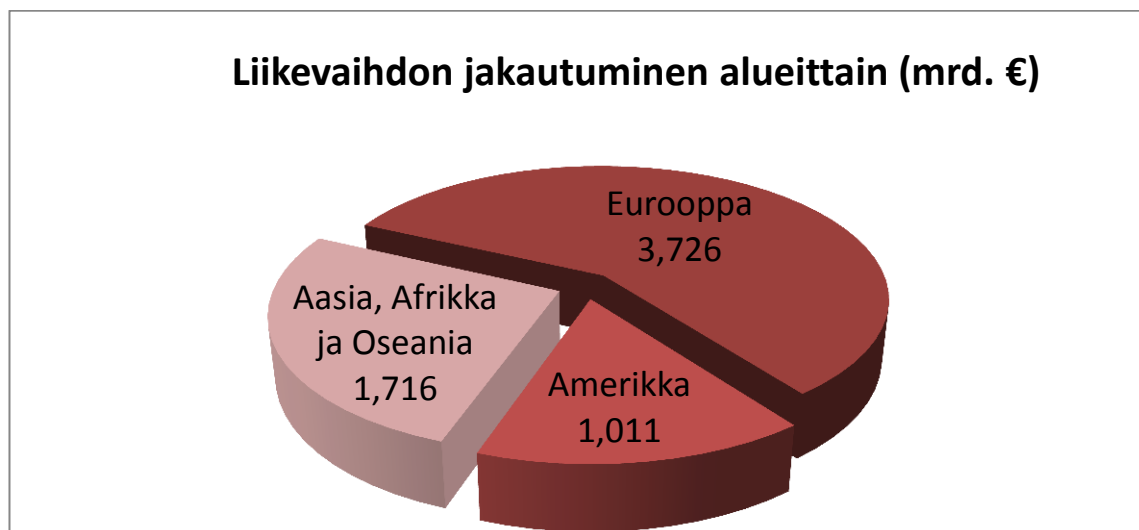
### 2.1.3 Uusiutuvat energiat

Bosch Rexroth on ollut 1980-luvulta lähtien mukana lisäämässä tuulivoimaloiden tehokkuutta lähes 50-kertaiseksi. Se on kehittänyt yhä tehokkaampia ja luotettavampia vaihteistoja, jotta energian siirto olisi mahdollisimman tehokasta. Nyt uutta uusiutuvaa energianlähdettä kehitellään merienergiasta. Ensimmäisissä prototyypeissä on jo Bosch Rexrothin ratkaisuja, jotka muuntavat aaltojen liikkeitä ja muita veden virtauksia sähköksi. /7./

### 2.2 Bosch Rexroth lukuina

Bosch Rexroth on saanut alkunsa vuonna 1795 Georg Ludvig Rexrothin teräspajasta. 200-vuotisen historian siivittämänä Bosch Rexrothilla on nykyään noin 38 000 työntekijää valmistus- ja kustomointitoimipaikoissa 25 maassa sekä jälleenmyyjinä yli 80 maassa. Työntekijöistä vajaa 29000 työskentelee Euroopassa, noin 3 300 Amerikassa ja loput 6 000 Aasian, Afrikan ja Oseanian alueilla. Kaikki kolme liiketoimintayksikköä mukaan lukien käyttösovelluksia karttuu yhteensä 44 alalta ympäri maailmaa. /7./

Bosch Rexrothin vuoden 2011 liikevaihto oli yli 6,4 miljardia euroa jakautuen alueittain kolmeen pääosaan kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. Bosch Rexrothin liikevaihdon jakautuminen alueittain /7/

### 3 Hydrauliikkajärjestelmät

Hydrauliikkajärjestelmissä siirretään voimaa väliaineen kautta. Yleisimmin väliaineena toimivat erilaiset öljyt, sillä niillä on suuri viskositeetti, eli kyky vastustaa virtausta ja niiden kokoonpuristuvuus on vähäistä. Hydrauliikkajärjestelmän tarkoitus on muuntaa mekaaninen energia hydrauliseksi energiaksi, joka siirretään putkia tai letkuja pitkin toimilaitteelle. Toimilaitteella hydraulinen energia muunnetaan takaisin mekaaniseksi energiaksi toimilaitteen liikkeiden myötä. /4, s.161 - 165./

#### 3.1 Edut ja haitat

Hydrauliikkajärjestelmän etuja ovat

- mahdollisuus tuottaa suuria voimia ja momenteja
- portaaton nopeuden, voiman ja momentin säätö
- yksinkertainen ylikuormitussuoja
- muunneltavuus /4, s.161/.

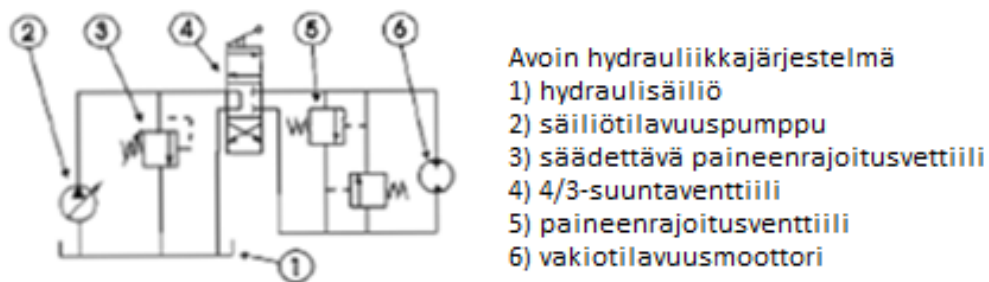
Hydrauliikkajärjestelmän haittapuolia ovat

- huono hyötysuhde ( $\eta = 0,6 - 0,8$ )
- tiivistysongelmat
- epäsiisteys
- jatkuva huoltotarve /4, s.161/.

### 3.2 Avoin ja suljettu järjestelmä

Hydrauliikkajärjestelmiä on sekä avoimia että suljettuja, ja niiden säätö sekä ohjaus voidaan toteuttaa monella tavalla. Mekaaninen energia voidaan muuttaa hydrauliseksi energiaksi sähkömoottoreiden ja erilaisten pumppujen avulla. Niiden tuottamaa tilavuusvirtaa ja painetta voidaan ohjata venttiilien ja sähköisten säätöpiirien avulla, jolloin toimilaitte saadaan liikkumaan halutulla tavalla.

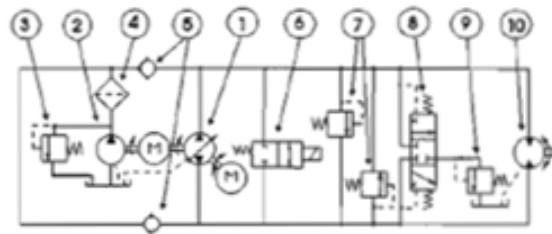
Kuvasta 2 nähdään, että avoimessa hydrauliikkajärjestelmässä on suuri säiliö, josta neste pumpataan toimilaitteelle. Sieltä neste palautuu takaisin säiliöön, josta se lähtee taas uuteen kiertoon. Avoimessa hydrauliikkajärjestelmässä on yksisuuntainen pumppu ja toimilaitteen liikkeitä sekä järjestelmän suuntaa ohjataan venttiileillä. Tällaista järjestelmää kutsutaan venttiiliohjatuksi. Avoimen hydrauliikkajärjestelmän etuna on se, ettei erillistä jäähdytysjärjestelmää aina tarvita, sillä hydraulineste jäähtyy suuressa säiliössä. /4, s. 161 - 165; 9./



Kuva 2. Avoin hydrauliikkajärjestelmä /4, s.163/

Työkoneiden työhydrauliikka, eli kaikkien toimilaitteiden kuten nostopuomien sylinterien liikkeet on toteutettu avointa hydrauliikkajärjestelmää hyödyntäen. Normaalisti toimilaitteille tuotetaan tilavuusvirta yhden pumpun avulla, mutta joissain tapauksissa pumppuja voi olla useitakin. Jos ohjattavia toimilaitteita on useampia ja pumppuja vain yksi, kasvaa hukkatehon määrä huomattavasti. /4, s. 161 - 165./

Suljetussa järjestelmässä toimilaitteen liikesuuntaa ohjataan kaksisuuntaisella pumpulla. Toimilaitteelta palaava neste ohjataan pumpun imupuolelle, eikä järjestelmässä ole suurta erillistä säiliötä (ks. kuva 3).



Suljettu hydraulikkajärjestelmä

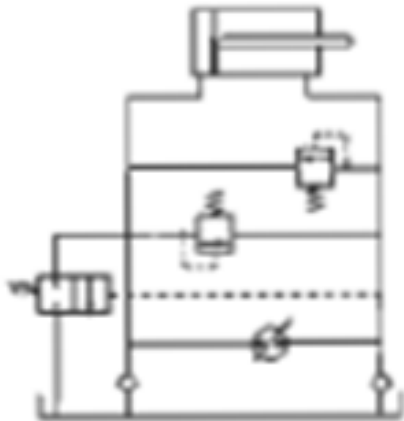
- 1) kaksisuuntainen säätötilavuuspumppu
- 2) vakiotilavuuspumppu
- 3) paineenrajoitusventtiili
- 4) suodatin
- 5) vastaventtiili
- 6) 2/2-suuntaventtiili
- 7) paineenrajoitusventtiili
- 8) 3/3-suuntaventtiili
- 9) paineenrajoitusventtiili
- 10) vakiotilavuusmoottori

Kuva 3. Suljettu hydraulikkajärjestelmä /4, s. 164/

Suljetussa hydraulikkajärjestelmässä nesteen jäähdytyksestä on huolehdittava erikseen, sillä se on koko ajan kierrossa eikä pääse jäähtymään itsestään. Järjestelmän vuotoja kompensoimaan tarvitaan erillinen pumppu ja pieni säiliö, josta otetaan vuotoissa häviävä neste. /4, s. 161 - 165./

Suljetun järjestelmän käyttö on yleistä erilaisissa moottorikäytöissä ja liikkuvissa koneissa, joissa ajovoimansiirto on toteutettu hydrostaattis-mekaanisesti.

Avoimen ja suljetun järjestelmän lisäksi on olemassa kuvassa 4 esiintyvä puolisoljettu järjestelmä. Siinä osa toimilaitteelta palaavasta nesteestä ohjautuu takaisin säiliöön ja osa pumpun imupuolelle. Jos paluuvirtaus ei riitä pumpun tilavuusvirran tarpeeseen, saa pumpu imuventtiilinsä kautta lisää nestettä suoraan säiliöstä. Puolisuljetun järjestelmän etuina saavutetaan hydraulikkajärjestelmälle hyvä hyötysuhde, koska tehonsiirrossa ei ole venttiilien painehäviöitä. /4, s. 161 - 165; 9./



Kuva 4. Puolisuljettu hydraulikkajärjestelmä /4, s.165/

Erilaisten hydraulikkajärjestelmien käyttö on lisääntynyt teollisuudessa ja liikkuvan kaluston tekniikassa ohjausjärjestelmien kehittymisen myötä. Elektroninen ohjaus yhdistettynä hydraulikan tehonsiirto-ominaisuuksiin johtaa tarkkoihin, pitkälle automatisoituihin, mutta monimutkaisiin ohjausjärjestelmiin, joita suunniteltaessa tulee tuntea hydraulikan lisäksi ohjaustekniikkaa ja elektroniikkaa.

Teollisuudessa hydraulikan sovelluskohteita ovat esimerkiksi paperikoneet, valssit ja erilaiset työstökoneet. Liikkuvassa kalustossa eli mobilekalustossa hydraulikka on yleistä niin laivoissa, junissa ja lentokoneissa kuin kaivos-, maatalous- ja maansiirtokoneissakin. Vaihtelevat käyttöolosuhteet ja vaadittavat järjestelmäsuureet, paine ja tilavuusvirta, vaikuttavat käytettäviin järjestelmiin ja komponentteihin. /4, s. 161 - 165./

### 3.3 Venttiilisäätöinen hydraulikkajärjestelmä

Yleisesti ottaen kaikissa hydraulikkajärjestelmissä painetta ja tilavuusvirtaa saadaan aikaan moottoreilla ja pumpuilla. Niiden avulla mekaaninen energia muutetaan hydrauliseksi energiaksi. Moottoreita ja pumppuja on erilaisia, mutta venttiilisäätöisissä järjestelmissä niiden tehtävä on pääsääntöisesti tuottaa vakiotilavuusvirtaa ja -painetta. Vakiotilavuuspumppua käytettäessä toimilaitteiden liikkeitä ohjataan erilaisilla venttiileillä. /1, s. 33./

Venttiilisäätöisissä hydraulikkajärjestelmissä toimilaitteen liikkeitä ohjaavat ON/OFF-, proportionaali- tai servoventtiilit. Näitä venttiileitä on lukuisiin käyttötarkoituksiin valmistettuina useita eri tyyppisiä, joita voidaan ohjata ja hallita eri tavoin. Niistä tämän työn puitteissa käsitellään pääsääntöisesti vain tilavuusvirtaa ja painetta ohjaavia, sähköisesti ohjattuja proportionaali- ja servoventtiilejä. /9./

#### 3.3.1 Proportionaali- ja servoventtiilit

Proportionaali- ja servoventtiilit jakautuvat suunta-, paine- ja virtaventtiileiksi. Ne ovat portaattomasti ohjattavia ja niiden avulla ohjataan siis tilavuusvirran suuntaa ja määrää sekä järjestelmän painetta. Näitä suureita portaattomasti ohjaamalla voidaan myös toimilaitteiden asemaa, nopeutta, voimaa sekä momenttia ohjata portaattomasti. /9./

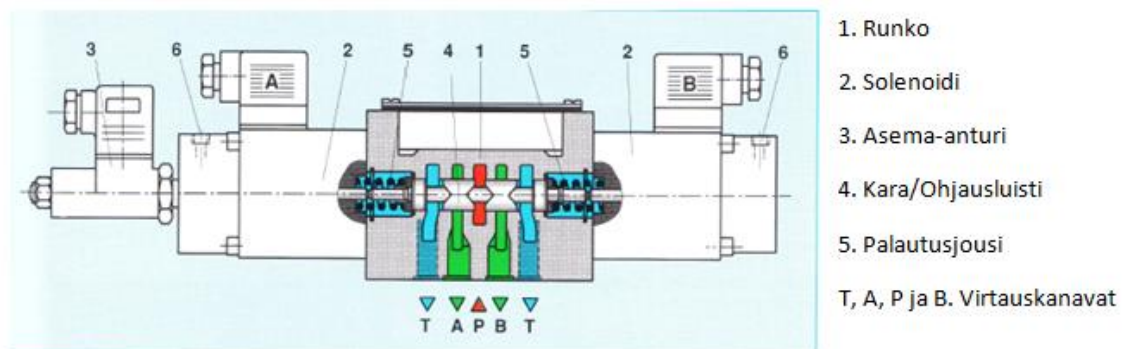
Hydraulikkajärjestelmien portaattomaan ohjaamiseen tarvitaan säätöjärjestelmä, joka on usein sähköinen ja tyypiltään avoin tai suljettu. Suljetussa säätöjärjestelmässä asetetaan suurelle, asema, nopeus tai voima, haluttu käskyarvo, joka vastaa tiettyä suuntaventtiilille ohjattavaa käskyjännitettä. Venttiili avautuu ja toimilaite liikkuu, minkä jälkeen mitataan halutun suureen todellista arvoa. Tämä toimilaitteen tai venttiilin karan todellista, asema-, nopeus- tai voima-arvoa vastaava jännite eli oloarvo muodostaa takaisinkytkennän. Olo- ja käskyarvojen ero muodostaa virhesignaalin, jota vahvistamalla voidaan ohjata venttiiliä, kunnes arvot ovat samat. Suljettua säätöjärjestelmää kutsutaan myös servojärjestelmäksi, mutta siinä voidaan käyttää sekä servo- että proportionaaliventtiileitä. /2, s. 11 - 21; 9./

Avoimessa järjestelmässä käytetään vain proportionaaliventtiileitä. Siinä ei ole takaisinkytkentää, jolloin nopeutta voidaan säätää esimerkiksi suuntaproportionaaliventtiileillä ja voimaa paineproportionaaliventtiileillä. Aseman portaaton säätö avoimessa järjestelmässä ei oikeastaan ole mahdollista. /9./

Koska kehitys on parantanut proportionaaliventtiilien tekniikan erittäin lähelle servoventtiilien tasoa ja proportionaaliventtiilien käyttö hydraulikkajärjestelmissä on yleisempää, tarkastellaan venttiilien ohjaustapoja ja rakennetta vain proportionaaliventtiilien osalta. Servoventtiilien rajataajuus on korkeampi ja tarvittavan ohjausvirran määrä yleensä pienempi kuin proportionaaliventtiilien, erityisesti suurilla tilavuusvirroilla. /9./

### 3.3.2 Proportionaaliventtiilien toimintaperiaate

Tavallisten ON/OFF-venttiilien rakenteesta proportionaaliventtiilit poikkeavat käytännössä vain karan virtausurien osalta (ks. kuva 5). Niiden avulla säätöliikkeen laajuutta voidaan säädellä tarkemmin. Suurin ON/OFF-venttiilien ja proportionaaliventtiilien ero on kuitenkin proportionaalisolenoidit, joiden avulla venttiilille tulevaa ohjaussignaalia käsitellään. /2, s. 19; 3, s.10 - 19./



Kuva 5. Proportionaaliventtiilin rakenne /2, s. 19/

Solenoidia kutsutaan myös keloiksi tai magneeteiksi. Niiden tehtävänä on muuntaa venttiilille tuleva ohjausvirta voimaksi tai asemaksi, ja ne ovat joko asema- tai voimatakaisinkytkettyjä. Voimatakaisinkytketyssä solenoidissa proportionaalimagneetin voima on suoraan riippuvainen sille syötetystä virrasta. Solenoidin rautasydän työntää karaa venttiilin jousia vasten, kunnes sen puristuman aiheuttama vastavoima on yhtä suuri kuin solenoidin työntövoima. Tällöin venttiili on auennut halutun verran eli se on asemoitunut, ja liike loppuu. /2, s. 17 - 18; 3 s.10 - 19; 9./



Asematakaisinkytketyssä solenoidissa karaa ohjataan säätöpiirin avulla. Kuten suljetun säätöjärjestelmän kohdalla aiemmin kerrottiin, solenoidille annetaan käskyjännite, joka vastaa karan tiettyä asemaa. Käskyjännitteen eli proportionaalimagneetille syötetävän virran suuruus riippuu karan liikematkasta, jota mitataan asema-anturilla. Olo- ja käskyarvon ero eli signaalivirhe vahvistetaan proportionaalivahvistimella, joka lähettää uuden ohjaussignaalin solenoidille, kunnes olo- ja käskyarvo ovat samat, eli venttiili on asemoitunut oikein. Asematakaisinkytketyissä solenoideissa asemointitarkkuus on parempaa ja nopeampaa kuin voimatakaisikytketyissä solenoideissa. /2, s. 18; 3 s.10 - 19; 9./

Proportionaalivahvistimen avulla säädetään proportionaaliventtiilille tulevan virran suuruutta. Se vahvistaa pienen ohjaussignaalin, joka yleensä annetaan jännitteenä, suurempitehoiseksi solenoidille meneväksi signaaliksi. Vahvistimen säätöjen ja parametrien avulla venttiili määritetään käyttökohteen vaatimusten mukaiseksi. Parametriasetuksia ovat muiden muassa vahvistuksen, nollapisteen ja ramppien säädöt sekä kuolleen alueen kompensointi. /3 s.10 - 19; 9./

### 3.3.3 Venttiilien staattiset ja dynaamiset ominaisuudet

Venttiilien staattiset ja dynaamiset ominaisuudet määrittelevät, minkälaisissa sovelluksissa niitä voi käyttää. Venttiilien staattisia ominaisuuksia ovat läpäisykyky, painehäviö ja hystereesi. Komponenttivalmistajat ilmoittavat venttiilin läpäisykyvyn sen läpi menevän tilavuusvirran mukaan nimellistilavuusvirtana. Nimellistilavuusvirta ilmoitetaan tietyllä paine-erolla koko venttiilin yli. Servoventtiileille ja suljettuihin järjestelmiin tarkoitettujen proportionaaliventtiileille ilmoitetaan yleensä nimellistilavuusvirta 70 barin paine-erolla.

Venttiiliä voidaan kuitenkin käyttää muillakin paine-eroilla ja tilavuusvirroilla. Virtaus sen läpi eri paine-eroilla eli venttiilissä tapahtuva painehäviö voidaan laskea yhtälön 1 mukaisesti. /2 s. 134 - 139; 3 s.10 - 19; 9./

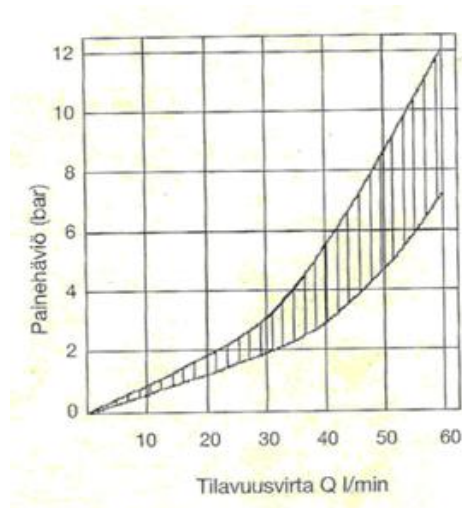
$$Q = Q_n \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p_{nim}}} \quad (1)$$

$Q_n$  on venttiilin nimellistilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\Delta p$  on todellinen paine-ero venttiilin yli [MPa]

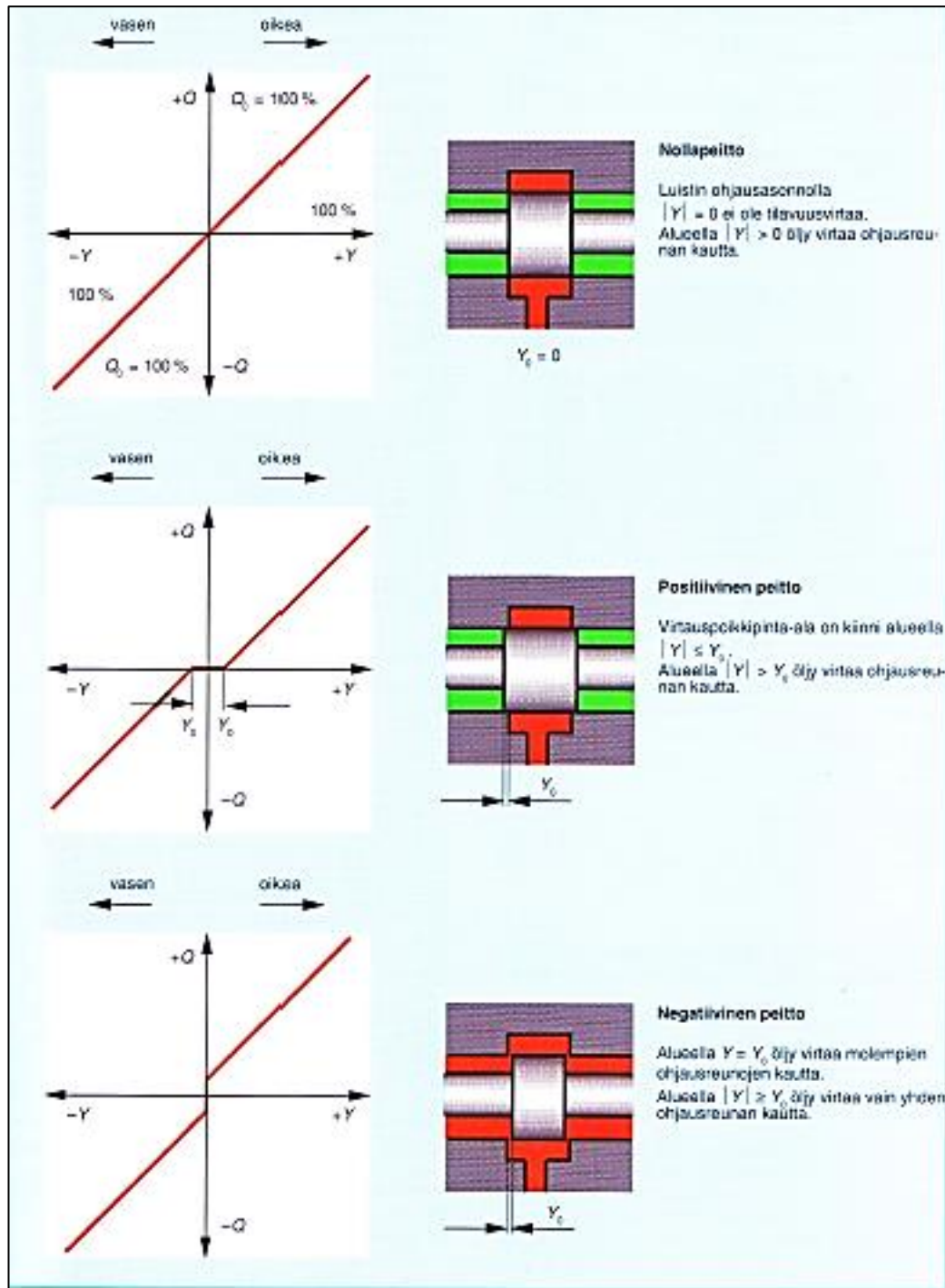
$\Delta p_{nim}$  on nimellispaine-ero [MPa].

Kaavan perusteella voidaan todeta, että painehäviö kasvaa tilavuusvirran kasvaessa kuvan 6 tavalla.



Kuva 6. Painehäviö suhteessa tilavuusvirtaan /9/

Ideaali tilanne olisi se, että tilavuusvirta venttiilin läpi olisi suoraan verrannollinen ohjausvirtaan, jolloin venttiilin tilavuusvirtaominaiskäyrä olisi suora. Yksi tärkeä tekijä, joka vaikuttaa venttiilin ominaiskäyrään, on karan peitto. Peitto voi olla joko positiivinen, negatiivinen tai nolla. Kuvassa 7 nähdään erilaisten peittojen vaikutus tilavuusvirtaominaiskäyrään. /2, s. 134 - 135./



Kuva 7. Karojen peittojen vaikutus tilavuusvirran ominaiskäyrään /2, s. 135/

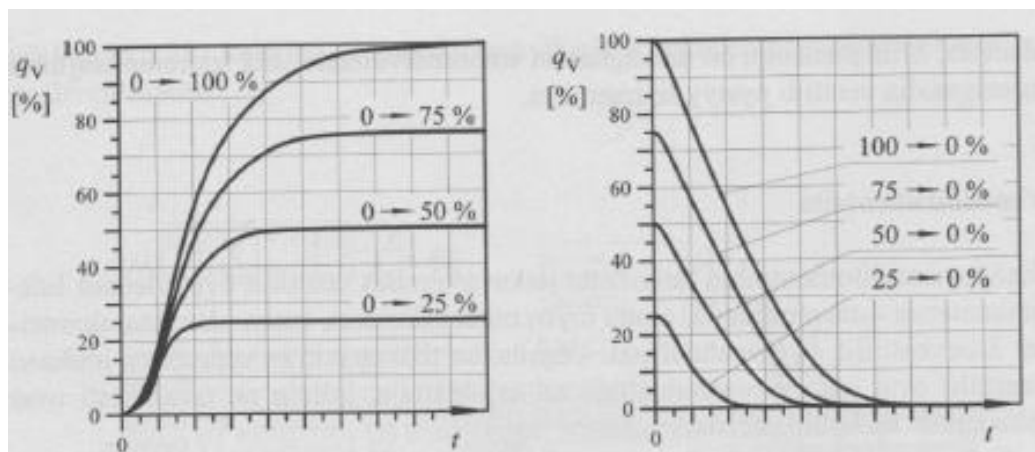
Positiiviset peitot vähentävät välisvuotoja, mutta niitä voidaan käyttää vain ohjausjärjestelmissä eli järjestelmissä, joissa ei ole takaisinkytkentää. Positiivisilla peitoilla karan ollessa keskiasennossa, pienet signaalin muutokset eivät aiheuta muutosta venttiilin ulostulossa, sillä tilavuusvirta ei muutu. Tätä aluetta sanotaan kuolleeksi alueeksi. /2, s. 134./

Herkimmin ohjaussignaaliin reagoivat venttiilit, joilla on negatiivinen peitto tai nollapeitto. Näitä käytetäänkin säätöjärjestelmissä, joissa on takaisinkytkentä. Nollapeiton ja negatiivisen peiton ongelmana ovat suuremmat vällysvuodot. /9./

Venttiilin karan aiheuttama kitka hidastaa sen reagoimista ohjaussignaalin muutoksiin. Ohjaussignaalin ja tilavuusvirran suhteessa, nousevan ja laskevan ohjauksen välistä suurinta poikkeamaa kutsutaan hystereesiksi. Tavallisimmin se ilmoitetaan prosentteina koko signaalialueesta. /9./

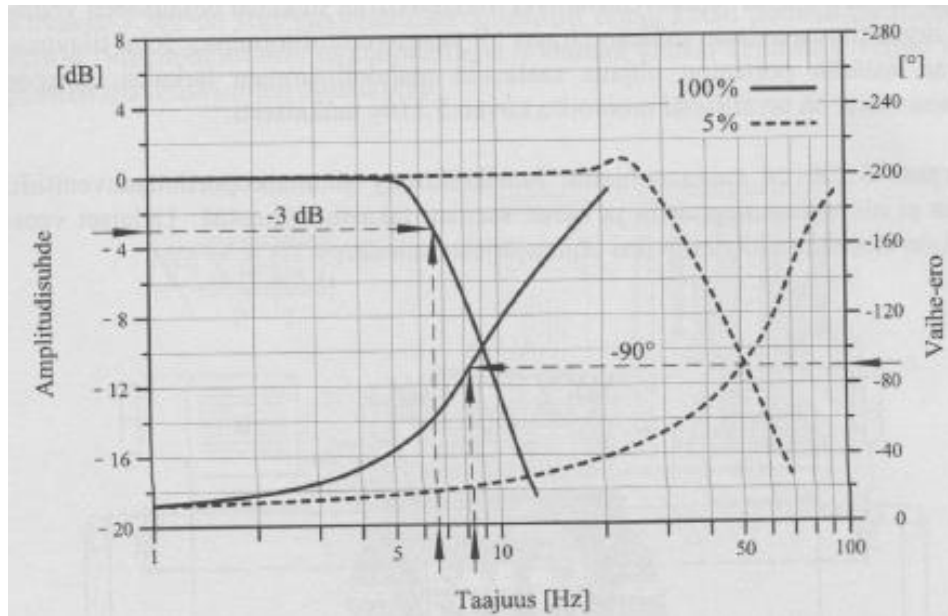
Muita venttiilin staattisista ominaisuuksista johtuvia, komponenttivalmistajien teknisissä tiedoissa annettavia virheitä ovat toistoherkkyys ja -tarkkuus sekä paluuperkkyys. Toisto- ja paluuperkkyydellä tarkoitetaan ohjaussignaalin pienintä muutosta, joka aiheuttaa muutosta lähtösignaalissa. Herkyyden arvo ilmoitetaan prosentteina nimellisoijauksesta. Toistotarkkuudella puolestaan tarkoitetaan aluetta, jolla lähtösignaali vaihtelee, kun samaa ohjaussignaalia toistetaan. /9./

Venttiilien dynaamisina ominaisuuksina ilmoitetaan askel- ja taajuusvaste. Askelvas- teella tarkoitetaan venttiilin kykyä reagoida askelmaisen ohjaussignaalin muutokseen. Se ilmaistaan halutun tilavuusvirran saavuttamiseen käytetyn ajan suhteen. Kuvaaja kuvassa 8 havainnollistaa venttiilin vasteaikoja erilaisilla askelilla, eri suuntiin ohjatta- essa. /2, s. 138 - 139; 9./



Kuva 8. Suuntaventtiilin vasteaikoja /9/

Taajuusvaste ilmaisee venttiilin kykyä reagoida taajuudeltaan vaihtelevaan, mutta amplitudiltaan vakiona pysyvään sinimuotoiseen ohjaussignaaliin. Tulo- ja lähtösignaalien amplitudien suhde taajuuden funktiona sekä ulos- ja sisääntulosignaalien vaihe-ero esitetään graafisina käyriä taajuusvastetarkastelussa. Amplitudisuhdekäyrä ja vaihe-erokäyrä muodostavat Bode-diagrammin (ks. kuva 9). Siitä voidaan edellä mainittujen tietojen lisäksi löytää venttiilin rajataajuus, joksi kutsutaan kohtaa, jossa vahvistus on vaimentunut -3 dB, tai pistettä, jossa vaihe-ero on  $-90^\circ$ . /9./



Kuva 9. Taajuusvasteen Bode-diagrammi /9/

Bode-diagrammin avulla voidaan havainnollistaa järjestelmän käyttäytymistä sen altistuessa eri taajuuksille. Sitä voidaan kutsua myös järjestelmän taajuusvastekäyräksi.

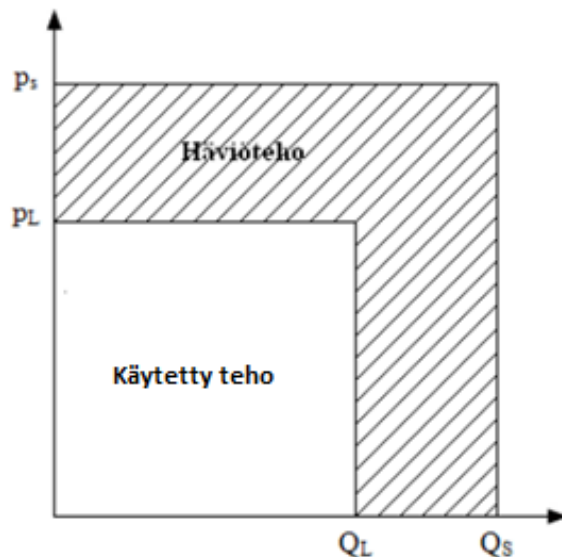
### 3.4 Pumppusäätöinen hydraulikkajärjestelmä

Venttiilisäätöisissä järjestelmissä käytetään usein vakiotilavuuspumppuja, jotta järjestelmän tilavuusvirta saadaan pidettyä vakiona. Toimilaitteiden nopeuksia ja järjestelmän painetta säädetään venttiileillä, mikä johtaa ylimääräisiin häviöihin. Pumppu tuottaa jatkuvasti vakiotilavuusvirtaa, mutta sen tarve on vain hetkittäistä, jolloin ylimääräinen tuotto on puhdasta häviötä. Sen määrä riippuu kuorman aiheuttamasta paineesta sekä toimilaitteen halutusta nopeudesta. Suuremmilla paineilla ja hitaammilla liikkeillä hukatehon määrä on suurempi. /1, s.57 - 59; 4./

### 3.4.1 Vakiotilavuuspumput

Vakiotilavuuspumppujen tuottama tilavuusvirta riippuu kierrosnopeudesta. Tällaisten pumppujen portaaton tilavuusvirran säätö on mahdollista vain pyörimisnopeutta säätämällä. Nopeutta säädetään yleensä käyttämällä oikosulkumootoria ja taajuusmuuttajaa tai polttomootoria. Taajuusmuuttajan käyttö on hydraulikassa melko kallista, joten sen käyttökohteet rajoittuvat vain joihinkin erikoistapauksiin. Polttomootoreissa pyörimisnopeuden säätö löytyy, mutta sen tuottama vääntömomentti ei puolestaan sovellu hydraulikkajärjestelmien käyttöön. /1, s. 57 - 73; 4; 10./

Jos kuitenkin käytetään vakiotilavuuspumppua ilman pyörimisnopeuden säätöä, ja järjestelmän vaatima tilavuusvirran määrä vaihtelee, voidaan osa tuotosta ohjata takaisin säiliöön. Pumppu käy koko ajan täydellä teholla ja tuottaa täyden tilavuusvirran, mutta virtausvastus- ja paineenrajoitusventtiilit ohjaavat toimilaitteille vain niiden tarvitseman tilavuusvirran. Loput ohjautuvat takaisin säiliöön. Tällainen säätötapa aiheuttaa erittäin suuria häviöitä, jotka lämmittävät järjestelmää, siksi sen käyttö on rajoittunut vain pieniin järjestelmiin. Kuvassa 10 on esitetty vakiotilavuuspumpun häviöteho  $p/Q$ -kuvaajan avulla, jossa  $p_L$  tarkoittaa kuorman vaatimaa painetta,  $p_s$  on järjestelmän syöttöpaine ja vastaavilla alaindekseillä varustetut tilavuusvirran  $Q$ -merkinnät vastaavat kuorman vaatimuksia ja järjestelmän tuottoa. /1, s. 57 - 73; 4; 10./



Kuva 10. Vakiotilavuusvirtajärjestelmässä muodostuva häviöteho  $p/Q$ -kuvaajan avulla /4/

Jos toimilaitteita on useampia, on hukatehon määrä yhtä vakiotilavuuspumppua käytettäessä vieläkin suurempi. Kytkemällä kierrotilavuudeltaan erikokoisia pumppuja rinnakkain, voidaan järjestelmän tilavuusvirtaa säädellä portaallisesti, jolloin hukatehon määrää voidaan rajoittaa. Tyypillisimpiä vakiotilavuuspumppuja ovat ruuvi-, siipi- ja hammaspyöräpumput. /1, s. 57 - 73; 4; 10./

### 3.4.2 Muuttuvatilavuuksiset pumput

Siipi- ja mäntäpumput voidaan valmistaa kierrotilavuudeltaan säätäviksi. Radiaalimäntä- ja yksikammioisissa siipipumpuissa kierrotilavuuden muutos perustuu epäkeskeytyksen muunteluun ja aksiaalimäntäpumpuissa vinolevyn kulman säätöön. Säätämällä kierrotilavuutta voidaan säätää myös koko järjestelmän painetta ja tilavuusvirtaa, jolloin hukatehoa voidaan kontrolloida paremmin. /1, s. 57 - 73./

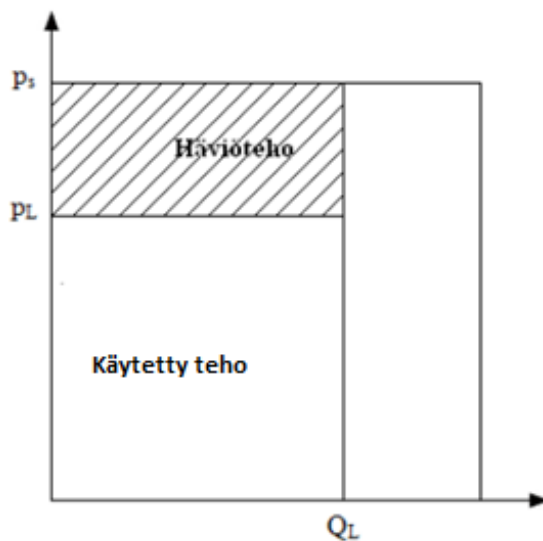
Kierrotilavuuden säätö voidaan toteuttaa automaattisesti paineesta riippuvaisena tai manuaalisesti erilaisten mekanismien välityksellä. Manuaalinen eli suora kierrotilavuuden säätö voidaan toteuttaa

- mekaanisesti vipu- tai ruuvimekanismilla
- sähköisesti ohjaussignaaleilla
- erilaisilla venttiileillä
- hydraulisesti sylinterin toimesta /1, s. 57 - 73; 10/.

Automaattinen kierrotilavuuden säätö puolestaan voidaan toteuttaa erilaisten säätimien avulla, joita ovat muiden muassa:

- vakioainesäätö (CP = Constant Pressure)
- kevennetty vakioainesäätö (CPU = Constant Pressure Unloaded)
- kuormantunteva säätö (LS = Load Sensing)
- vakioitehosäätö /1, s. 57 - 73; 10/.

Vakiopainesäätöinen pumppu ei tuota ylimääräistä tilavuusvirtaa, mutta se pitää järjestelmän paineen koko ajan säätimellä asetetussa maksimissa. Kuva 11 esittää vakio-painesäätöisen pumpun häviötehon muodostumista  $p/Q$ -kuvaajan avulla. Sitä kun verrataan aiemmin esitettyyn vakiotilavuusvirtaa tuottavan pumpun vastaavaan kuvaajaan kuvassa 10, huomataan, että tehonhäviö on paljon pienempi, sillä järjestelmään ei tuoteta ylimääräistä tilavuusvirtaa. Vakiopainesäädön haittapuolia ovat kuitenkin jatkuva paine, joka rasittaa pumppua ja muita komponentteja, vuotoalttius sekä järjestelmän lämpeneminen. /1, s. 57 - 73; 10./



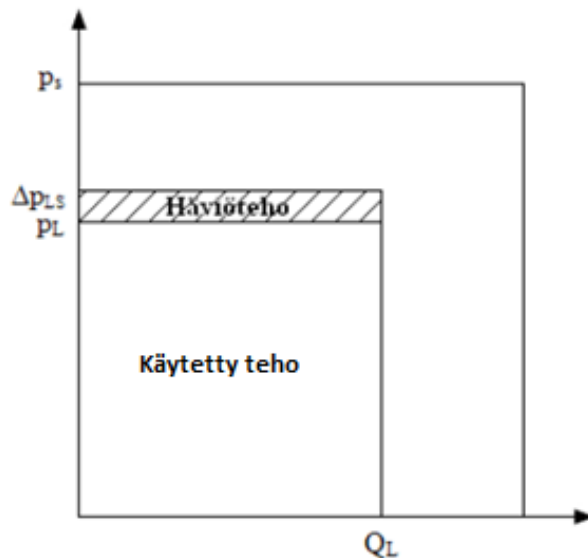
Kuva 11. Vakiopainesäätöisen pumpun häviöteho  $p/Q$ -kuvaajan avulla /4/

Vakiopainesäädön yhteyteen voidaan liittää tehonrajoitus, jolla voidaan säätää moottorista otettavan tehon määrää.

Kevennetty vakiopaineensäätö on erikoistapaus, joka eroaa tavallisesta vakiopaineensäädöstä vain siten, että se ohjaa pumpun tyhjäkäynnille järjestelmän ollessa levossa. Tällöin pumpun ja muiden komponenttien rasitus ja vuotoherkkyys on pienempää. Kevennetyn vakiopaineensäädön käyttö vaatii lisäjärjestelyjä, jotka monimutkaistavat järjestelmää. /1, s. 57 - 73; 4; 10./



Kuormantuntevassa säädössä saadaan pumpun tuottaman tilavuusvirran lisäksi myös paine säädettyä järjestelmän vaatimalle tasolle. Järjestelmän syöttöpainetta säädetään takaisinkytkennän avulla siten, että se asetetaan hieman kuorman vaatimaa painetta suuremmaksi. Tätä LS-järjestelmässä säädettyä kuormanpaineen yli tuotettavan paineen määrää merkitään kuvassa 12 symbolilla  $\Delta p_{LS}$ . Sen arvo vaihtelee, järjestelmästä riippuen yleisesti 15 ja 25 barin välillä. /1, s. 57 - 73; 4; 10./



Kuva 12. LS-järjestelmässä muodostuvan häviötehon määrä p/Q-kuvaajan avulla /4/

Kun muodostettava tilavuusvirran ja syöttöpaineen määrää säädetään, saadaan häviötehot vähäisiksi ja hyötysuhde näin ollen muita säätötapoja paremmaksi. Tyhjäkäynnillä järjestelmän paine on  $\Delta p_{LS}$ :n suuruinen. /1, s. 57 - 73; 4; 10./

Kuormantuntevan systeemin huonojen dynaamisten ominaisuuksien takia järjestelmää on kehitetty edelleen, minkä tuloksena on syntynyt ELS-järjestelmä (Electric Load Sensing). Se syntyy kun lisätään tavalliseen LS-järjestelmään paineanturi ja tarvittavat mikrokontrollerit mukaan. ELS-järjestelmän syöttöpaine pysyy tasaisempuna, jolloin järjestelmä on stabiilimpi, mikä vaikuttaa suoraan järjestelmän vasteaikaan. ELS-järjestelmällä saavutetaan siis vielä hieman parempi hyötysuhde ja parempi vasteaika kuin tavallisella kuormantuntevalla järjestelmällä. /1, s. 57 - 73; 4; 10./

Vakiotehosäädössä pumppuun asetetaan säädin, joka pitää paineen ja tilavuusvirran suhteen eli tehon vakiona. Sääto voidaan tehdä myös elektronisesti.

### 3.5 Sytronix

Sytronix on Rexrothin nimitys laitteistoille, joiden ideana on yhdistää hydrauliiikan ja elektroniikan parhaat puolet järjestelmiksi, jotka korvaavat perinteiset venttiilisäätöiset hydraulikkajärjestelmät. Ne ovat sähköpumppusäätöisiä hydraulikkajärjestelmiä, joiden yhteydessä käytettävien venttiilien, letkujen ja liittimien määrä on mahdollisimman vähäinen, jolloin systeemin häviöt pienenevät. Tämä mahdollistetaan usein yhdistämällä sähkömoottorit ja pumput toimilaitteen kanssa yhdeksi kompaktiksi paketiksi. Sähköohjauksen ja -komponenttien tarkkuuden sekä hydrauliiikan fyysisten ominaisuuksien yhdistäminen mahdollistaa energiatehokkaammat, hiljaisemmat sekä kustannuksiltaan edullisemmat hydraulikkajärjestelmät lukuisine sovellusmahdollisuuksineen. /8./

Sytronixin nopeussäätöiset sähköpumppujärjestelmät laskevat käyttökustannuksia heti, kun käytettävässä systeemissä tarvitaan vaihtuvia virtausnopeuksia, sillä systeemin servo-ohjausjärjestelmä säättää sähkömoottorin nopeutta ja tehoa tarpeen mukaan. Tämän myötä tarvittavan energian määrä voi laskea, käyttökohteista riippuen, jopa 80 % tavallisiin venttiiliohjattuihin hydraulikkajärjestelmiin nähden. /8./

Energiatarpeen laskiessa myös tuotettavien hiilidioksidipäästöjen määrät laskevat, joten Sytronix-järjestelmät ovat myös ympäristöystävällisempiä. Pienemmän hiilijalanjäljen lisäksi Sytronixin hydraulisten tehonlähteiden toiminta tarpeiden mukaan vähentää järjestelmän lämpenemistä ja hiljentää äänihaittoja jopa 20 dB. Erillisiä äänieristyskiä tai järjestelmän jäähdytysjärjestelmiä ei näin ollen tarvita, joten kompaktimmat ja käyttökustannuksiltaan edullisemmat ratkaisut mahdollistuvat. /8./

Sytronix-järjestelmien staattisiin ja dynaamisiin ominaisuuksiin palataan testitulosten yhteydessä. Tässä osiossa esitellään pääpiirteitään eri käyttötarkoituksiin soveltuvia Sytronix-järjestelmäkokonaisuuksia, joita Rexrothilta löytyy kolme. Riippumatta järjestelmästä, jokaiseen kokonaisuuteen kuuluu hydraulikkapumppu, servo- tai tavallinen sähkömoottori sekä ohjausyksikkö taajuusmuuntajineen ja ohjauselektroniikkoineen. /8./

Kaikissa järjestelmissä toimintaperiaate on lähtökohtaisesti sama. Hydrauliiikkapumpun tuottama tilavuusvirta ja paine ovat suoraan verrannollisia sähkömoottorin pyörimisnopeuteen. Sitä säädellään ohjausyksikön avulla, joka vertailee järjestelmän todellista painetta ja tilavuusvirtaa annettuihin ohjearvoihin. Systeemin tarkkailu on jatkuvaa ja muutokset moottorin pyörimisnopeuteen ovat välittömiä. /8./

Sytronixin käyttösovelluksia on useita, mutta toiminnallisten ominaisuuksien osalta järjestelmäkokonaisuudet jakautuvat kolmeen: FcP 5000, DFEn 5000 ja SvP 7000.

### 3.5.1 FcP 5000 (Frequency Controlled Pump Drive)

Sytronix FcP 5000-järjestelmä koostuu kuvan 13 esittämällä tavalla tavallisesta tahdistamattomasta sähkömoottorista ja siihen integroidusta hammasrataspumpusta, ohjausjärjestelmästä ja taajuusmuuntajasta sekä paineanturista. Se soveltuu järjestelmiin, joissa paineen on oltava vakio. Paineensäätö tapahtuu ohjausyksikössä, joka vertailee paineanturilta samaansa todellista paineen arvoa annettuun ohjearvoon. Kun järjestelmän tilavuusvirran määrä laskee, sen paine laskee myös. Kompensoidakseen paineen laskun, paineenohjausyksikkö nostaa taajuusmuuntajan avulla sähkömoottorin pyörimisnopeutta, mikä vaikuttaa suoraan pumpun tilavuusvirran tuottoon. Kun tilavuusvirta nousee, painekin nousee. /8/



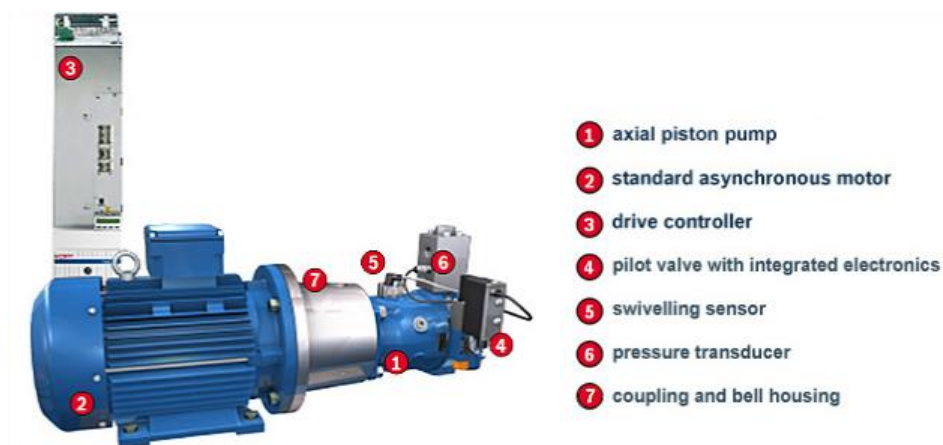
Kuva 13. Sytronix FcP 5000-järjestelmä /8/

FcP 5000 on suorituskyvyiltään sekä dynaamisilta ominaisuuksiltaan järjestelmistä yksinkertaisin. Sen tarkkuus ja suorituskyky täyttävät vain perustarpeet, mutta se on silti energiatehokas ja edullinen ratkaisu hydrauliikkajärjestelmien tilavuusvirran- ja paineensäätöön. FcP 5000-järjestelmän maksimi käyttöteho on 7,5 kW, ja sen tavallisimmat käyttökohteet rajoittuvat avoimiin vakiopainesysteemeihin kuten erilaiset työstökoneet, joissa sen tarkoitus on korvata klassiset säätöpumput. /8./

### 3.5.2 DFEn 5000 (Druck- und Förderstrom-Regelsystem)

Sytronix DFEn 5000-järjestelmässä (kuva 14) hammasrataspumppu korvataan aksiaalimäntäpumpulla, jonka vinolevyn asentoa voidaan muuttaa sähköisesti. Vinolevyn kulmansäätö mahdollistaa tilavuusvirran tuoton säätelyn pelkän pumpun avulla, jolloin sähkömoottorin kuormitus vähenee ja kestoikä pitenee. FcP 5000-järjestelmässä ainoa tapa muuttaa tilavuusvirtaa oli moottorin nopeuden säätö. DFEn 5000:ssa tilavuusvirtaa voidaan siis säätää joko moottorin nopeutta tai pumpun mäntien kulmaa säätämällä. Näin ollen pienemmillä moottorin kierrosnopeuksilla saadaan tuotettua suuriakin tilavuusvirtoja. /8./

DFEn 5000-järjestelmässä paineensäätö tapahtuu samalla tavalla kuin FcP 5000:ssa paineenohjausyksikön ja taajuusmuuntajan kautta säädettävällä sähkömoottorin pyörimisnopeudella. Sen lisäksi DFEn-ohjausjärjestelmän avulla voidaan siis muuttaa systeemin tilavuusvirtaa ilman, että sähkömoottorin pyörimisnopeuteen puututaan. Ohjausjärjestelmä tarkkailee todellista tilavuusvirran määrää ja vertaa sitä annettuun ohjausarvoon. Mikäli arvot eivät täsmää, säätää järjestelmä aksiaalimäntäpumpun mäntien liikekulmaa, jolloin tilavuusvirran määrä muuttuu. /8./



Kuva 14. Sytronix DFEn 5000-järjestelmä /8/

Sytronix DFEn 5000 on avoimien hydraulikkajärjestelmiin soveltuva käyttöratkaisu, jonka avulla voidaan säätää järjestelmän painetta ja tilavuusvirtaa portaattomasti. DFEn 5000-järjestelmän maksimi käyttöteho on kaikista Sytronix-järjestelmistä suurin, 630 kW, ja sen tavallisimmat käyttökohteet liittyvät painokoneisiin tai metalli- ja puuteollisuuden työstökoneisiin. Dynaamisilta ominaisuuksiltaan ja energiatehokkuudeltaan DFEn 5000 on kehittyneempi kuin FcP 5000. /8./

### 3.5.3 SvP 7000 (Servo Variable Pump Drive)

Sytronix SvP 7000-järjestelmä koostuu kuvan 14 mukaisesti pumpusta, joka on optimoitu nopeudeltaan vaihteleviin toimintoihin, synkronoidusta servomoottorista sekä vastaavasta servo-ohjauksesta koostuneeseen. SvP 7000-järjestelmä tarjoaa suorituskyvyiltään ja toimintatarkkuudeltaan korkeimman mahdollisen tason. Sen käyttösovelluksia voidaan hyödyntää niin avoimissa kuin suljetuissakin hydraulikkajärjestelmissä. Paineen ja tilavuusvirran säädön lisäksi sen avulla voidaan kontrolloida toimilaitteen voiman, nopeuden ja paikan arvoja. /8./



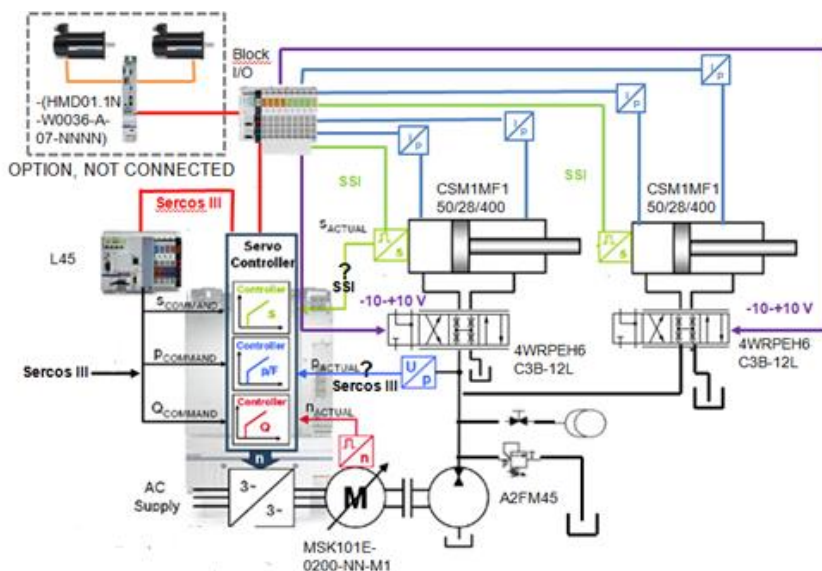
Kuva 15. Sytronix SvP 7000-järjestelmä /8/

## 4 Koelaitteisto

Venttiiliohjauksen ja Sytronix-järjestelmän vertailua varten Rexrothin tiloihin rakennettavan koelaitteiston komponentit valittiin Rexrothin omista tuotteista. Koelaitteistossa käytetään Sytronix SvP 7000-järjestelmää, jonka servomoottoria ja pumppua hyödynnetään myös venttiiliohjausta testattaessa. Koneikkoon asennetaan lisäksi kaksi pysytysuuntaista sylinteriä, joista kummankin kylkeen kiinnitetään nopean vasteajan proportionaaliventtiili. Koneikon käyttämä hydraulineneste saadaan sen omasta säiliöstä.

Koelaitteiston avulla voidaan testata Sytronix-järjestelmän vasteaikojen, energiatehokkuuden sekä muiden ominaisuuksien lisäksi samat asiat myös venttiiliohjauksen osalta. Asettamalla venttiilit valittuun vakioasemaan voidaan laitteistoa käyttää moottoriohjauksen arvojen mittaamiseen ja vastaavasti ajamalla vakionopeudella tuottaen vakiotilavuusvirtaa ja -painetta voidaan järjestelmää käyttää venttiiliohjauksen tutkimiseen.

Kuvassa 16 on suunnitellun koneikon lähtökohtainen periaatekuva, johon on jo liitetty käytettyjen komponenttien tuotenumeroita ja suunniteltuja kytkentöjä.



Kuva 16. Koelaitteiston periaatekuva /11/

#### 4.1 Moottori

Järjestelmän moottoriksi valittiin Bosch Rexrothin IndraDyn S-tuotesarjan MSK101E-0200-NN-M1. Se on nelinapainen servomoottori, jonka tuottama maksimimomentti on 231,0 Nm ja suurin kierrosnopeus on  $4500 \text{ min}^{-1}$ . Moottoria voidaan ajaa eri nopeuksilla ja kahteen eri suuntaan. Moottorin päässä on asema-anturi, jonka avulla voidaan seurata moottorin pyörimisnopeutta, jota säädellään taajuusmuuntajan avulla. /11./

Servomoottorin (kuva 17) ja pumpun väliin tulee kytkin, jonka avulla pumppu saadaan pyörimään moottorin mukana halutulla nopeudella ja haluttuun suuntaan. Näin ollen saadaan aikaan halutun suuntainen ja suuruinen tilavuusvirta ja paine, joiden avulla toimilaitetta saadaan liikutettua halutulla tavalla. Lisäksi tällä mahdollistetaan laitteiston käyttö sekä avoimessa että suljetussa järjestelmässä. Venttiiliohjauksen vasteaikoja ja paikoitustarkkuuksia mitattaessa moottorin kierrosnopeus ja pyörimissuunta pidetään vakiona, jotta tuotettava tilavuusvirtakin pysyisi koko ajan samana.



Kuva 17. Rexroth IndraDyn S-tuotesarjan servomoottori /11/

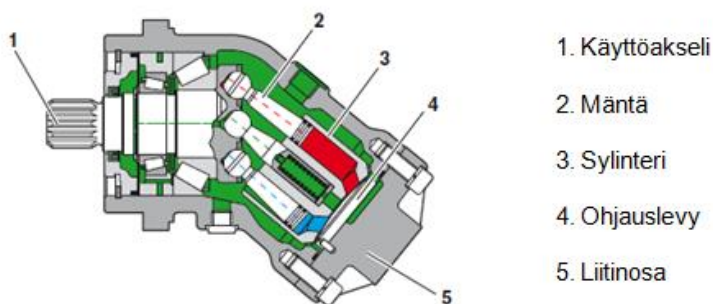
#### 4.2 Hydraulikkakomponentit

Hydraulikkakomponentit, kuten kaikki muutkin laitteiston komponentit, ovat Rexrothin omia tuotteita. Hydraulikan puolelta valittuja osia ovat pumppu, sylinterit ja venttiilit, joiden lisäksi koneikkoon liitettiin oma säiliö.

#### 4.2.1 Pumppu

Järjestelmän pumpuksi valittiin Rexrothin A2FM45 aksiaalimäntäpumppu. Se sopii sekä avoimeen että suljettuun hydraulikkajärjestelmään, sillä sen imu- ja ulostuloaukot ovat samankokoisia ja sen pyörimissuuntaa voidaan vaihdella. A2-pumput toimivat myös hydraulisina moottoreina, joiden avulla voidaan myös halutessa muuttaa hydraulinen energia mekaaniseksi energiaksi. Työntämällä pumppuun painetta saadaan käyttöakseli pyörimään, jolloin sen liikettä voidaan hyödyntää. Tähän projektiin pumppu valittiin kuitenkin sen suljettuun hydraulikkajärjestelmään soveltuvuuden takia, jolloin erillisten venttiilien käyttö saadaan minimiin. /11./

Kuvassa 18 on esitetty A2FM-pumppu toimilaitteineen. Käyttöakseli (1) liitetään kytkimen välityksellä servomotooriin, joka pyöriessään pyörittää pumpun mäntä (2). Niiden tekemä lineaarinen liike, joko imee tai työntää hydraulikkaneustettä sylintereihin (3) ja koko järjestelmään liitinosaan (5) kytkettyjen letkujen kautta. Ohjauslevyn (4) avulla voidaan säätää mäntien iskutilavuuden kautta järjestelmään syntyvän tilavuusvirran suuruuteen. /11./

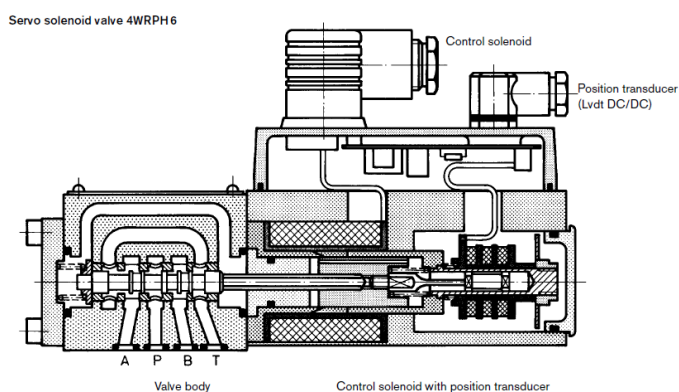


Kuva 18. Aksiaalimäntäpumpun toimintaperiaatekuva /11/



#### 4.2.2 Venttiilit

Järjestelmään valittiin kaksi nopean vasteajan proportionaaliventtiiliä, joilla voidaan ohjata sylinterien liikettä. Rexrothin 4WRPEH 6 C3 B12L 4/4-suuntaventtiilit (kuva 19), jotka järjestelmään valittiin, läpäisevät 12 l/min tilavuusvirran paine-eron ollessa 70 bar. Tuoteselosteessa hystereesin suuruudeksi arvioidaan alle 0,2 % ja vasteajaksi alle 10 ms signaalin muuttuessa 0...100 %. Niiden ohjausalue on +/- 10 V DC. Venttiilit kiinnitetään suoraan sylinterien runkoon. /11./



Kuva 19. Käytettyjen Rexrothin 4WRPEH 6 C3 B12L 4/4-suuntaventtiilien rakenne /11/

#### 4.2.3 Sylinterit

Sylinteritkin valittiin Rexrothin omista komponenteista. Pystyyn asennettavien sylinterien tyypiksi valikoitui CSM1 FM1 50/28/400 (kuva 20), jonka männän pään halkaisija on 50 mm, varren halkaisija 28 mm ja iskunpituus 400 mm. Kummankin sylinterin toisessa päässä on integroitu asemanmittausanturi, joka lähettää logiikalle paikkatietoja ajan funktiona. Lisäksi sylinterin kyljessä on kaksi integroitua paineanturia, jotka mittaavat sylinterissä vallitsevaa painetta männän kummallakin puolella. Sylinterin akselin päähän lisättiin ylimääräinen 200 kg:n massa, jonka tarkoitus on kuvastaa kuormaa. /11./



Kuva 20. Rexroth CSM1 FM1-sylinteri /11/

### 4.3 Sähköohjauskomponentit

Sähkökomponentteina valittiin muun muassa järjestelmälle sopiva ohjausjärjestelmä, tehonlähde sekä tarvittavat tulo- ja lähtösignaalimoduulit. Rexrothin omista komponenteista järjestelmään valikoituivat seuraavat laitteet:

- tehonlähde: HMV01.1E-W0030-A-07-NNNN
- taajuusmuuntaja: HMS01.1N-W0150-A-07-NNNN
- ohjauskortti: CSH01.1C-S3-ENS-MA1-MD2-NN-S-NN-FW
- liikkeenohjausmoduuli: CML45.1-3P-500-NA-NNNN-NW
- tulo- ja lähtösignaalimoduuli: R-ILB S3 AI12 AO4 SSI-IN4

Sopivan kokoinen sähkökaappi, johon kaikki tarvittavat komponentit mahtuvat, tilattiin Rittalilta. Sen sisään asennettiin lisäksi erillinen lisävirtalähde, maadoituskisko, päävir-  
takytkin sekä kaikki riviliittimet ja sulakkeet. Kaikki järjestelmään valitut osat löytyvät liitteestä 2.

#### 4.4 Ohjelmistot

Tämän työn aikaansaamiseksi käytettiin kolmea eri ohjelmistoa. Ennen kuin koneikko voitiin koota, piti tehdä viralliset sähköpiirustukset ja sähkökaapin layoutkuvat (ks. liite 1). Niiden tekemiseen käytettiin ePlan Electric P8-ohjelmaa, joka on nimenomaan sähkökuvien suunnitteluun kehitetty ohjelma.

Koneikon logiikan ohjaukseen ja parametrien säätöön käytettiin Rexrothin omaa IndraDrive-ohjelmistoa, joka on suunniteltu yhteensopivaksi Rexrothin ohjauskomponenttien kanssa. Sen avulla saatiin ohjattua venttiilien, sähkömoottorin ja koko SvP 7000-järjestelmän toimintaa.

Kolmantena ohjelmistona työssä käytettiin Rexrothin omaa D&C System Simulator 2.2-simulointiohjelmaa, joka on toiminnaltaan lähes samanlainen kuin Simulink tai Matlab. Sen avulla järjestelmän toimintaa testattiin teoreettisella tasolla. Simuloinnista lisää testitulosten yhteydessä kappaleessa 5.1.

### 5 Testitulokset

#### 5.1 Simulointi

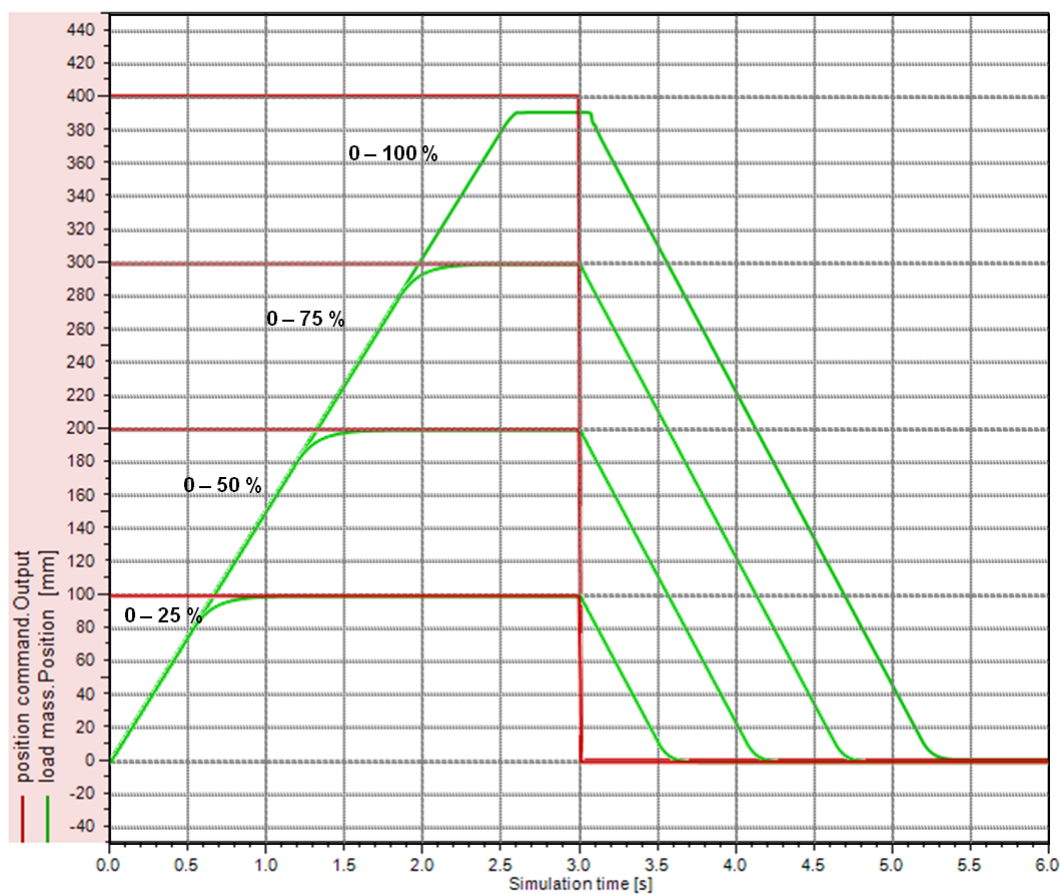
Simulointi suoritettiin Rexrothin omalla ohjelmistolla, joka on perusidealtaan vastaavanlainen kuin Matlab tai Simulink. Suurimpana erona on se, että D&C System Simulatorista löytyy Bosch Rexrothin omien komponenttien kirjasto, mikä helpottaa simuloinnin toteutusta, sillä kaikki parametrit näiden komponenttien osalta ovat jo valmiina. Simuloidessa venttiiliohjausta ja Sytronix-järjestelmää testattiin omissa ohjelmaympäristöissä eikä samassa paketissa niin kuin koelaitteistossa. Tuloksissa vertaillaan järjestelmien nousun nopeuksia, venttiiliohjauksen karan vasteaikaa Sytronixin moottorin vasteaikaan sekä tehon- ja energiankulutuksia.

Molempiin simulaatiomalleihin asetettiin samat parametrit mallinnetuille sylintereille, letkuille sekä liittimille. Suurimmat erot syntyivät moottoreiden ja pumppujen mallinnuksessa sillä Sytronix-järjestelmässä niiden pyörimisnopeudet, tilavuusvirta- sekä painearvot muuttuvat ohjelman mukaan, kun venttiiliohjauksessa ne asetettiin vakioiksi.

### 5.1.1 Asemaanajo

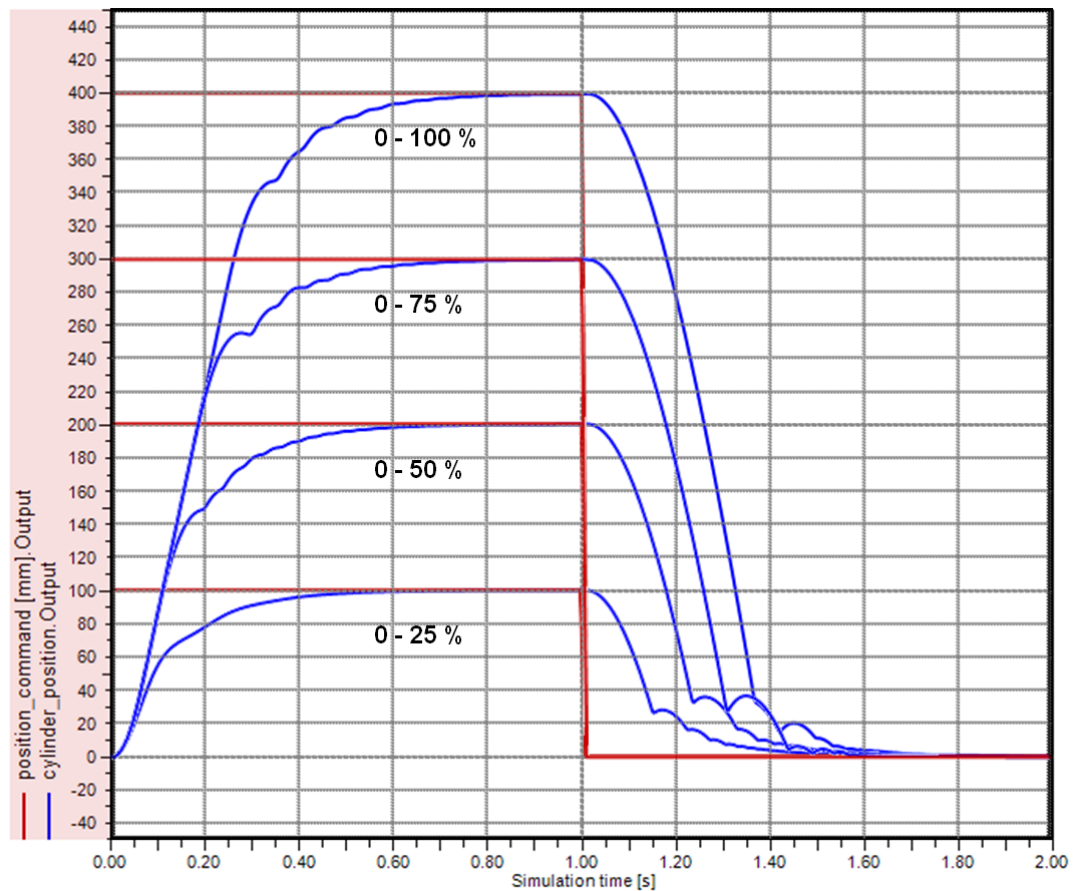
Asemaanajon simuloinnit tehtiin siten, että sylinterin lähtöasemaksi annettiin nolla ja halutuksi loppuasemaksi neljä eri arvoa: 25 % iskunpituudesta eli 100 mm, 50 % iskunpituudesta eli 200 mm, 75 % iskunpituudesta eli 300 mm sekä 100 % iskunpituudesta eli 400 mm.

Kuvassa 21 on esitetty venttiiliohjauksen asemaanajokaavio. Ohjearvot on merkitty punaisella ja sylinterin todellinen arvo vihreällä.



Kuva 21. Venttiiliohjauksen asemaanajokaavio

Kuvassa 22 on esitetty Sytronix-järjestelmän asemanajokaavio. Ohjearvot on esitetty punaisella ja sylinterin todellinen asema sinisellä.

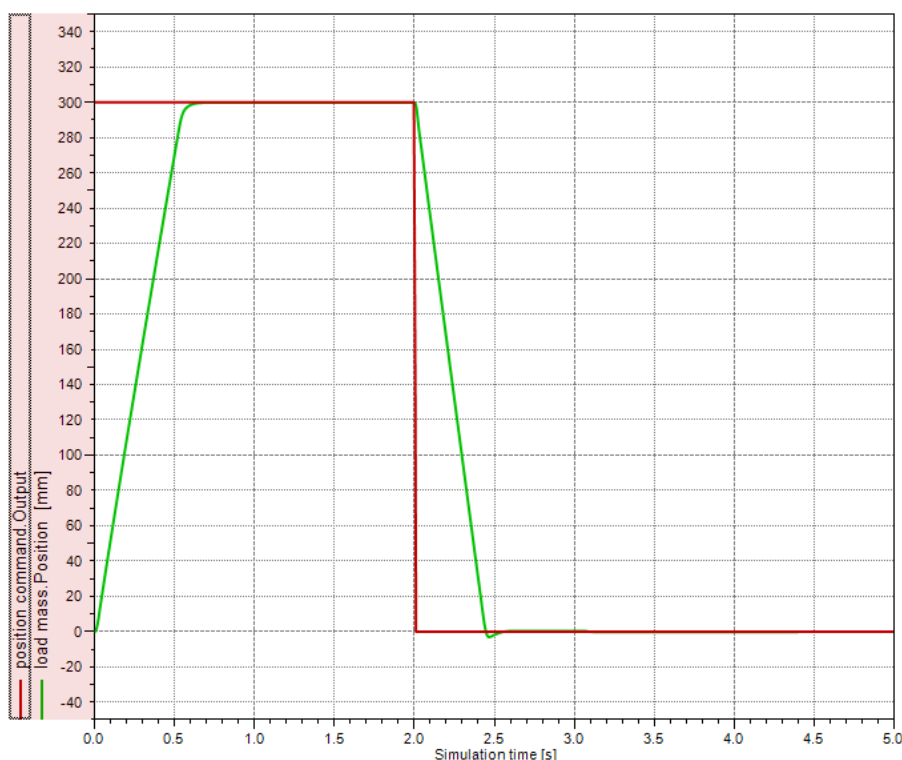


Kuva 22. Sytronix-järjestelmän asemanajokaavio

Kuvaajat eivät ole vertailukelpoisia, sillä venttiiliohjauksen nousunopeuksia rajoittavat laitevalinnat, joiden myötä järjestelmien tilavuusvirta-arvot ovat erisuuruisia. Kun kuvaajia tarkastellaan, huomataan, että venttiiliohjauksessa sylinteri saa maksiminopeudekseen noin 150 mm/s, kun taas Sytronix-järjestelmässä vastaava nopeus on lähemmäs 1000 mm/s. Venttiiliohjauksella sylinterin liikkeen hitaus johtuu siitä, että venttiiliin, jota koelaitteistossa ja simuloinnissa käytetään, läpäisykyky on vain 12 l/min. Sytronix-järjestelmän nopeus puolestaan on vain teoreettinen luku. Todellisuudessa järjestelmän muut komponentit kuten liittimet ja tiivisteet kestävät vain noin 500 mm/s nopeuden. Tämän simulaation yhteydessä tarkastellaan vain järjestelmien teoreettisia maksimiarvoja.

Kun kaavioita tarkastellaan esimerkiksi 0 - 75 % asemanajan osalta, voidaan todeta, että Sytronix-järjestelmässä nousu tapahtuu huomattavasti nopeammin. Se asemoituu noin 0,8 s:ssä kun vastaava aika venttiiliohjauksella on lähemmäs 2,3 s. Kun venttiiliohjauksen venttiili vaihdetaan suuremmaksi, 40 l/min läpäiseväksi, saadaan 0 - 75 % asemanajokaaviosta kuvan 23 mukainen.

Kuvasta 23 huomataan, miten rajoittava venttiilin läpäisykyky oikeasti onkaan. 40 l/min läpäisevällä venttiilillä sylinterin maksiminopeudeksi saadaan jopa noin 540 mm/s ja 0 - 75 % nousuajaksi vain noin 0,6 s. Käytännössä siis liittimien ja tiivisteiden rajoittaessa liikenopeutta, tällä venttiilillä päästään jo vähintään samoihin asemointinopeuksiin kuin Sytronix-järjestelmällä.

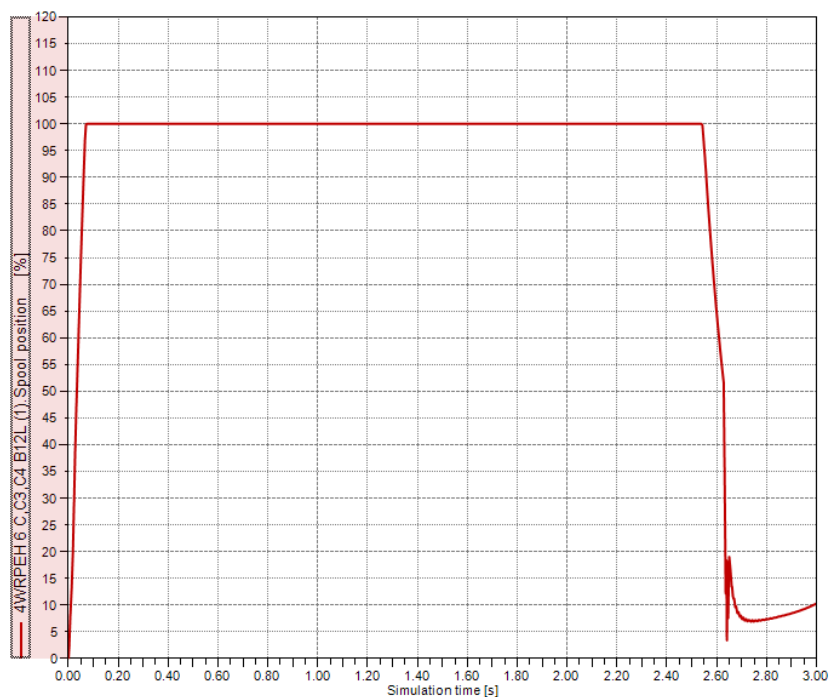


Kuva 23. 40 l/min läpäisevän venttiilin 0 - 75 % asemanajo

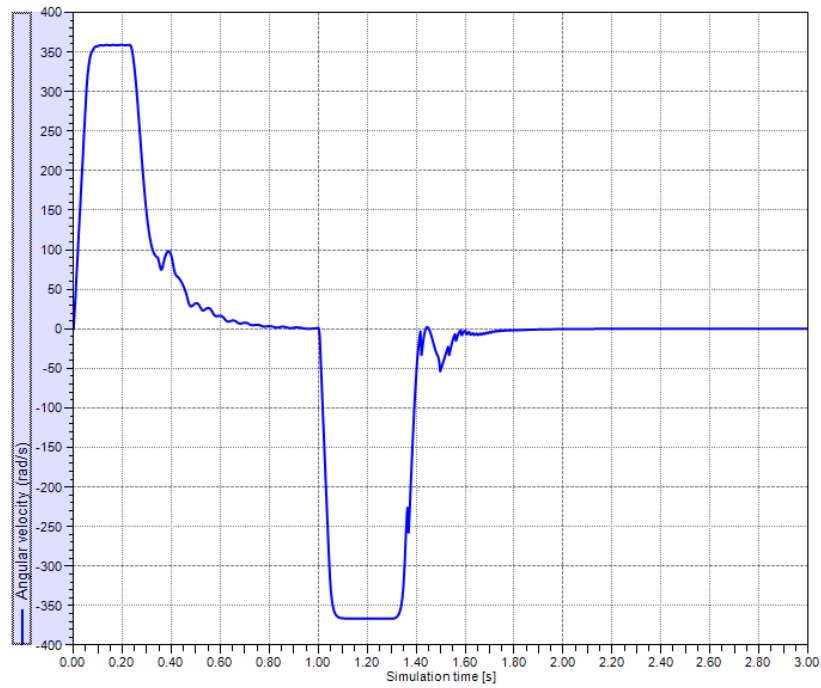
### 5.1.2 Vasteajat

Kuvaajista voidaan todeta myös se, että sylinteri saavuttaa maksiminopeutensa kaikissa tapauksissa erittäin nopeasti. Venttiiliohjauksessa maksiminopeuden saavuttaminen riippuu venttiilin karan liikenopeudesta ja vasteajasta, kun taas Sytronix-järjestelmässä se riippuu vain siitä, kuinka nopeasti servomoottori saavuttaa maksiminopeutensa.

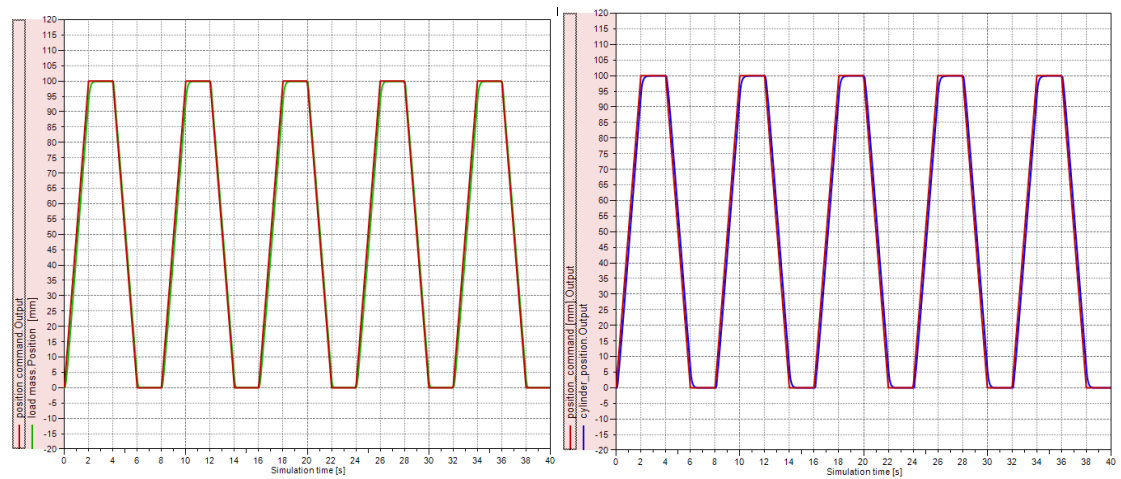
Kuvassa 24 on esitetty venttiilin karan asema ajan funktiona. Kuvaajasta huomataan, että venttiili aukeaa ääriasentoonsa erittäin nopeasti, alle 0,1 s. Kuvan 25 kuvaaja on puolestaan Sytronix-järjestelmän servomoottorin pyörimisnopeus ajan funktiona. Se saavuttaa myös maksimi nopeutensa noin 0,1 s. Tuloksista voidaan todeta, että mikäli venttiilin läpäisykyky ei rajoittaisi sylinterin liikenopeutta, olisi venttiiliohjaus asemaana jossa jopa nopeampi kuin Sytronix-järjestelmä, sillä venttiilin karan vasteaika on pienempi kuin servomoottorin. Vaikka tässä koelaitteistossa venttiilin läpäisykyky onkin rajoitettu, ei hitaammissa sylinterin asemanajoissa ole mitään eroa Sytronix-järjestelmän ja venttiiliohjauksen välillä, kuten kuva 26 osoittaa.



Kuva 24. Nopean vasteajan venttiilin karan asema ajan funktiona



Kuva 25. Servomootorin pyörimisnopeus ajan funktiona

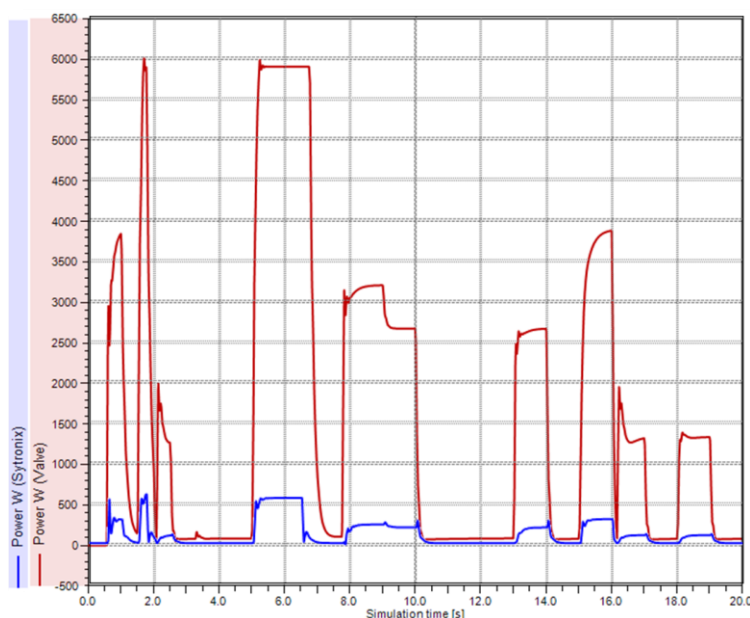


Kuva 26. Asemaanjou 0 - 100 mm:n venttiiliohjauksella (vasen) ja Sytronix-järjestelmällä (oikea)



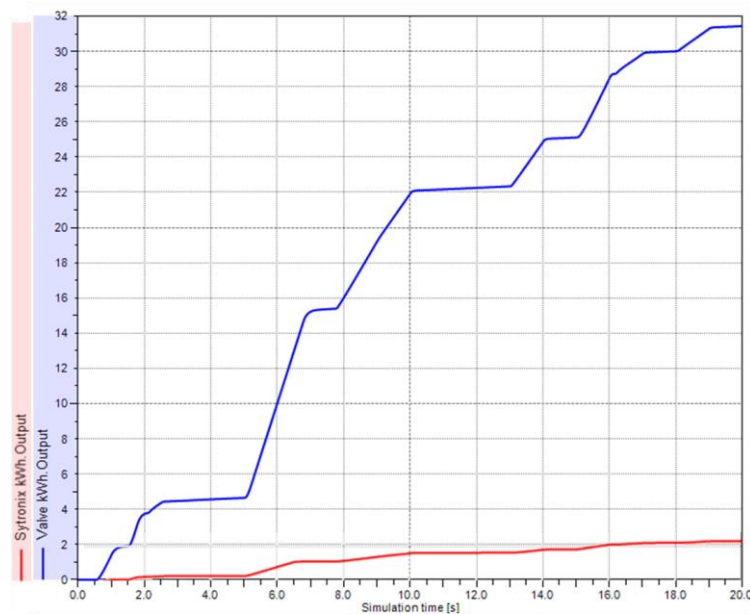
### 5.1.3 Energiankulutus

Kun ajatellaan Sytronix-järjestelmää ja venttiiliohjattua hydraulikkajärjestelmää, on hyvinkin helppo mieltää Sytronix huomattavasti energiatehokkaammaksi ratkaisuksi. On loogista, että moottori, joka käy vain silloin kun sitä tarvitaan kuluttaa, vähemmän energiaa kuin moottori, joka käy koko ajan. On kuitenkin täysin tapauskohtaista, kuinka paljon energiatehokkaampi Sytronix-järjestelmä on. Rexrothin lupaamat 30 - 80 %:n energiasäästöt ovat kuitenkin kaikissa tapauksissa realistisia. Kuvassa 27 on esitetty kummankin järjestelmän tehontuottokäyrät. Punainen käyrä osoittaa venttiiliohjauksen tehontuoton, kun sylinteriä ajetaan eri asemiin 20 sekunnin aikana, ja sininen käyrä osoittaa vastaavaa arvoa Sytronix-järjestelmän osalta.



Kuva 27. Järjestelmien tehontuottokäyrät

Tehontuottokäyristä voidaan helposti havaita, että sylinterin aseman muutos aiheuttaa huomattavasti suuremman piikin venttiiliohjauksen kuin Sytronix-järjestelmän tehonkulutuksessa. Venttiiliohjauksen tehontuotto ei myöskään laske missään vaiheessa nol- laan saakka, vaan se kuluttaa energiaa, vaikka sylinteri olisi paikallaan. Venttiiliohjauksessa tuotetaan siis puhdasta hukkatehoa silloinkin, kun tehon tarvetta ei ole, mikä näkyy myös energiankulutuskäyrissä kuvassa 28.



Kuva 28. Järjestelmien energiankulutuskäyrät

Venttiiliohjatun järjestelmän moottori on asetettu pyörimään vakionopeudella, mikä tarkoittaa sitä, että järjestelmä tuottaa vakiopainetta ja -tilavuusvirtaa koko käynnissä olo ajan. Kun vertaillaan venttiiliohjauksen nousunopeuksien eroja 12 l/min ja 40 l/min läpäisevien venttiilien osalta, samoilla pumpun ja moottorin parametreilla, huomataan, että järjestelmä nopeutuu, kun venttiilin läpäisykyky on suurempi. Tästä voidaan päätellä, että moottori ja pumppu ovat mitoitettu tuottamaan liian suurta painetta ja tilavuusvirtaa, sillä järjestelmässä on käytössä 12 l/min läpäisevä venttiili. Turhaa työtä tehdään siis jatkuvasti, sillä tarvittava paine ja tilavuusvirta syntyisivät pienemmälläkin tehontuotolla.

Turhan suuren tehontuoton lisäksi, venttiiliohjattu järjestelmä joutuu tekemään pidemmän työtä sylinterin liikuttamisessa kuin Sytronix-järjestelmä, sillä sen nousuaika on pienemmän tilavuusvirran takia hitaampi. Kun sylinteri liikkuu, molempien järjestelmien tehontuottoon ja energiankulutukseen tulee pieni piikki, sillä momentin tarve on silloin suurempi. Tämä tarkoittaa sitä, että suuria hukkatehoja tuottavan venttiiliohjausjärjestelmän energiatehokkuus heikkenee entisestään. Sytronix-järjestelmä pysäyttää kaiken toimintansa siksi aikaa kun sylinterin on määrä pysyä paikallaan. Se ei siis tuota turhaa tehoa eikä kuluta ylimääräistä energiaa silloin kun siihen ei ole tarvetta.

Mikäli toimilaitteita olisi useampi kuin yksi, Sytronix-järjestelmän energiantehokkuus korostuisi entisestään varsinkin, jos toimilaitteilla on eri paineiden tarve. Tällöin venttiilihojauksessa moottori ja pumppu joutuisivat tuottamaan painetta suurimman tarpeen mukaisesti, jolloin muiden toimilaitteiden osalla tuotettaisiin entistä enemmän hukkatetta. Sytronix-järjestelmillä tehontuotto voitaisiin toteuttaa toimilaittekohtaisesti, mutta se vaatisi jokaiselle toimilaitteelle oman Sytronix-järjestelmän. Toimilaittekohtaiset investoinnit siis kasvaisivat, mutta energiankulutuksessa säästettäisiin huomattavasti.

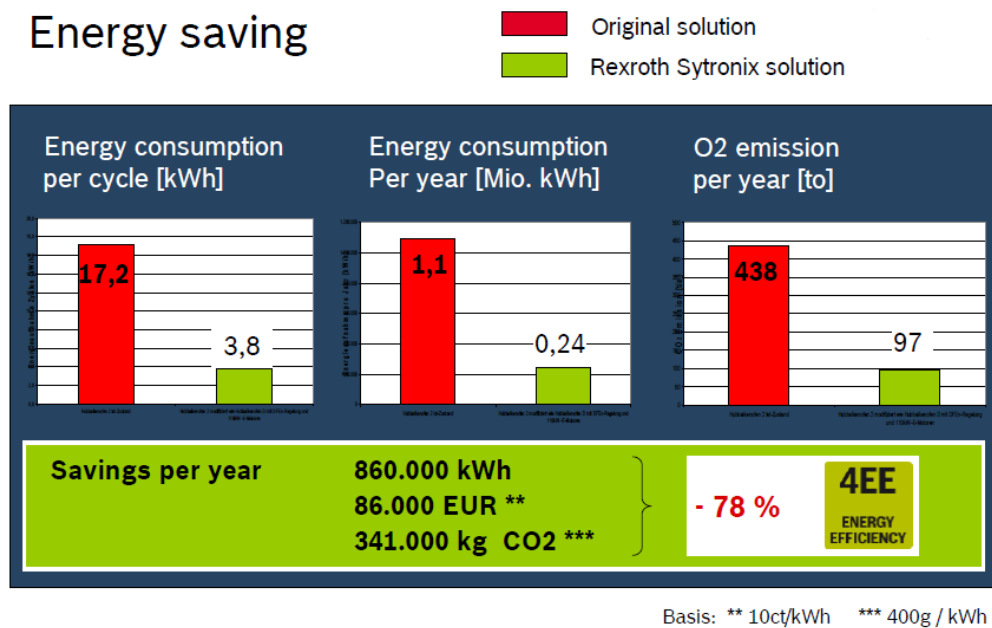
## 5.2 Esimerkkejä energiatehokkaammista ratkaisuista

Yrityksen, jonka askelpalkkiuuniin Sytronix-järjestelmä asennettiin, vaatimuksina olivat hydraulikkajärjestelmän modernisointi, alhaisempi energiankulutus sekä pienemmät päästöt. Askelpalkkiuunin toimintasykli on 8 min aikana yksi 2 min työ, jolloin jatkuvasti käynnissä olevien pumppujen teho menee hukkaan 75 % ajasta. Kun uuni on käytössä 24 h/a, on ylimääräisen toiminnan määrä noin 6 300 h/a. /11./

Alkuperäisen version tuottama kokonaisteho oli 718,5 kW, kun jatkuvasti käytössä olevan uunin komponenttien, 9 pumpun, 11 sylinterin ja kaikkien niitä ohjaavien venttiilien vaatima tehon tarve oli vain 580 kW. Lisäksi järjestelmän kytkentäkaaviot ja asennusmenetelmät olivat monimutkaisia. /11./

Rexrothin toteuttaman ratkaisun pohjalla on Sytronix DFEn 5000-järjestelmä. Kaiken kaikkiaan edelliset 9 pumppua korvattiin 3:lla DFEn 5000-järjestelmällä ja yhteensä 5:llä 75 kW:n pumpulla, joiden myötä systeemillä pystytään tuottamaan vain tarpeenmukainen teho. Lisäksi järjestelmästä ja sen kytkentäkaavioista tuli yksinkertaisempia ja paine- ja tilavuusvirtakontrollin myötä häviöt pienenevät. Kuvassa 29 on esitetty muutostöiden yhteydessä tehdyt laskelmat energiankulutuksen ja päästöjen osalta. /11./

## Energy saving

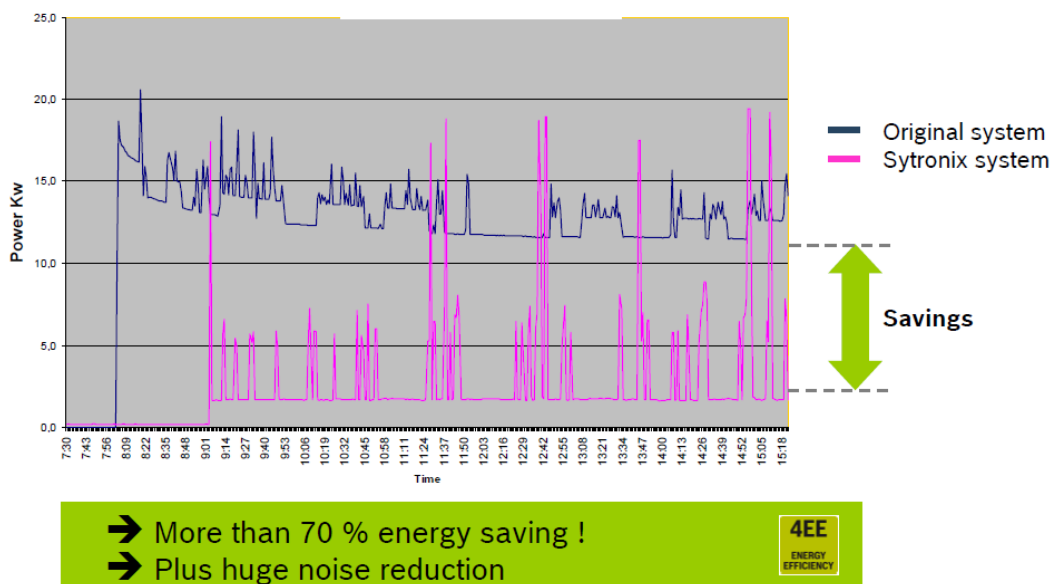


Kuva 29. Järjestelmien energiankulutus- ja päästövertailut /11/

Kuvan 29 vasemmanpuoleisin taulukko kuvaa energiankulutusta kWh:na 8 min syklin aikana. Vanhaa järjestelmää on kuvattu punaisin palkein ja Sytronix-järjestelmää puolestaan vihrein palkein. Vanhassa järjestelmässä laitteisto oli käynnissä koko ajan, vaikka toimilaitteita käytettiin vain 2 min. Sytronix-järjestelmässä tehoa tuotetaan vain silloin kuin sitä tarvitaan, joten kulutus on huomattavasti pienempää. Kuvan 29 keskimäinen taulukko on vastaava energiankulutus vuositasona miljoonina kWh:na ilmaistuna. Kuvan 29 oikean reunan taulukossa on ilmaistu järjestelmien hiilidioksidipäästöjen määrät t/a. Taulukoiden alapuolelle, vihreälle pohjalle on laskettu kokonaissästöjen määrä kun kWh:n hinnaksi on arvioitu 10 snt/kWh, ja syntyvän hiilidioksidin määräksi 400 g/kWh. /11./

Toisessa esimerkissä puunsahauskoneen vanha hydraulikkajärjestelmä korvattiin Sytronix SVP 7000-järjestelmällä, jonka jälkeen tehonkulutusmittaukset olivat kuvan 30 mukaiset. /11./

## Power consumption



Kuva 30. Puunsahauskoneen energiankulutuskäyrät yhden päivän ajalta. /11/

Molemmissa esimerkeissä energiankulutusta on saatu laskettua vähintään 70 %, jonka voi laskea jo todella merkittäväksi muutokseksi. Pienemmän hiilijalanjäljen lisäksi on saavutettu alhaisemmat melutasot sekä yksinkertaisemmat järjestelmätoteutukset, joiden huolto on helpompaa ja selkeämpää. Huoltojen helpompi suoritettavuus johtaa seisokkiaikojen ja kustannusten pienenemiseen. /11/

### 5.3 Käytännön kokeet

Itse koelaitteistoa ei vielä tämän työn puitteissa saatu koottua, sillä tila, minne laitteisto piti rakentaa, osoittautuikin tarpeelliseksi muulle käytölle. Valitettavasti siis kaikki käytännön kokeet jäivät tekemättä, joten kaikki tulokset ja päätelmät ovat simuloinnin perusteella tehtyjä eivätkä täysin vastaa todellisia arvoja. Simuloinnin pohjalta järjestelmien vertailukohteiksi jäivät vain nousunopeudet ja vasteajat sekä tehon- ja energiankulutustasot. Kaikista näistä tuloksista olisi koelaitteiston avulla saatu monipuolisempia ja todellisempia.

## 6 Yhteenveto

Alun perin työlle asetettiin tavoitteeksi koota testilaitteisto, jolla voidaan konkreettisesti esitellä Sytronix-järjestelmän toimivuutta Rexrothin asiakkaille sekä verrata sen ominaisuuksia venttiileillä ohjattaviin hydraulikkajärjestelmiin. Tämä jäi pelkäksi haaveeksi ilmentyneiden ongelmien ja ajan puutteen vuoksi. Täysin hukkaan ei työn parissa vietetty aika kuitenkaan mennyt, sillä simulointien ja teoriakartoitusten myötä Sytronix-järjestelmien energiatehokkuus, nopeus ja toimivuus voitiin todentaa.

On selvää, että Sytronix-järjestelmä on erittäin järkevä ratkaisu tarkkuutta ja nopeutta vaativissa hydraulikkasovelluksissa. Sähköohjauksen tarkkuus ja hydraulikan voima yhdistettynä kompaktiksi paketiksi on pienen hiilijalanjäljen ratkaisu, mikä on teollisuudessa peräänkuulutettua. Kun moottori pyörii vain silloin kun on tarve, pysyvät osat pidempään kunnossa eikä järjestelmä pääse lämpenemään. Erillisen jäähdytysjärjestelmän tarvetta ei näin ollen ole, joten kustannussäästöt kasvavat entisestään.

Toimilaitetta ohjattaessa Sytronix-järjestelmässä ei tarvita erillisiä ohjausventtiileitä, joten liitoksia, tiivisteitä ja muita hajoavia osia on vähemmän. Näin ollen myös välisvuotoja, energia- ja painehäviöitä sekä tilavuusvirtaa vastustavia tekijöitä on huomattavasti vähemmän. Toimilaitteen yhteyteen asennettavissa Sytronix-järjestelmissä ovat etuina myös yksinkertaiset kytkennät, helppo korjattavuus sekä matalampi melutaso.

Useamman kuin yhden toimilaitteen ohjaaminen, ilman useampaa Sytronix-järjestelmää ei onnistu, sillä niiden yhtäaikainen seuraaminen sekä paineen- ja tilavuusvirrantoiton säätö laitekohtaisesti ei ole mahdollista. Sytronix-järjestelmän perusidea siis katoaa, jollei jokaiselle toimilaitteelle asenneta omaa Sytronix-laitteistoa. Jos jokaista toimilaitetta kohden on oma Sytronix, energiatehokkuus korostuu, sillä jokaiselle toimilaitteelle tuotetaan vain tarpeen mukainen paine ja tilavuusvirta. Yksinkertaisimmissa, jatkuvaliikkeisissä sovelluksissa ratkaisu olisi varmasti venttiiliohjus, mutta jos toimilaitteiden liikkeet ovat harvempia tai täysin satunnaisia, voisi useampi Sytronix-yksikkö olla parempi vaihtoehto.

Sähköisen ohjauksen takia Sytronix-järjestelmät ovat nopeita ja tarkkoja. Niiden vasteajat ovat erittäin lyhyitä ja liikenopeudet erittäin suuria. Järjestelmäratkaisuja on karkeasti jaettuna kolme, mutta niiden alaisia sovelluksia on kymmeniä, joten ratkaisuja löytyy kaikenlaisiin sovelluksiin.

Simulaatioista saadut tulokset ovat melko kärjistettyjä, sillä Sytronix-järjestelmän nopeus on vain teoreettinen ja venttiiliohjaukseen valittu venttiili on suhteessa liian pieni järjestelmässä käytetyn moottorin ja pumpun kokoon nähden. Se ei silti poista sitä tosiasiaa ettei Sytronix-järjestelmä todella olisi huomattavasti energiatehokkaampi ja yhtä nopea kuin venttiiliohjaus.

Vaikka koneikkoa ei saatukaan koottua eikä järjestelmiä päästy testaamaan käytännössä, voi silti todeta työn onnistuneeksi. Tähän asti tehdystä työstä on suurin osa ajasta mennyt sähkökaavioiden piirtoon ja ePlan-ohjelman käytön opetteluun, mikä ei suinkaan ole turhaa työtä, mutta lopputuloksien kannalta melko näkymätöntä. Lisäksi simulointiohjelman opettelu ja tulosten ulos saaminen vei paljon aikaa. Nyt kun pohjatyöt on tehty, voisi tätä projektia jatkaa esimerkiksi uuden insinööritoimiston puitteissa. Koneikon rakentaminen ja konkreettisten testitulosten vertaaminen simuloimalla saatuihin tuloksiin voisi olla hyvä aihe projekti- tai insinööritoimistolle.

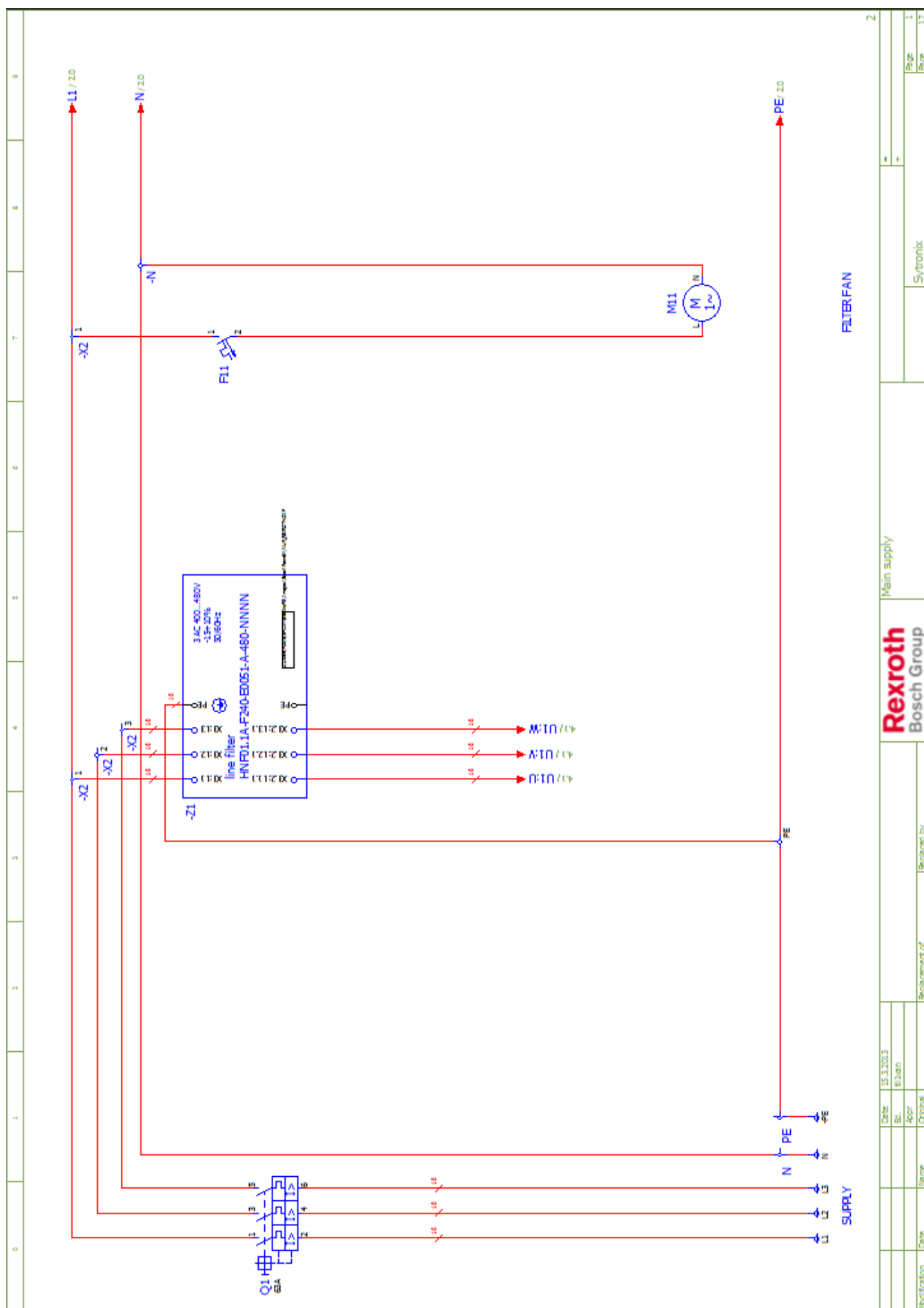
## Lähteet

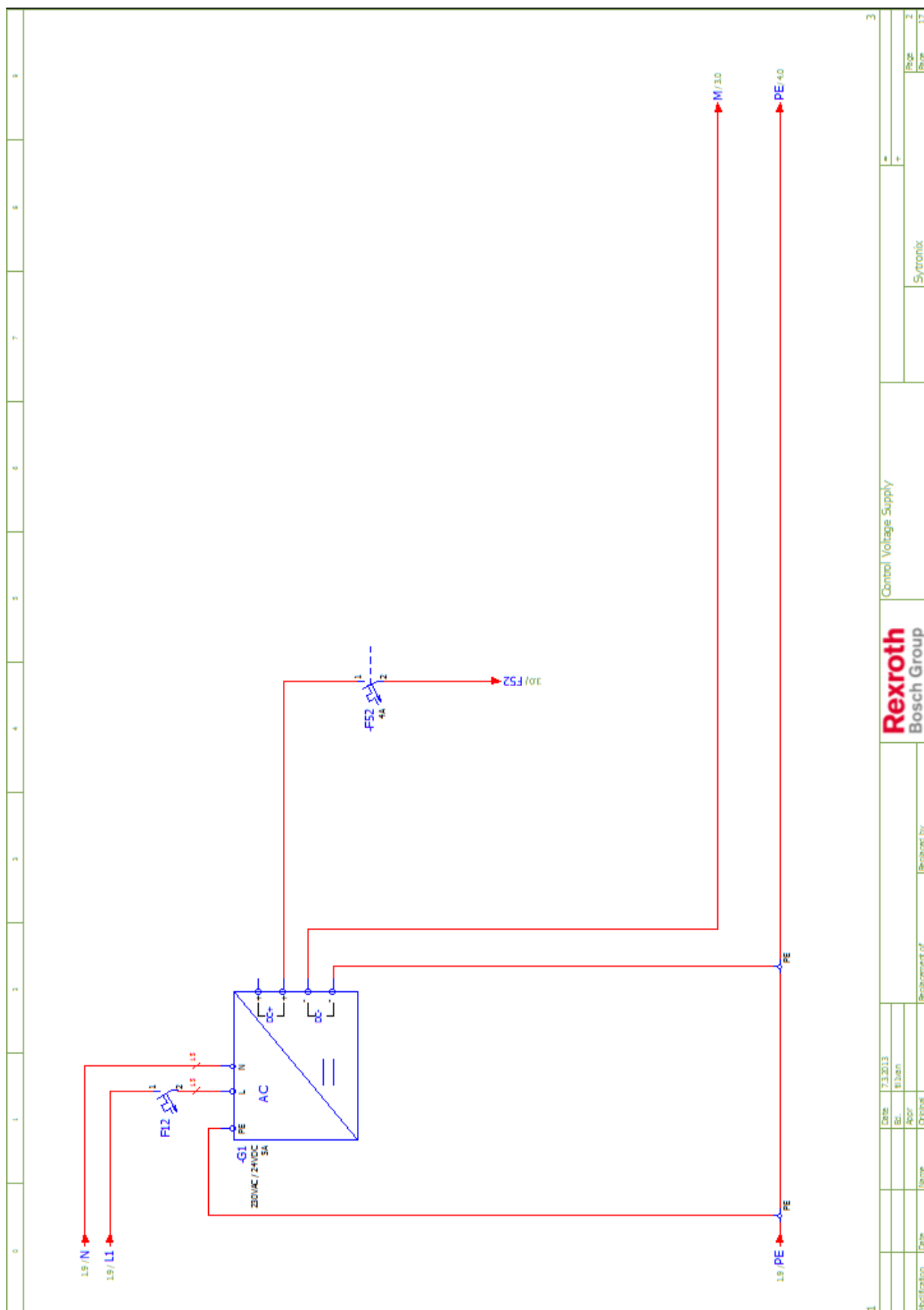
- 1 Exner, H., Freitag, R., Dr.-Ing, Geis, H., Lang, R., Oppolzer, J., Schwab, P. & Sumpf, E. 1991. The Hydraulic Trainer, Osa 1. Hydrauliiikkatekniikan perusteet ja komponentit. 4. uud. painos. Marktheidenfeld am Main: Schleunungdruck GmbH.
  
- 2 Ewald, R., Hutter, J., Kretz, D., Liedhegener, F., Schenkel, W., Schmitt, A. & Reik, M. 2001. The Hydraulic Trainer, Osa 2. Proportionaali- ja servventtiilitekniikka. Wertheim/Wartberg: Hinckel-Druck GmbH.
  
- 3 Götz, W. 1993. Sähköhydraulinen proportionaali- ja säätötekniikka teoriassa ja käytännössä. Stuttgart: Robert Bosch GmbH.
  
- 4 Fonselius, J., Rinkinen, J., Vilenius, M. 1997. Hydrauliiikka II. 2. uud.painos. Helsinki: Oy Edita Ab.
  
- 5 Pennala, E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. Helsinki: Otatieto.
  
- 6 Gieras, J. F. & Wing, M. 2002. Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications Second Edition, Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker, Inc.
  
- 7 Bosch Rexrothin internetsivut. Tietoa Bosch Rexrothista. Verkkodokumentti. 2012 <[http://www.boschrexroth.fi/country\\_units/europe/finland/fi/company/yritys/index.jsp](http://www.boschrexroth.fi/country_units/europe/finland/fi/company/yritys/index.jsp)> Luettu 10.1.2013.
  
- 8 Bosch Rexrothin internetsivut. Sytronix. Verkkodokumentti. 2012 <[http://www.boschrexroth.com/en/xr/products/systems/variable\\_speed\\_pump\\_drives/products\\_and\\_solutions/index](http://www.boschrexroth.com/en/xr/products/systems/variable_speed_pump_drives/products_and_solutions/index)> Luettu 8.2.2013
  
- 9 Paavilainen, H. 2011. Hydraulijärjestelmät. Luentomateriaali Metropolia Ammattikorkeakoulun sisäisessä koulutuksessa.
  
- 10 Paavilainen, H. 2011. Hydrauliiikka 1. Luentomateriaali. <<https://wiki.metropolia.fi/download/attachments/12158203/luentomoniste.pdf>> Luettu 25.1.2012.
  
- 11 Bosch Rexrothin internetsivut. Media directory. Verkkokatalogi. 2012 <[http://www.boschrexroth.com/borexmvz2/Category.jsp?language=en-GB&publication=NET&ccat\\_id=10000](http://www.boschrexroth.com/borexmvz2/Category.jsp?language=en-GB&publication=NET&ccat_id=10000)> Luettu 10.3.2013.

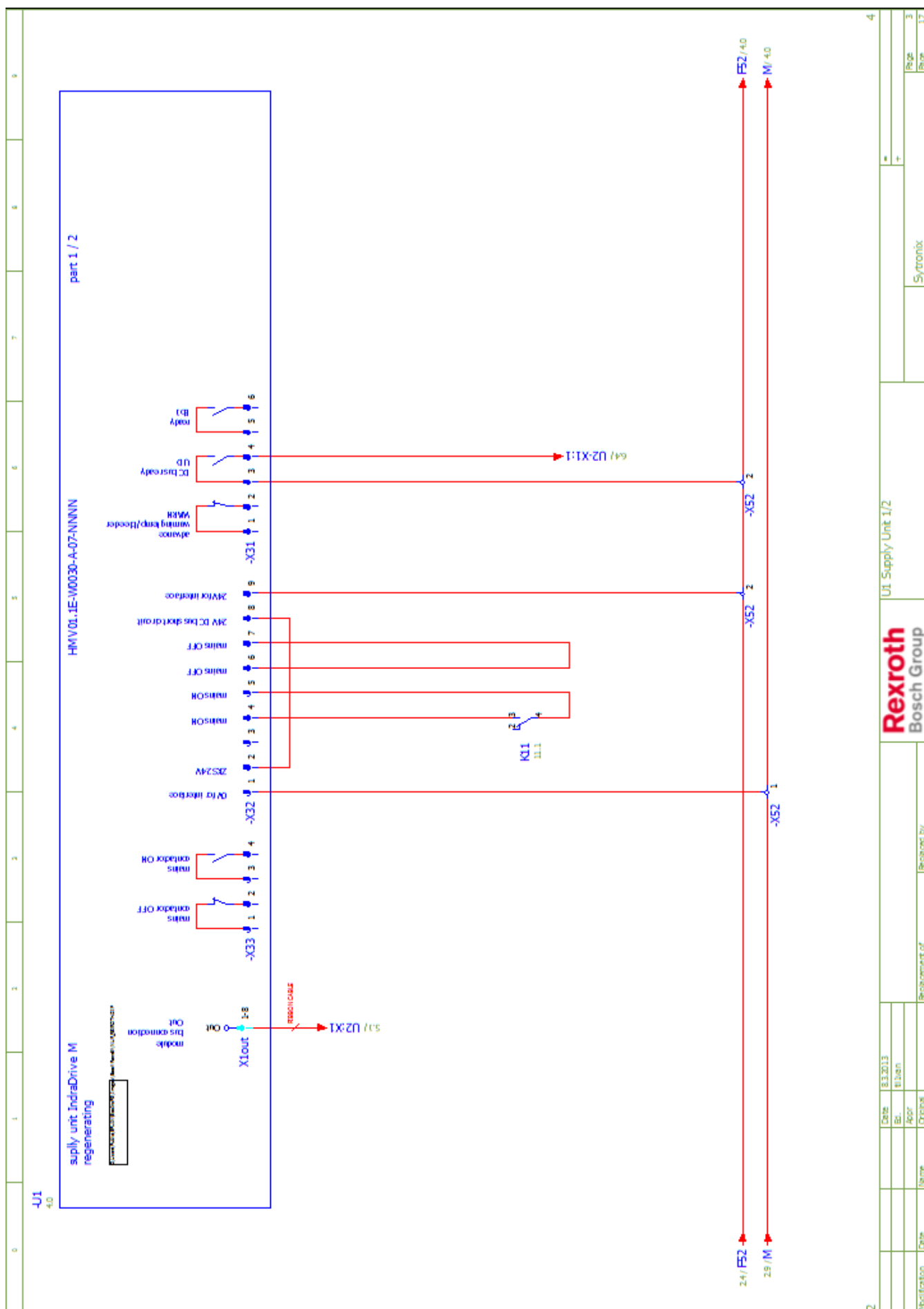


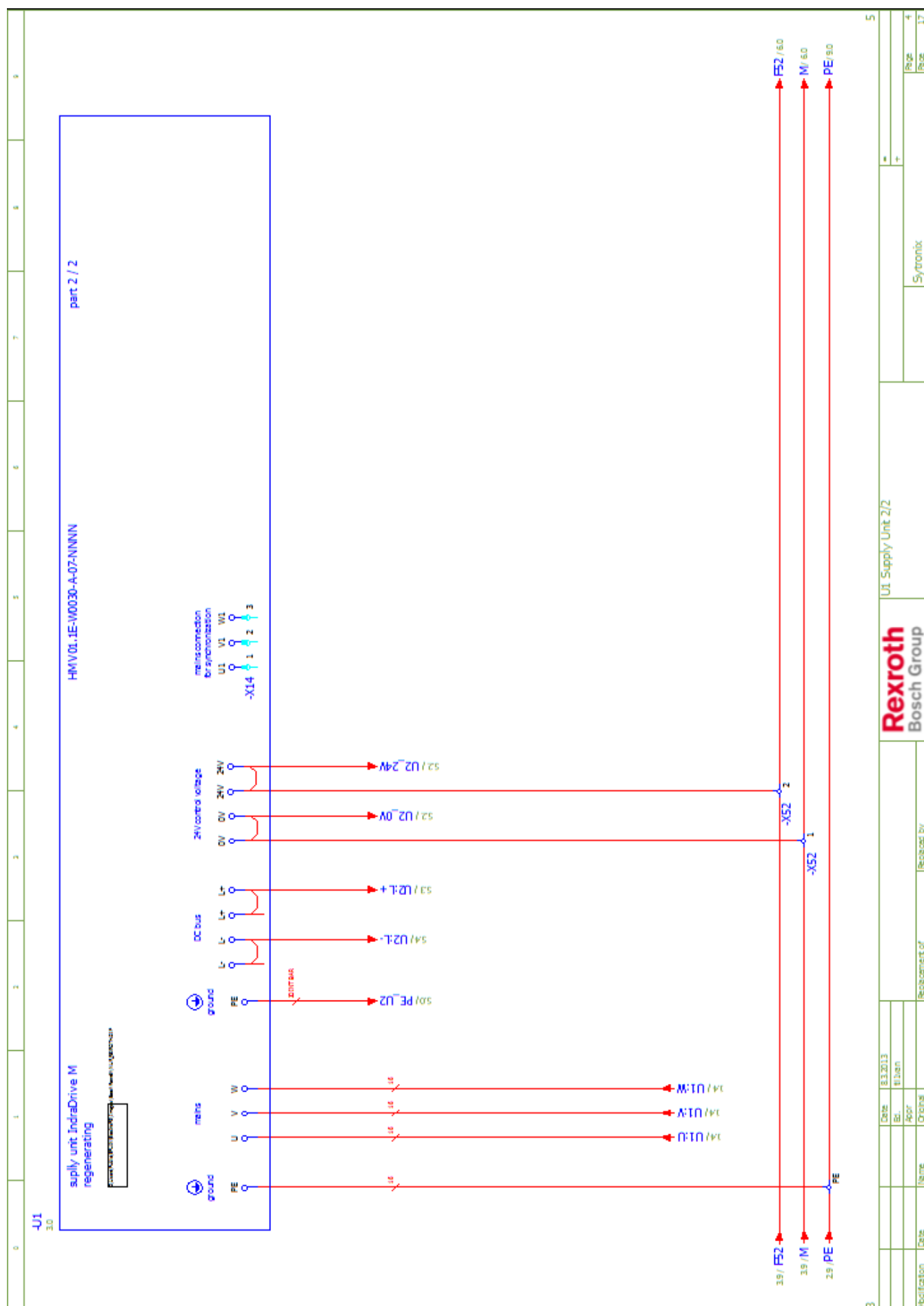
## **KytKentäkaaviot**

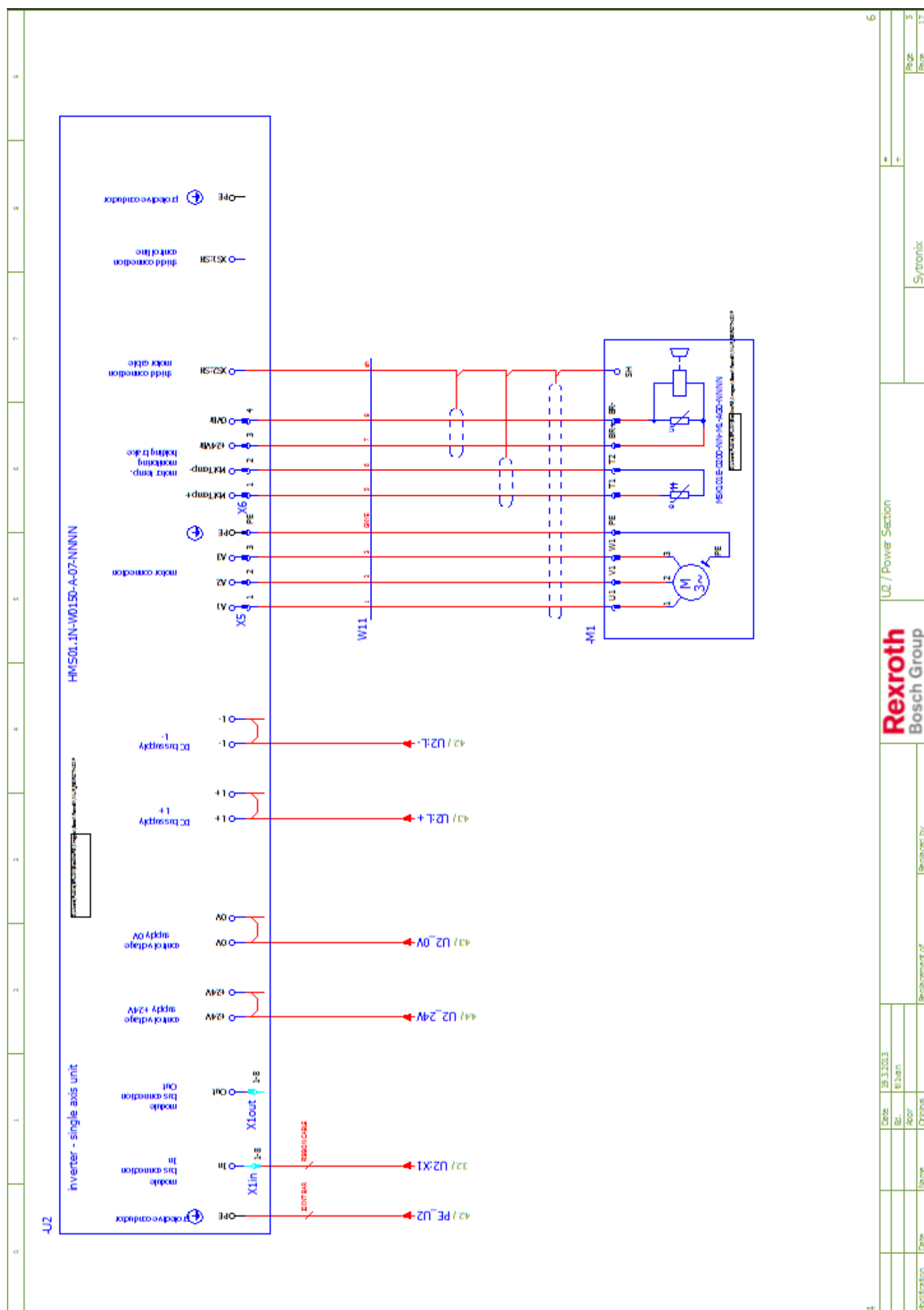
Tässä liitteessä on esitetty ePlan -ohjelmistolla luodut Sytronix -järjestelmän kytKentäkaaviot. KytKentäkaavioissa on esitetty sähkökaappiin tulevat logiikan osat sekä niihin kytkettävät anturit ja muut johdotukset.

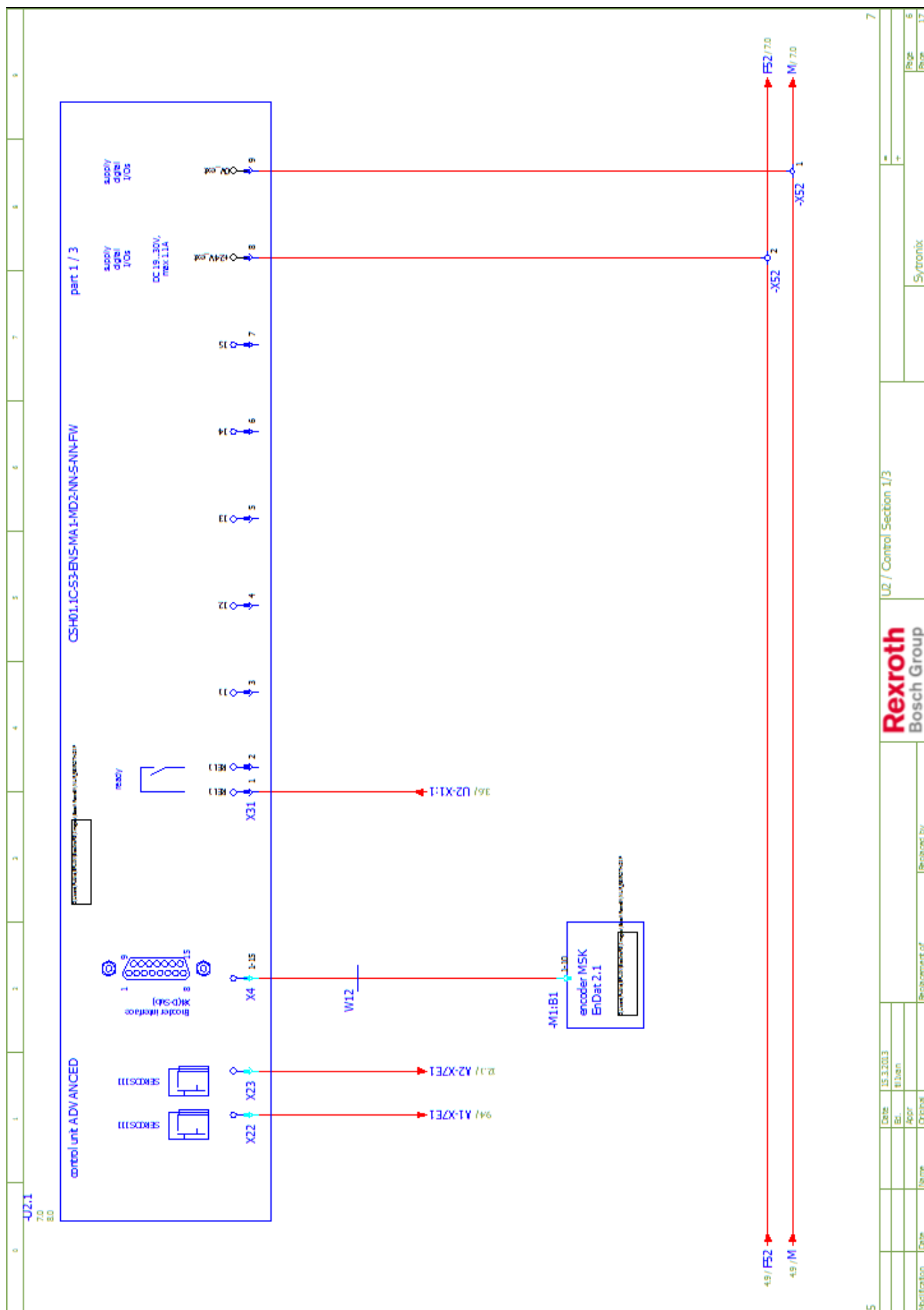


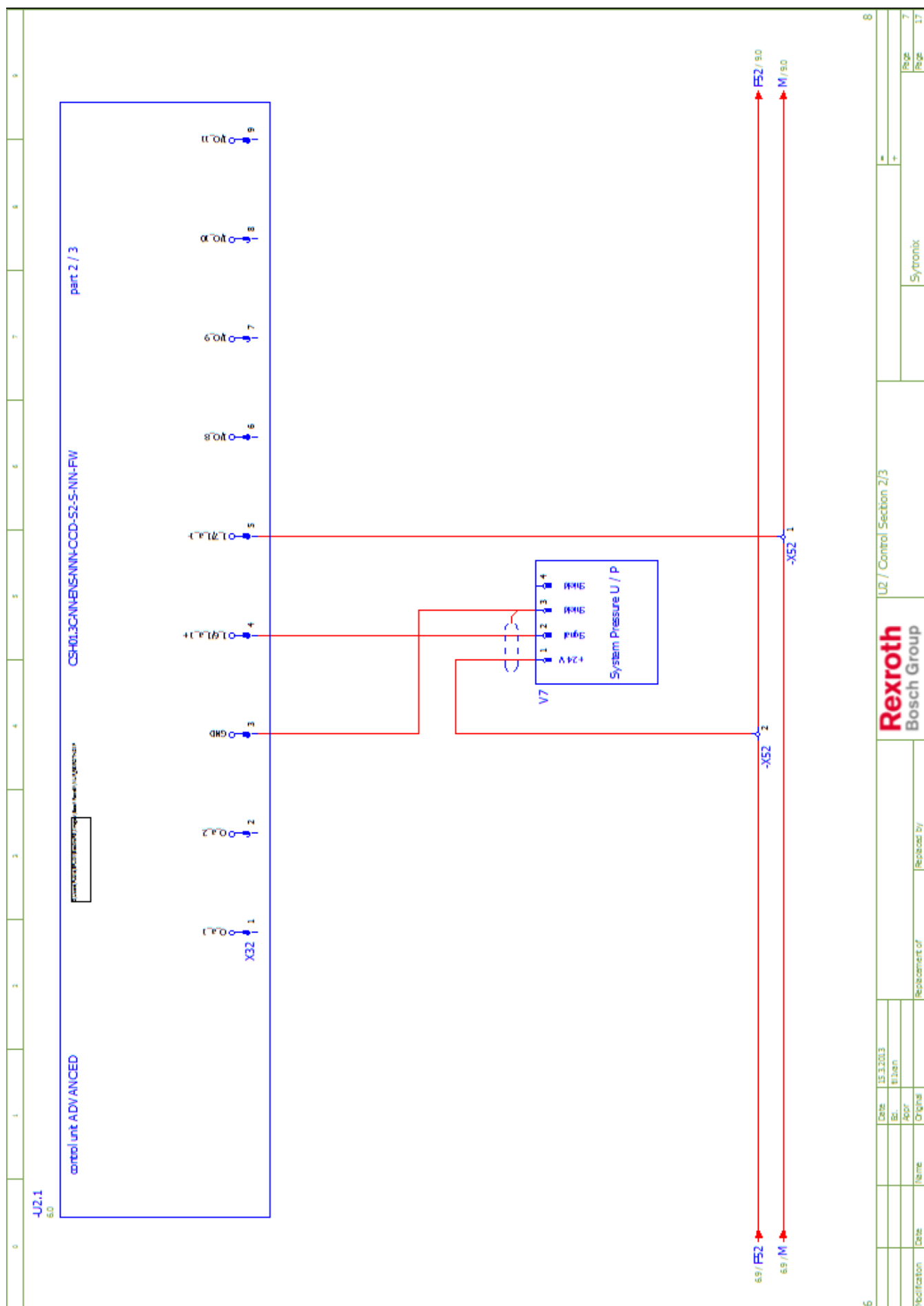




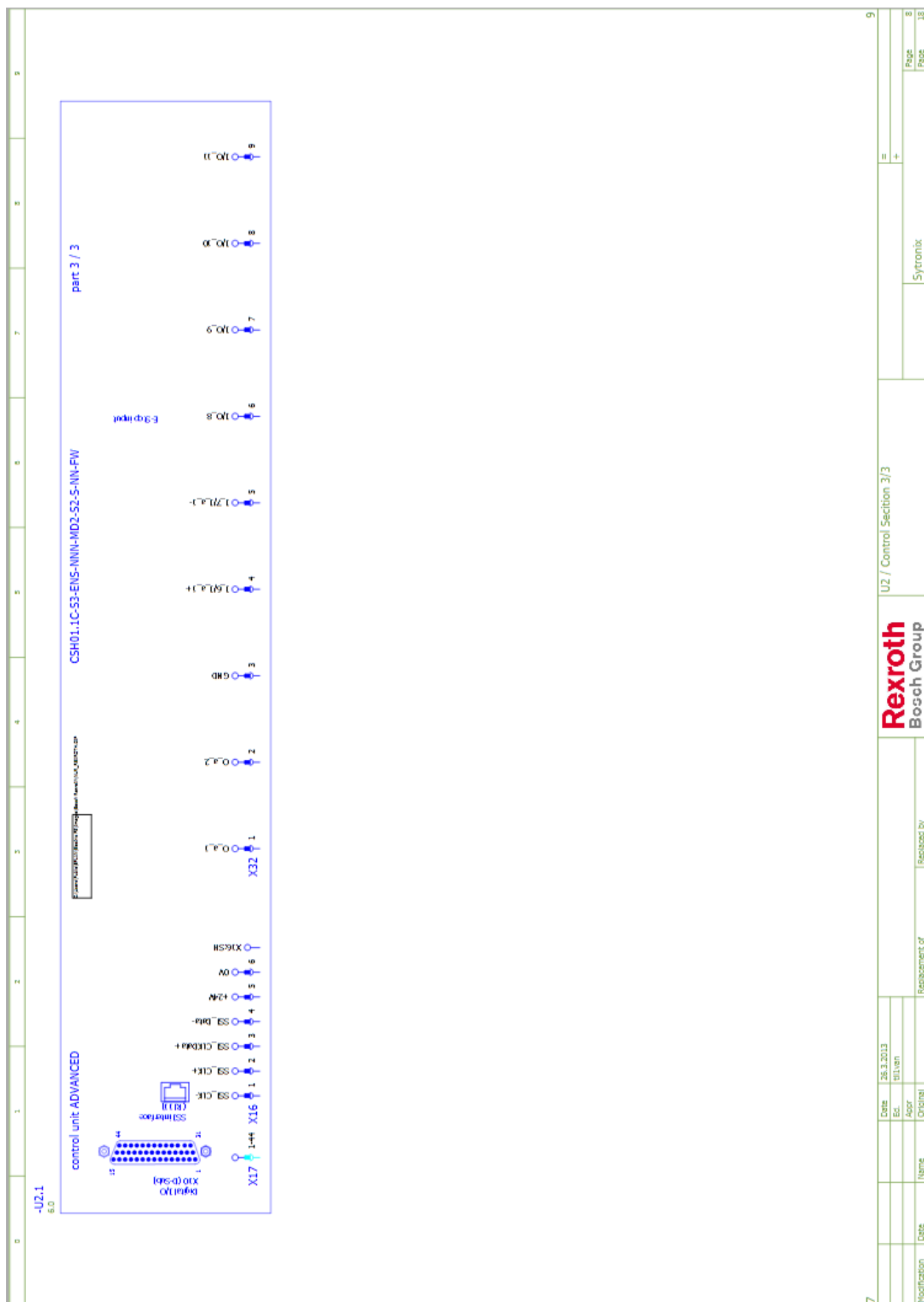


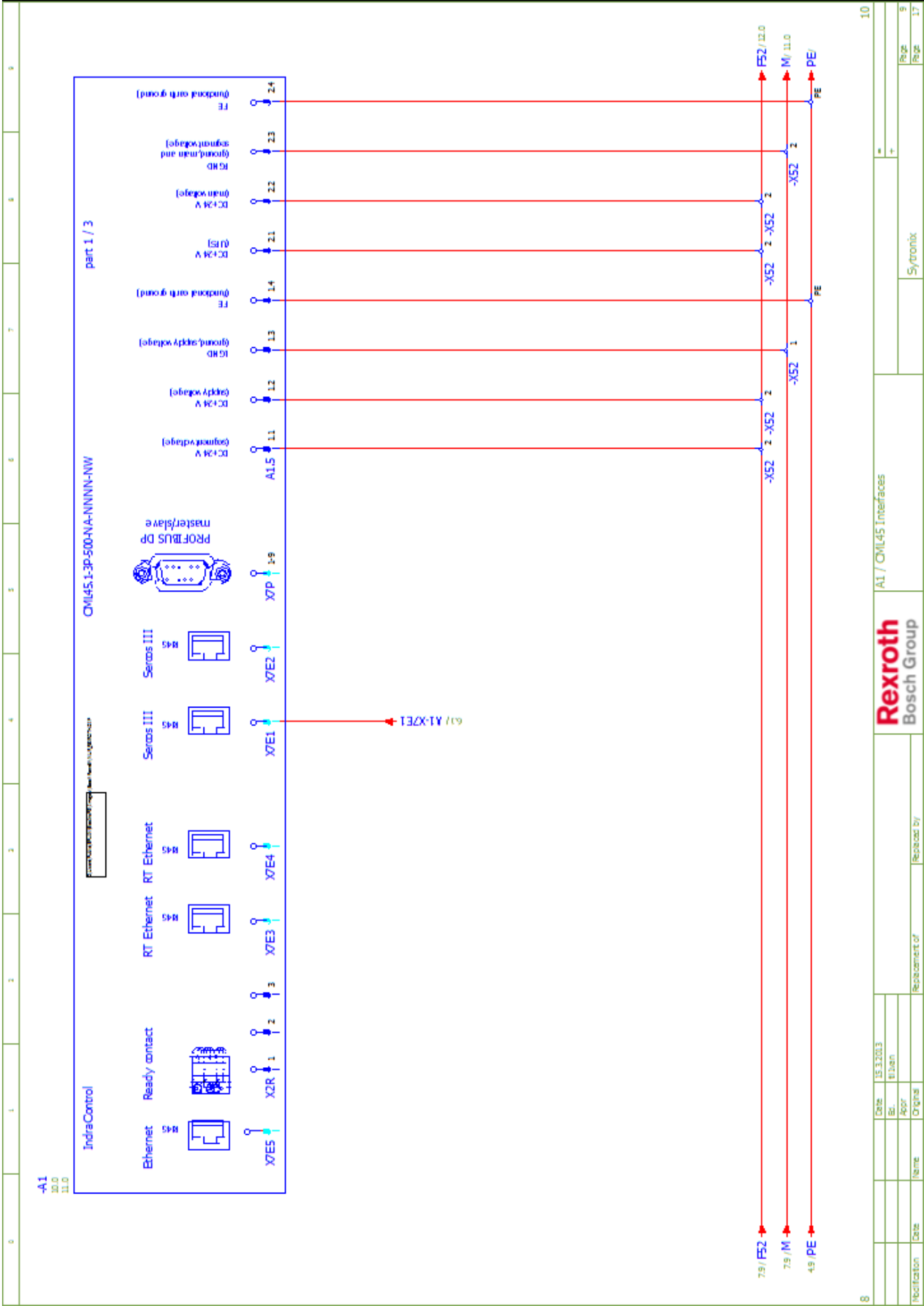


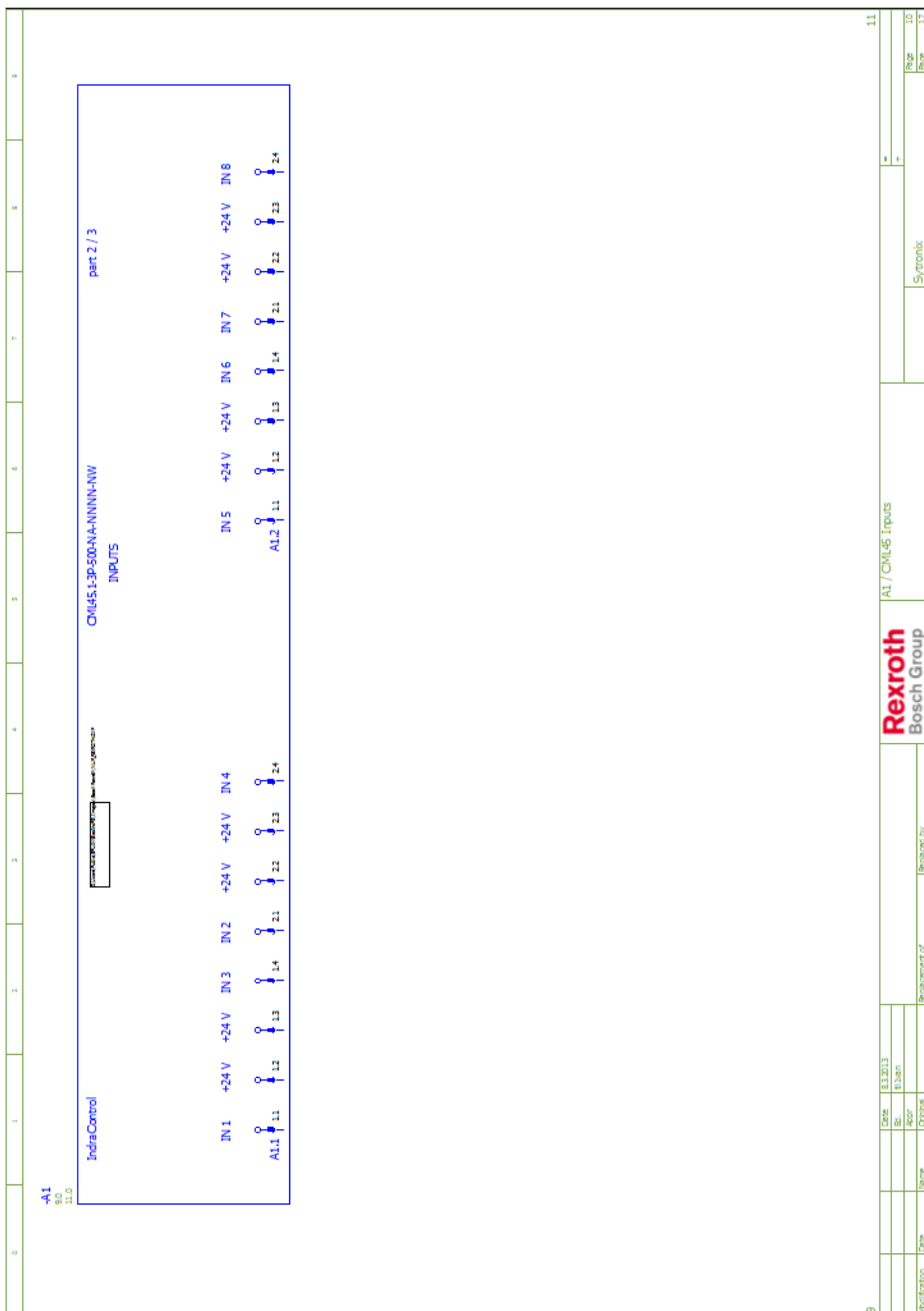


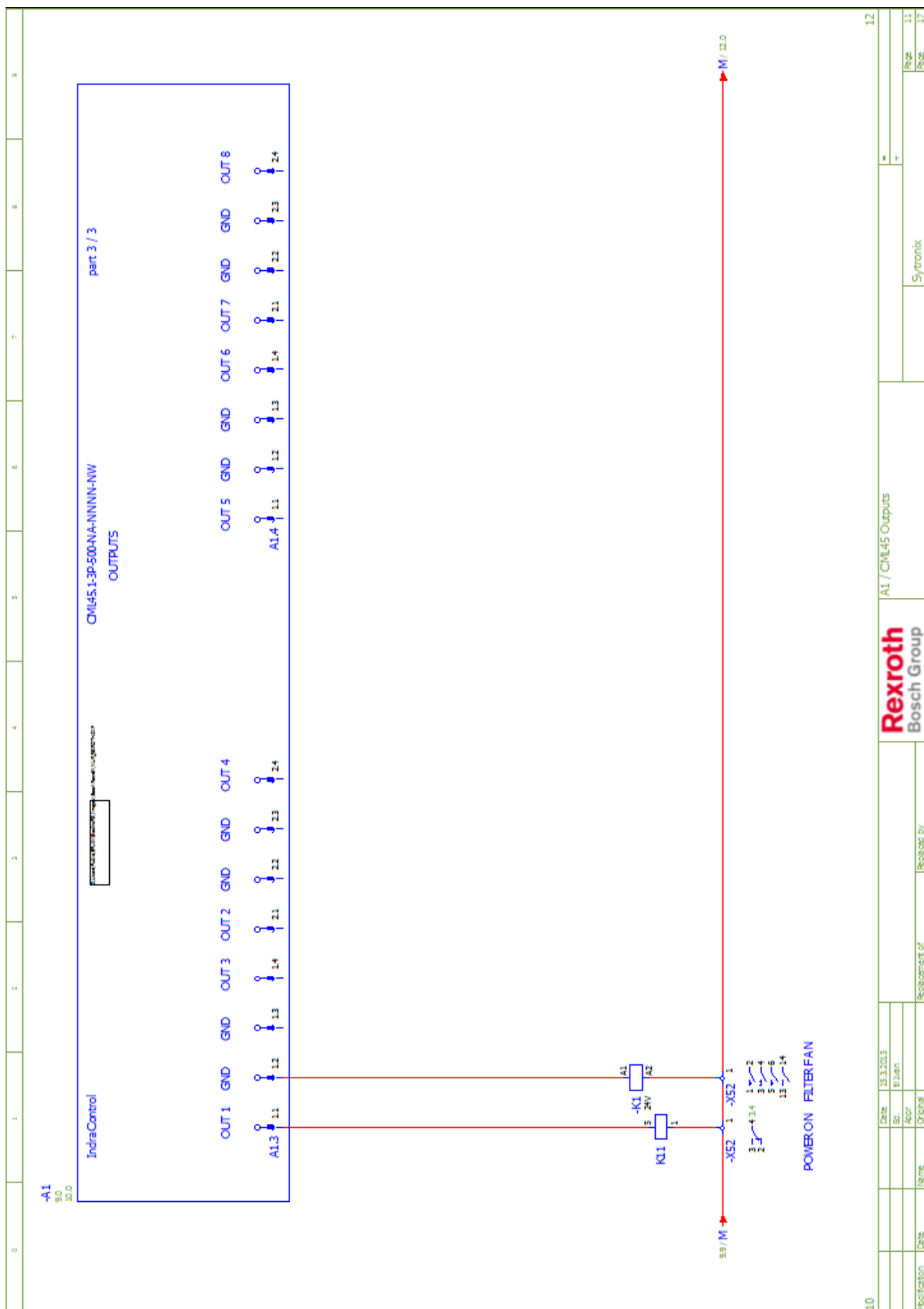


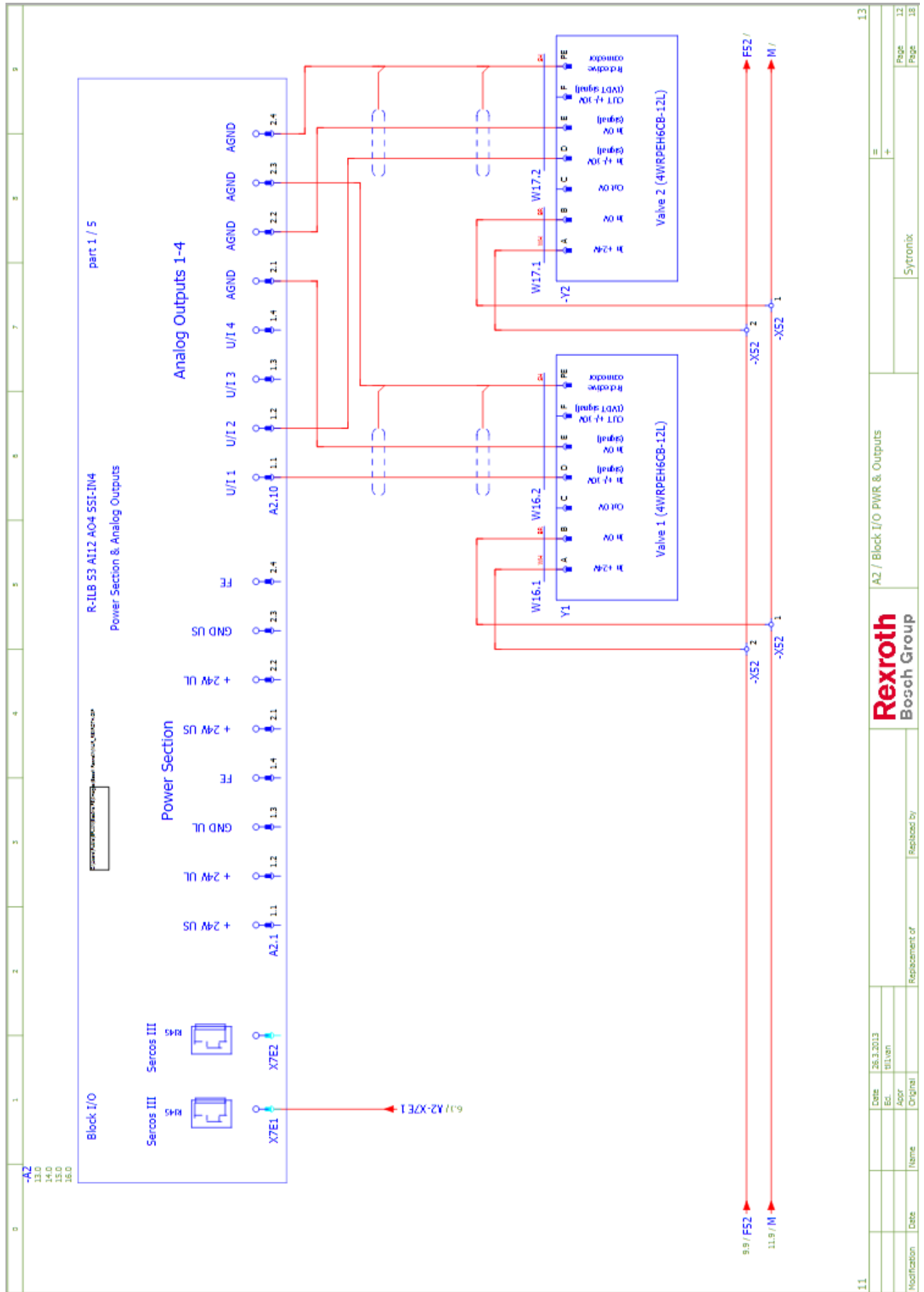


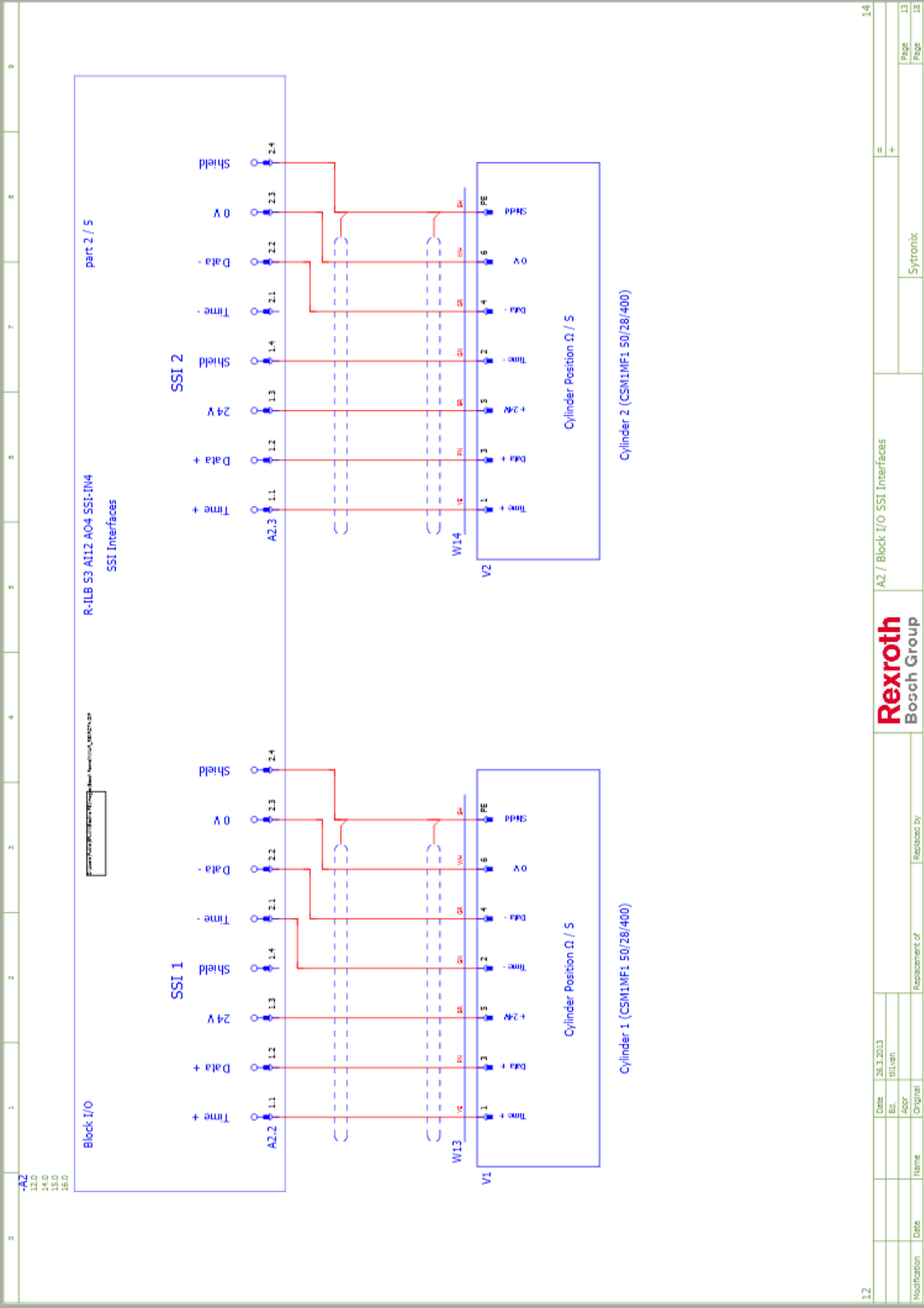


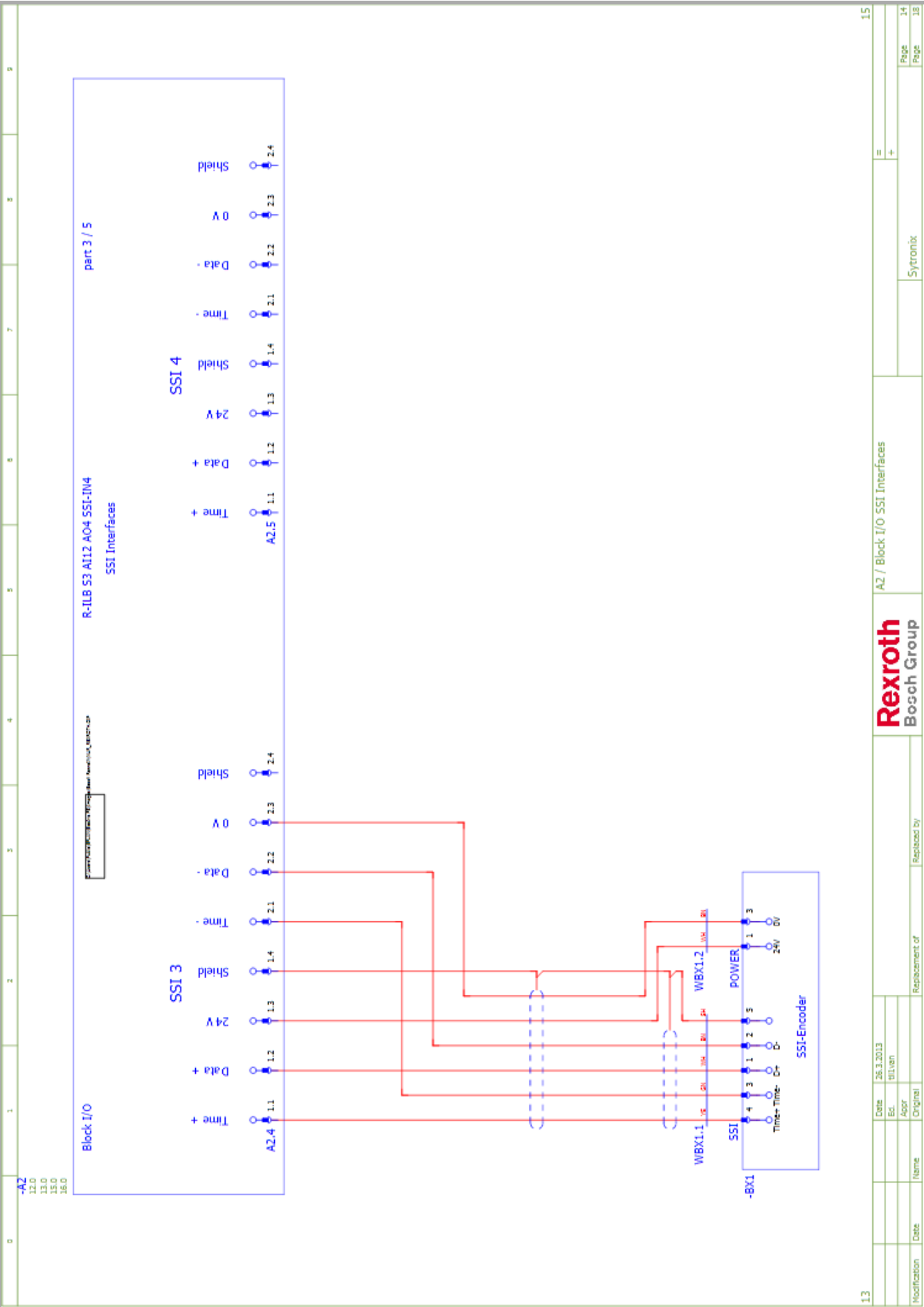


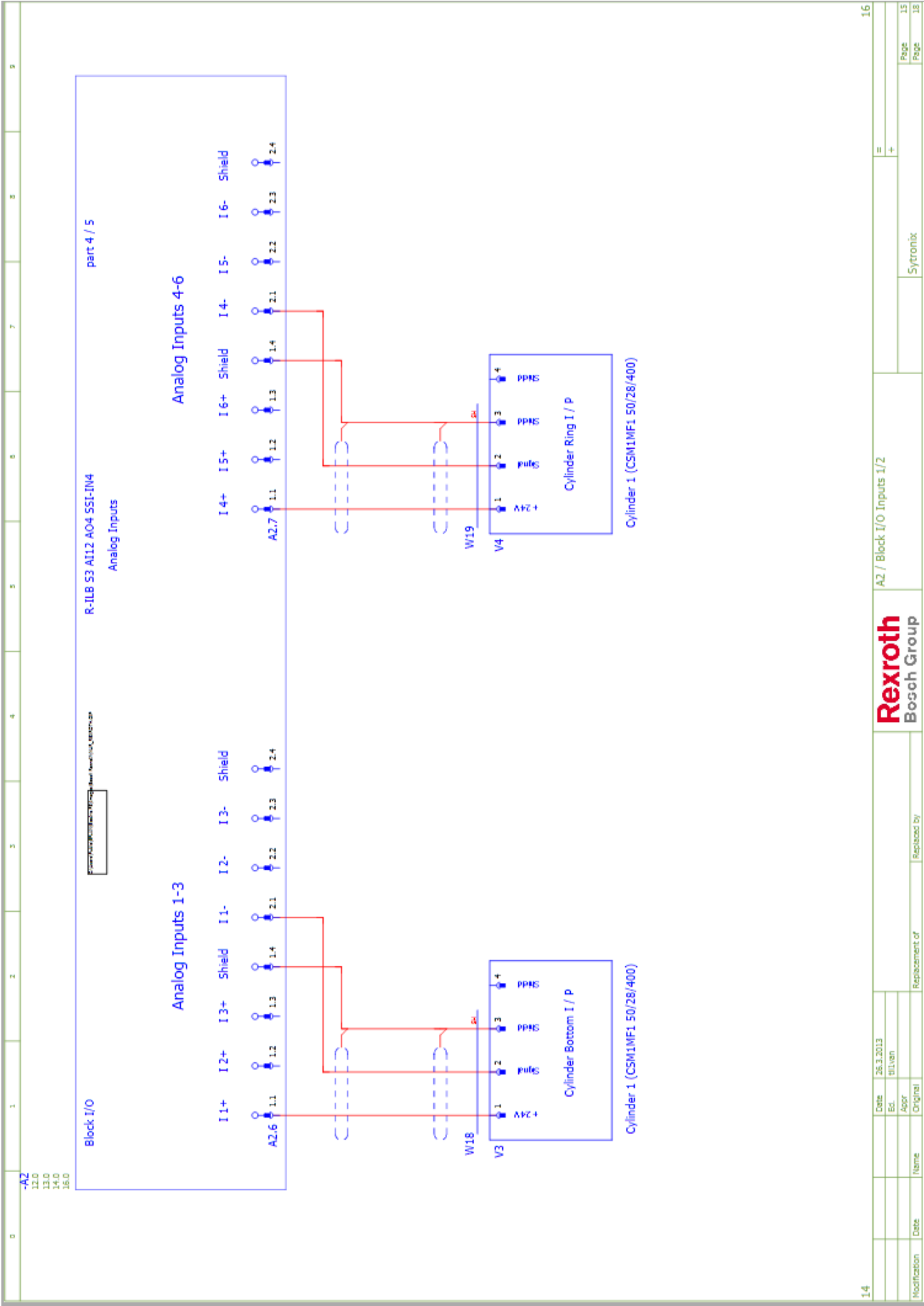




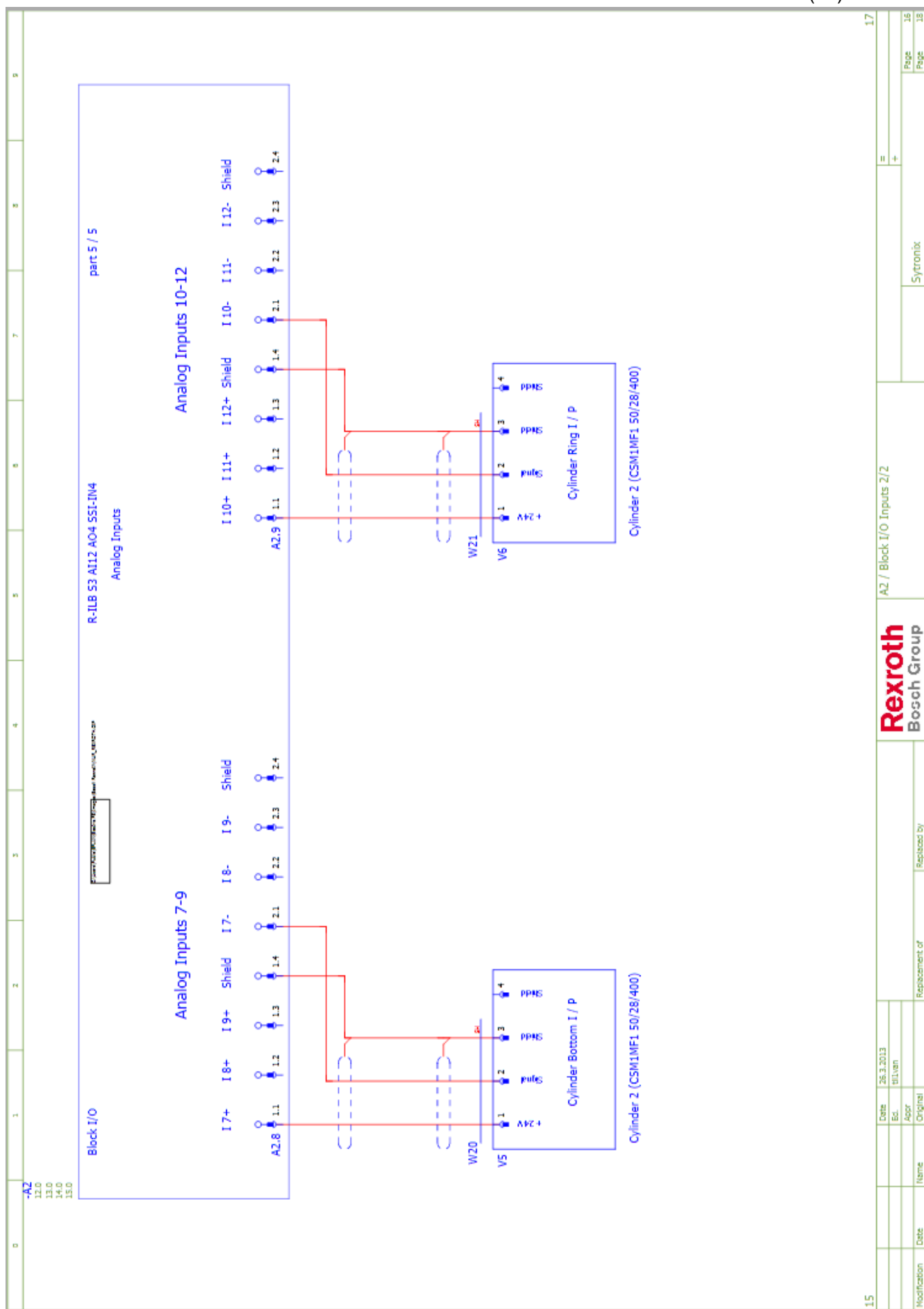


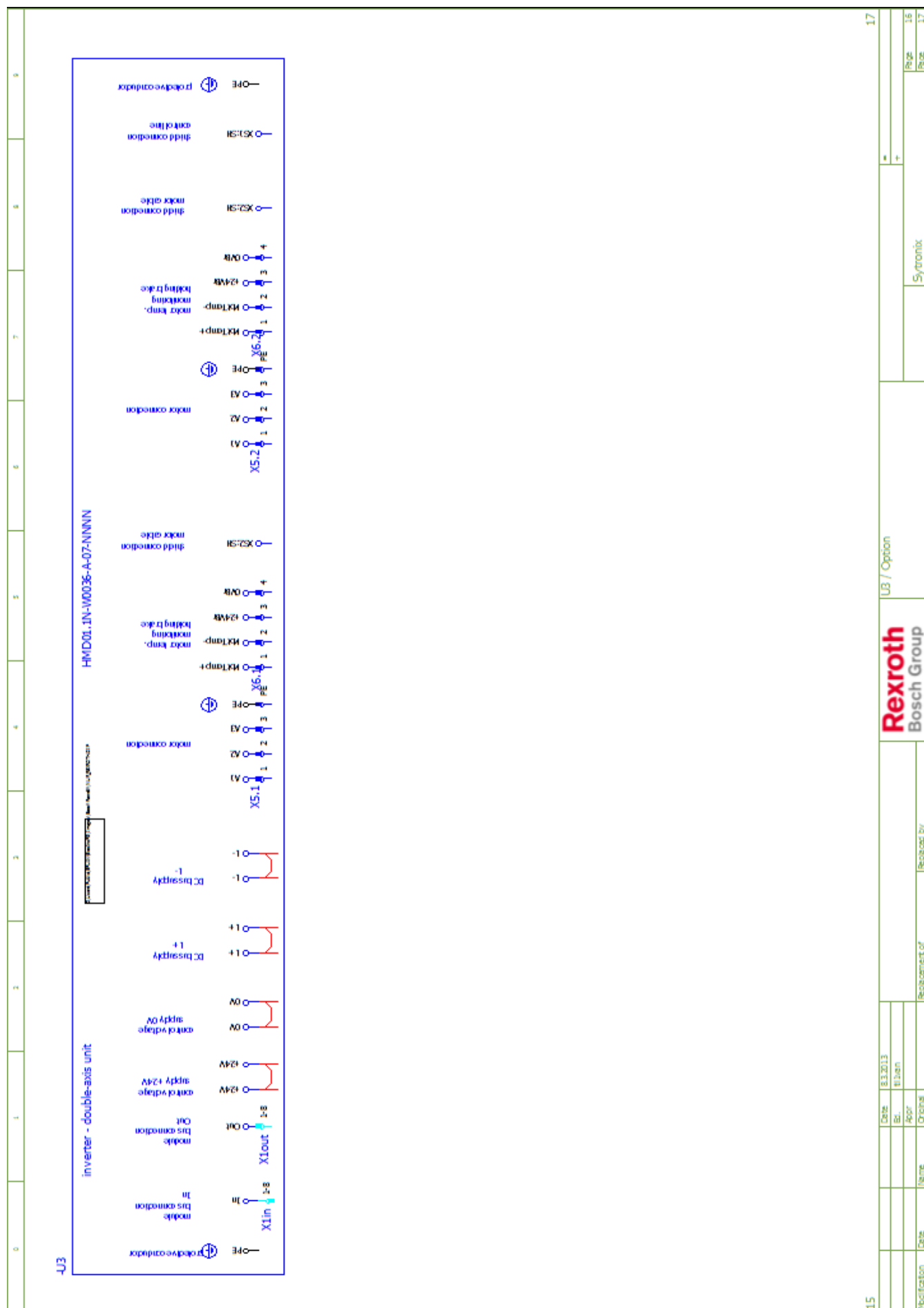


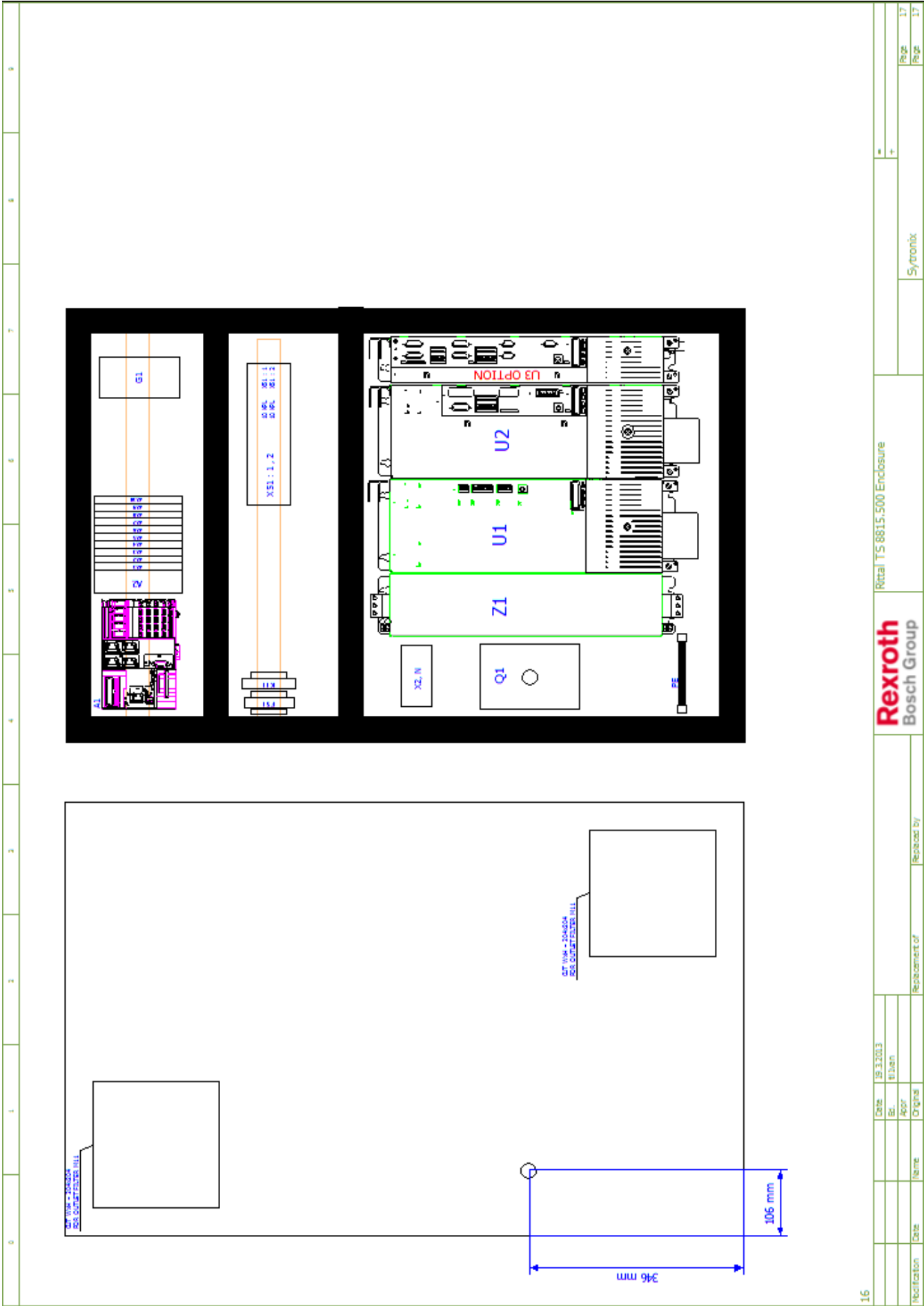












## Osaluettelo

Sähkökytkentöihin tarvittavien osien luettelo.

Parts list					
ELECTRIC DEVICES					
Device tag	Quantity	Designation	Type number	Supplier	Part number
A1	1	IndraControl CML45 connection modul	CML45.1-3P-500-NA-NNNN-NW	Bosch Rexroth	CML45.1-3P-500-NA-NNNN-NW
A2	1	Inline Block I/O for SERCOS III	R-ILB S3 AI12 AO4 SSH-IN4	Bosch Rexroth	R-ILB S3 AI12 AO4 SSH-IN4
F11	1	Miniature circuit breaker	C60N 24348	Schneider Electric	C60N 24348
F12	1	Miniature circuit breaker	C60N 24348	Schneider Electric	C60N 24348
F52	1	Miniature circuit breaker	C60N 24308	Schneider Electric	C60N 24308
F52	1	Aux. Contact block	C60 26924	Schneider Electric	C60 26924
K1	1	Contacto	LP4-K0910BW3	Schneider Electric	LP4-K0910BW3
K11	1	Relay	G2R-1SND-24VDC	Omron Industrial Automation	G2R-1SND-24VDC
K11	1	Relay base	P2RF-05-E	Omron Industrial Automation	P2RF-05-E
M11	1	Fan and filter unit 230V	SK 3323.100	Rittal	SK 3323.100
Q1	1	NS100N Compact circuit breaker	29003	Schneider Electric	29003
Q1	1	Trip unit -TM63D 3 poles	29032	Schneider Electric	29032
Q1	1	Handle with shaft	29338	Schneider Electric	29338
Q1	1	Terminal shield longs (1 pair)	29323	Schneider Electric	29323
Q1	1	Bare cable connectors set of 3	29242	Schneider Electric	29242
U1	1	Power Supply	HIMV01.1E-W0030-A-07-NNIN	Bosch Rexroth	HIMV01.1E-W0030-A-07-NNIN
U2	1	Inverter - Single axis unit	HMS01.1N-W0150-A-07-NNNN	Bosch Rexroth	HMS01.1N-W0150-A-07-NNNN
U2.1	1	Control Unit	CSH01.1C-S3-ENS-MA1-MD2-NN-S-NN-FW	Bosch Rexroth	CSH01.1C-S3-ENS-MA1-MD2-NN-S-NN-FW
U3	1	Inverter - Double axis unit (OPTION)	HMD01.1N-W0036-A-07-NNNN	Bosch Rexroth	HMD01.1N-W0036-A-07-NNNN
W11	1	Motor Cable	RKL4323 (4x6+(2x1)+(2x1,5))	Bosch Rexroth	RKL4323 (4x6+(2x1)+(2x1,5))
W12	1	Data Cable	RKG4200 (4x2x0,25+2x0,5)	Bosch Rexroth	RKG4200 (4x2x0,25+2x0,5)
W13	1	UNITRONIC LIYCY 7x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034407	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034407
W14	1	UNITRONIC LIYCY 7x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034407	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034407
W15	1	UNITRONIC LIYCY 3x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034403	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034403
W16.1	1	UNITRONIC FD CY 4x0,25	UNITRONIC® FD CY	LappGroup	LAPP.0027427 (4x0,25)
W16.2	1	UNITRONIC LIYCY 3x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034403	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034403
W17.1	1	UNITRONIC FD CY 4x0,25	UNITRONIC® FD CY	LappGroup	LAPP.0027427 (4x0,25)
W17.2	1	UNITRONIC LIYCY 3x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034403	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034403
W18	1	UNITRONIC LIYCY 3x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034403	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034403
W19	1	UNITRONIC LIYCY 3x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034403	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034403
W20	1	UNITRONIC LIYCY 3x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034403	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034403
W21	1	UNITRONIC LIYCY 3x0,25	UNITRONIC LIYCY 0034403	LappGroup	UNITRONIC LIYCY 0034403
WBX1.1	1	Data Cable	UNITRONIC LIYCY	LappGroup	UNITRONIC LIYCY (3x2x0,25)
WBX1.2	1	UNITRONIC FD CY 4x0,25	UNITRONIC® FD CY	LappGroup	LAPP.0027427 (4x0,25)
X2	6	Feed-through terminal block UT 10	UT 10	Phoenix Contact	PXC.3044160
X2	2	End clamp CLIPFIX 35-5	CLIPFIX 35-5	Phoenix Contact	PXC.3022276
X2	1	Marker carrier	AK-DST/DIK	Phoenix Contact	PXC.1000779
X2	3	Plug-in Bridge	FBS 2-10	Phoenix Contact	PXC.3005947
X2	4	End cover D-UT 2,5/10	D-UT 2,5/10	Phoenix Contact	PXC.3047028
X52	10	Double-level terminal block	UTTB 2,5	Phoenix Contact	PXC.3044636
X52	2	Spacer Plate	DP-UTTB 2,5/4	Phoenix Contact	PXC.3047303
X52	1	Marker carrier	AK-DST/DIK	Phoenix Contact	PXC.1000779
X52	4	Plug-in Bridge	FBS 5-5	Phoenix Contact	PXC.3030190
X52	4	End cover D-UT 2,5/10	D-UTTB 2,5/4	Phoenix Contact	PXC.3047293
Y1	1	4/4 Controlled directional Valve	4WRPEH6CB-12L	Bosch Rexroth	4WRPEH6CB-12L
Y2	1	4/4 Controlled directional Valve	4WRPEH6CB-12L	Bosch Rexroth	4WRPEH6CB-12L
Z1	1	Filter Unit	HNF01.1A-F240-E0051-A-480-NNNN	Bosch Rexroth	HNF01.1A-F240-E0051-A-480-NNNN
OTHER DEVICES					
Enclosure	1	Rittal TS 8815.500	TS 8815.500	Rittal	TS 8815.500
Motor					
M1	1	Servo Motor	MSK101E-0200-NN-M1-AG0-NNNN	Bosch Rexroth	MSK101E-0200-NN-M1-AG0-NNNN
G1	1	Motor Encoder			
Pump	1	Axial Piston Fixed Motor A2FM45	A2FM45	Bosch Rexroth	A2FM45
Cylinder	2	Hydraulic cylinder	CSM1MF1 50/28/400	Bosch Rexroth	CSM1MF1 50/28/400
Sensors					
V1	1	Position measuring system (Cylinder 1)	Integrated into Cylinder 1 = C1		
V2	1	Position measuring system (Cylinder 2)	Integrated into Cylinder 2 = C2		
V3	1	Pressure transducer (integrated into C1)	HM 17-1X/400-C/V/O/O	Bosch Rexroth	HM 17-1X/400-C/V/O/O
V4	1	Pressure transducer (integrated into C1)	HM 17-1X/400-C/V/O/O	Bosch Rexroth	HM 17-1X/400-C/V/O/O
V5	1	Pressure transducer (integrated into C2)	HM 17-1X/400-C/V/O/O	Bosch Rexroth	HM 17-1X/400-C/V/O/O
V6	1	Pressure transducer (integrated into C2)	HM 17-1X/400-C/V/O/O	Bosch Rexroth	HM 17-1X/400-C/V/O/O
V7	1	System Pressure transducer	HM 20-10/400-H-K35	Bosch Rexroth	HM 20-10/400-H-K35