

Arto Rantanen

AMS-ionilähteen kaasunsyöttölinjan automatisointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

20.05.2014

Tekijä Otsikko	Arto Rantanen AMS-ionilähteen kaasunsyöttölinjan automatisointi
Sivumäärä Aika	33 sivua + 2 liitettä 20.5.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Automaation tietotekniikka
Ohjaajat	Tutkijatohtori Vesa Palonen Laboratorioinsinööri Harri Tyrväinen Lehtori Jussi Pakarinen
<p>Helsingin yliopiston kiihdytinlaboratoriossa sijaitsevaan AMS-ionilähteen kaasunsyöttöjärjestelmään kuuluu 12 näytteille tarkoitettua varastoputkea sekä askelmoottoriohjattu injektioruisku näytteiden siirtämiseen AMS-ionilähteelle. Järjestelmässä käytetään hiilidioksidinäytteitä, jotka asetetaan varastoputkiin ja injektioruiskuun nestetyypen ja alipaineen avulla. Nestetyyppiä käytetään härmistämään näyte varastoputkiin ja injektioruiskuun.</p> <p>Tämän insinööriyön tavoitteena on tehdä AMS-ionilähteen kaasunsyöttöjärjestelmälle PI-kaavio, I/O-lista, järjestelmää ohjaava LabVIEW-sovellus ja valita injektioruiskulle sopiva lineaariaskelmoottori. Järjestelmän toimintatavoitteena on, että järjestelmällä pystyttäisiin siirtämään näytteitä varastoputkiin sekä injektioruiskuun. Lisäksi järjestelmällä tulisi pystyä siirtämään näyte ionilähteelle.</p> <p>Insinööriyö käsittelee järjestelmän tavoitteiden toteutuksen lisäksi järjestelmän testaamista ja vuotojen etsintää.</p>	
Avainsanat	LabVIEW, CompactRIO, tyhjiö, vuodonetsintä

Author Title	Arto Rantanen Automatization of the gas input system of the AMS ion source
Number of Pages Date	33 pages + 2 appendices 20 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Technology
Specialisation option	Information Technology in Automation
Instructors	Vesa Palonen, Postdoctoral Researcher Harri Tyrväinen, Laboratory Manager Jussi Pakarinen, Senior Lecturer
<p>The gas input system of the AMS ion source in the Accelerator Laboratory in the University of Helsinki consists of 12 visible pipes used to store samples and a stepper motor powered syringe pump used to transfer the samples to the AMS ion source. The system uses carbon dioxide samples that are placed into the pipes and the syringe pump using liquid nitrogen and a vacuum. Liquid nitrogen is used to desublimates the samples.</p> <p>The aim of this thesis is to create a piping and instrumentation diagram (P&ID), an I/O list, a LabVIEW application to control the system and to choose a suitable linear stepper motor for the syringe pump. The purpose of the system is to transfer the samples into the storage pipes and the syringe pump. Moreover, the system should be capable of transferring the sample into the ion source.</p> <p>In addition, the thesis deals with testing the system and search for possible leaks.</p>	
Keywords	LabVIEW, CompactRIO, vacuum, leak detection

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	AMS-ionilähteen kaasunsyöttölinjan toimintaperiaate	1
1.2	Työn lähtökohdat, rajaukset ja tavoitteet	1
2	LabVIEW	2
2.1	Ohjelmointiympäristö	2
2.2	LabVIEW-sovellusten rakenne	2
2.3	Tiedonsiirto tapoja	4
2.4	Reaaliaikaohjain	4
3	Tyhjiötekniikka	5
3.1	Tyhjiön määritelmä	5
3.2	Jäännöskaasu tyhjiön tilavuudessa ja seinämällä	6
3.3	Tyhjiöpumput	6
3.4	Vuodot	7
3.5	Heliumvuodonetsijä	8
4	Kaasunsyöttölinjan tarkempi kuvaus	9
5	Askelmoottoriohjattu injektioruisku	14
5.1	Injektioruiskun lineaariaskelmoottorin valinta	14
5.2	Injektioruiskun jäähdytysallas	15
6	Kaasulinjan reaaliaikajärjestelmä	17
6.1	CompactRIO	17
6.2	I/O-moduulit	17
6.2.1	Digitaalilähdöt	17
6.2.2	Digitaalitulot	18
6.2.3	Analogitulot	18
6.2.4	Askelmoottoriohjain	18
6.3	Jaetut muuttujat	18
6.3.1	Venttiilit, näyteputket ja paineilmasylinterit	19

6.3.2	Injektioruisku	20
6.3.3	Tyhjiöjärjestelmä	20
6.3.4	Järjestelmätason muuttajat	21
6.4	Yhteys tietokoneen ja ohjaimen välillä	21
7	LabVIEW-ohjelma	22
7.1	Vaatimukset	22
7.2	Toteutus	22
7.2.1	uiHandlerV3.vi	23
7.2.2	valveLoopV3.vi	24
7.3	Sekvenssit	25
7.4	Dokumentointi	26
8	Järjestelmän testaus	27
8.1	Vuotojen etsiminen kaasulinjasta	27
8.2	Näytteiden siirtäminen	29
8.3	Testeissä huomattuja puutteita ja muita huomioita	31
9	Ilmenneet ongelmat ja kehitysideat	32
9.1	Nestemäisen typen ohjaus	32
9.2	Injektioruisku	32
9.3	Turbopumpun ohjaimen hallinta	32
10	Yhteenveto	33
	Lähteet	34
	Liitteet	
	Liite 1. I/O-lista	
	Liite 2. PI-kaavio	
	Liite 3. Järjestelmän testauksen aikainen paineen vaihtelu kaasulinjassa	

Lyhenteitä ja käsitteitä

AMS	Accelerator mass spectrometry. Kiihdytinmassaspektrometri.
cRIO	CompactRIO. National Instrumentsin valmistama ohjelmoitava automaatio-ohjain.
FPGA	Field-programmable gate array, digitaalinen mikropiiri, jonka sisältämä logiikka voidaan ohjelmoida uudelleen.
FIFO	First-In, First-Out.
Jono	Abstrakti tietorakenne, jonka lisäys- ja poisto-operaatiot toimivat FIFO-periaatteella.
PI-kaavio	Prosessi ja instrumentointikaavio.
ppm	Parts per million. Kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin.
PXI	PCI eXtensions for Instrumentation
subVI	Aliohjelmana toimiva virtuaali-instrumentti.
SV	Shared variable. Jaettu muuttuja.
VI	Virtual-instrument. Virtuaali-instrumentti. Nimitys LabVIEW-sovellukselle.

1 Johdanto

Insinööriytyö on tehty Helsingin yliopiston fysiikan laitoksen kiihdytinlaboratoriossa vuoden 2012 syksyn ja vuoden 2013 kevään välisenä aikana, jolloin tämän insinööriytyön tekijä suoritti laboratoriossa tutkintoon kuuluvaa harjoittelua. Työ laboratoriossa liittyi AMS-ionilähteen kaasunsyöttölinjan automatisointiin.

1.1 AMS-ionilähteen kaasunsyöttölinjan toimintaperiaate

AMS-ionilähteen kaasunsyöttölinja on järjestelmä, jonka avulla hiilidioksidinäytteet siirretään AMS-ionilähteelle. Järjestelmä toimii myös hiilidioksidinäytteiden puskurivarastona. Järjestelmässä on näytteille 12 varastoputkea ja yksi injektioruisku, jonka avulla näyte injektoidaan lasikapillaariputken läpi ionilähteelle. Näyte asetetaan varastoputkeen tai injektioruiskuun nestetyypen avulla, tällöin hiilidioksidi härmistyy siirtokohteen kylmälle sisäpinnalle. Varastoputket on erotettu kaasunsyöttölinjasta kalvoventtiilien avulla. Lyhyesti sanottuna järjestelmän toimintaperiaate on, että ensin järjestelmän varastoputkiin siirretään hiilidioksidinäytteitä, jotka lopuksi siirretään yksi näyte kerrallaan injektioruiskuun, josta näyte injektoidaan vakiopaineella ionilähteelle. Järjestelmään kuuluu myös turbo- ja scroll-pumpusta koostuva tyhjiöjärjestelmä, jolla kaasulinjaan voidaan pumpata tyhjiö. Tyhjiöllä mahdollistetaan, että tiedetään tarkalleen, mitä kaasulinjassa ja varastoputkissa on. Lisäksi tyhjiö estää ilman sekoittumisen puhtaaseen näytteeseen.

1.2 Työn lähtökohdat, rajaukset ja tavoitteet

Tämä insinööriytyö on rajattu käsittelemään AMS-ionilähteen kaasunsyöttölinjan automatisoinnista järjestelmän testausta, LabVIEW-sovellusta ja järjestelmässä käytetyn injektioruiskun jäähdytystä sekä vakiopaineen muodostamista injektioruiskulla ja lineaariaskelmoottorilla.

Insinööriytyön tavoitteisiin kuului järjestelmään liittyvän PI-kaavion ja I/O-listan laatiminen, CompactRIO-ohjausyksikössä ajettavan LabVIEW-sovelluksen ensimmäisen version toteuttaminen ja injektioruiskulle sopivan lineaariaskelmoottorin valinta sekä injektioruis-

kun nestetyypen kestävä jähdytyskupin kehittäminen. Järjestelmän toiminnallisina tavoitteina on toteuttaa näytteensiirto varastoputkiin ja injektioruiskuun sekä näytteiden siirtämisen injektioruiskusta ionilähteelle. Injektioruiskusta näytteen siirtyminen ionilähteelle tulee tapahtua vakioaineella.

Työn alkaessa laboratorioissa kaasulinjan mekaaninen runko ja siihen kytkeytyvät paineilmakäyttöiset toimilaitteet olivat jo asennettu paikoilleen. Lisäksi valtaosa järjestelmässä käytettävistä antureista ja tyhjiöpumpuista oli hankittu.

2 LabVIEW

Kappale käsittelee lyhyesti LabVIEW'tä ohjelmointiympäristönä, sillä laadittujen sovel-lusohjelmien rakennetta ja työssä käytettyä reaaliaikaohjainta. Lisäksi on esitelty lyhyesti kaksi LabVIEW:ssä käytettävissä olevaa tiedonsiirto tapaa.

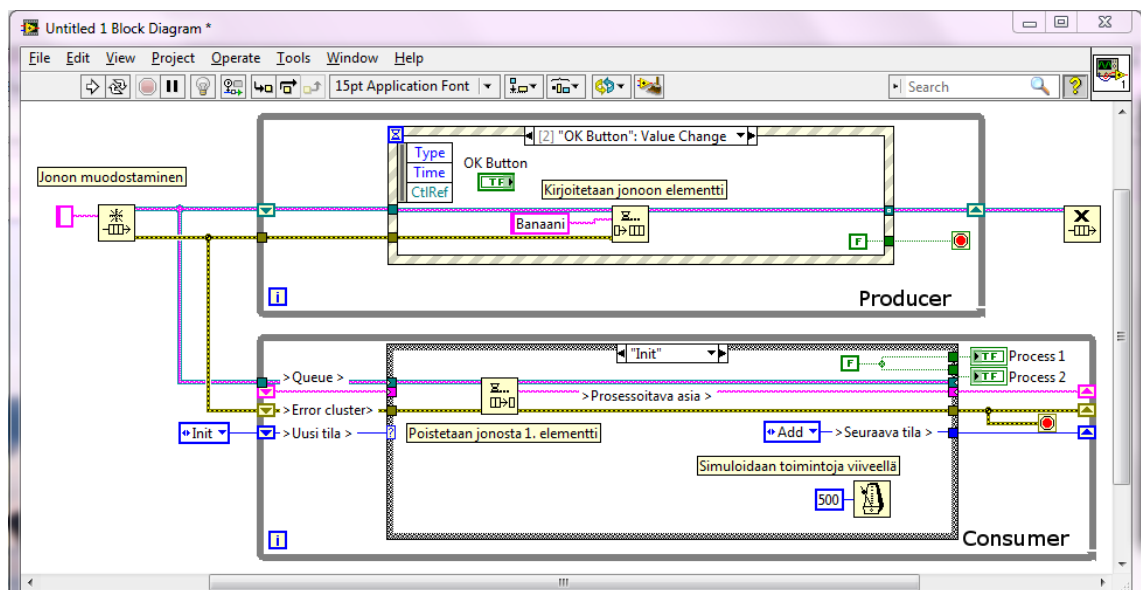
2.1 Ohjelmointiympäristö

LabVIEW on National Instrumentsin (NI) kehittämä graafinen ohjelmointiympäristö, jota käytetään paljon erilaisissa mittaus-, signaalinkäsittely- ja automaatio-sovellusten ohjel-moimiseen. Sovellukset ohjelmoidaan ympäristössä graafisella G-kieltä, joka on tieto-vuo-ohjelmointikieli. LabVIEW'n toimintoja voidaan laajentaa erilaisilla kirjastoilla ja mo-duuleilla, jotka yleensä ovat kaupallisia. Moduuleista esimerkkinä Realtime ja FPGA [2], ja kirjastoista OpenG [3].

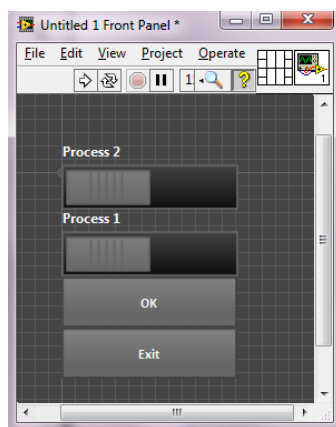
2.2 LabVIEW-sovellusten rakenne

LabVIEW'llä tehtyä sovellusta kutsutaan virtuaali-instrumentiksi, eli VI:ksi. Nimitys on lähtöisin ajatuksesta, että VI simuloisi oikeaa mitta- tai säätölaitetta [5, s. 2 - 2]. VI muo-dostuu käyttöliittymästä ja lohko-kaaviosta, johon varsinainen sovelluslogiikka laaditaan. Käyttöliittymä rakentuu pääasiassa kontrolleista ja indikaattoreista. Lohko-kaaviossa tar-vittavat kontrollit, indikaattori, aliohjelmat ja muut funktiot yhdistetään keskenään tiedon kulkua esittävillä datajohtimilla. [4]

Kuvissa 1 ja 2 on laadittuna yksinkertainen esimerkkiohjelma, jonka avulla VI:n rakennetta on helpompi havainnollistaa. Esimerkkiohjelmassa on kaksi eri nopeudella suoritettavaa silmukkaa, joista ylempi silmukka kirjoittaa jonoon merkkijonon, kun OK-nappia (Kuva 2) painetaan. Alempaan silmukkaan on toteutettu case-rakenteen avulla tilakone, jossa tilat kuvastavat eri toiminnallisuuksia, ja esimerkiksi esillä oleva tila, *init*, lukee josta elementin, kirjoittaa elementin arvon siirtorekisteriin ja määrittää seuraavaksi tilaksi *add*. Sovelluslogiikan toimintoja on kommentoitu vaaleankeltaisten laatikoiden sisällä olevalla tekstillä ja datajohtimien päällä olevilla kirjoituksilla.



Kuva 1. Esimerkkiohjelman sovelluslogiikka.



Kuva 2. Esimerkkiohjelman käyttöliittymä.

2.3 Tiedonsiirto tapoja

LabVIEW:ssä on useita protokollia tiedonsiirtoa varten. Näistä esimerkkinä jaetut muuttujat (engl. *shared variable*) ja verkkovirrat (engl. *network streams*)

Jaetulla muuttujat ovat verkon yli *shared variable engine* -ohjelmistokomponentin ja NI-PSP protokollan avulla julkistettua tietoa. Jaetuilla muuttujilla välitetään tavallisesti tietoa virtuaali-instrumenttien välillä, jotka voivat sijaita eri laitteilla. [6]

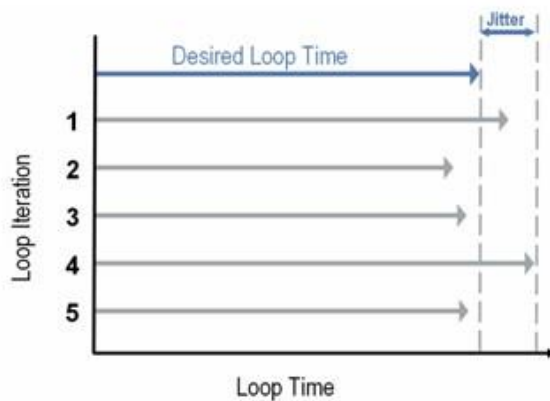
Verkkovirtaa käytettäessä yhteys luodaan kahden pisteen välille käyttäen *network stream reader*- ja *network stream writer* -funktioita. Luotu yhteys on yksisuuntainen. Verkkovirroissa käytetään puskuroitua häviötöntä lähetystekniikkaa. Tämä tiedonsiirto tapa on tehokas ja soveltuu esimerkiksi mittauksen suoratoistoon (engl. *streaming*) toiselle laitteelle. [7]

2.4 Reaaliaikaohjain

National Instrumentsin niin sanottuja reaaliaika-alustoja ovat PXI-järjestelmä ja CompactRIO. CompactRIO on uudelleenmääriteltävään I/O (RIO) FPGA -tekniikkaan perustuva ohjelmitava automaatio-ohjain. Järjestelmään kuuluu tavallisesti sulautettu reaaliaikainen ohjain, FPGA-piiri ja I/O-moduuleja. VI:t vaihtavat tietoja I/O-moduulien kanssa joko FPGA-ohjelman tai *scan engine* välityksellä. *Scan engine* mahdollistaa I/O-moduulien lähtöjen ja tulojen käsittelyn suoraan I/O-muuttujina poistaen tarpeen luoda erillinen moduulia hallinnoiva FPGA-sovellus. CompactRIO soveltuu käytettäväksi erilaisiin ohjaus-, mittaus- ja tiedonkeruusovelluksiin. Ohjelmointi voidaan suorittaa LabVIEW'n lisäksi C:llä, C++:lla tai javalla. [8; 9]

Reaaliaikajärjestelmissä päätavoite usein on mahdollistaa reaaliaikavaatimusten toteuttaminen eli siis sen varmistaminen, että järjestelmä kykenee suorittamaan kaiken tarpeellisen laskennan ja datan siirron tehtävien aikarajojen asettamissa puitteissa [11]. Kuvaajassa 1 on havainnollistettu tehtävän suoritusajan huojunta (engl. *jitter*). Kirjallisuudessa reaaliaika jaetaan vaatimusten perusteella kovaan ja pehmeään [10, s. 463; 11]. Puhutussa kielessä yleensä reaaliaikaisella prosessilla tarkoitetaan sen täyttävän kovan reaaliajan määritteet. Kovassa reaaliajassa tehtävän valmistuminen haluttujen aikarajojen ulkopuolella aiheuttaa aina kuolettavan virheen järjestelmän toiminnalle. Pehmeässä

reaaliaikaisuudessa prosessilla on myös aikaraja, jossa sen tulisi valmistua, mutta aikarajat eivät ole välttämättömiä ehtoja [10, s. 463]. Pehmeässä reaaliajassa aikarajoista poikkeaminen aiheuttaa tehtävän valmistumisen myöhässä tai hitaammin. Pehmeästä reaaliajasta esimerkkinä on tavallinen kotitietokone ja kovasta reaaliajasta askelmoottorihjain. LabVIEW:ssä on reaaliaikaisia ominaisuuksia sisältäviä ajastettuja rakenteita, joista esimerkkinä *timed loop*, joka on ominaisuuksiltaan samankaltainen kuin while-silmukka, mutta sille voidaan parametroida sen käyttämä suoritin, prioriteetti, aikarajat ja määrittää toistojakso (engl. *period*) [12].



Kuvaaja 1. Tehtävän suoritusajan huojunta (engl. *jitter*). [13]

3 Tyhjiötekniikka

Kappaleessa on esitelty insinööriyössä käytettyjä tyhjiöön liittyviä termejä ja suureita.

3.1 Tyhjiön määritelmä

Absoluuttisella tyhjiöllä tarkoitetaan fysiikassa tilavuutta, jossa ei ole ainetta. Käytännön sovellusten kannalta tyhjiö on tilavuus, jossa on sovelluksen toiminnan kannalta tarpeeksi vähän kaasuja. Tyhjiötilavuudessa olevia kaasuja poistetaan erilaisten tyhjiöpumppujen avulla. Pumpkauksesta tyhjiökammioon jäljelle jäävää kaasuosaa kutsutaan jäännöskaasuksi, josta osa sijaitsee tyhjiökammion tilavuudessa ja osa seinämissä. Jäännöskaasu koostuu useista eri kaasuista, jolloin pätee Daltonin osapainelaki:

$$P = \sum p_i, \quad (1)$$

jossa P on tyhjiön kokonaispaine ja p_i on kunkin kaasun osapaine [14, s. 18]. [14, s. 15-16.]

3.2 Jäännöskaasu tyhjiön tilavuudessa ja seinämällä

Tyhjiökammion seinämät ovat atomien mittaluokassa epätasaiset, joten kammion pintoja peittää vaihtelevan paksuinen kerros molekyylejä. Kaasut takertuvat seiniin yhteen kerrokseen, kun taas höyryt pystyvät tiivistymään useaan kerrokseen. Jäännöskaasun poistaminen tyhjiöstä vaikeutuu aina sen mukaan, miten pieneksi jäännösosan halutaan jättävän. Jäännöskaasun määrä tyhjiön tilavuudessa vähenee niin kauan kuin irtoavia molekyylejä riittää seinämällä. Molekyylien irtoamista kammion seinistä voidaan nopeuttaa lämmittämällä seiniä. Tyhjiöt luokitellaan jäännöskaasun määrän mukaan eri alueisiin (ks. Taulukko 1).[14, s.16 – 17.]

Tyhjiöalue	Paine [Pa]	Paine [mbar]
Karkeatyhjiö	$10^5 - 10^2$	$10^3 - 1$
Välityhjiö	$10^2 - 10^{-1}$	$10^0 - 10^{-3}$
Suurtyhjiö	$10^{-1} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-6}$
Hyvä suurtyhjiö	$10^{-4} - 10^{-7}$	$10^{-6} - 10^{-9}$
Ultratyhjiö	$10^{-7} - 10^{-10}$	$10^{-9} - 10^{-12}$
Hyvä ultratyhjiö	$10^{-10} -$	$10^{-12} -$

Taulukko 1. Tyhjiöalueet [14, s.20.]

3.3 Tyhjiöpumput

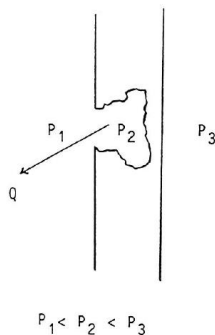
Tyhjiötilavuudesta poistetaan kaasuja ja jossain määrin höyryjä tyhjiöpumpuilla. Kuten on lukuisia eritasoisia tyhjiöalueita, on myös lukuisia tyhjiöpumpumalleja. Tyhjiöpumput jaotellaan tavallisesti pumppausalueen ja pumppausmekanismin fysikaalisen ilmiön perusteella. [14, s. 106.]

Suurtyhjiöalueelle (Taulukko 1) tai parempaan tyhjiöön pumppaavat pumput eivät yleensä kykene pumppaamaan ilmakehän painetta vastaan. Varsinaisten tyhjiöpumppujen yhteydessä käytetään esityhjiöpumppua laskemaan paine riittävän alas, jotta varsi-

nainen tyhjiöpumppu voidaan käynnistää. Esityhjiöpumpun päämääräinen tehtävä on pitää varsinaisen tyhjiöpumpun ulostulo välityhjiön (Taulukko 1) alueella. Esityhjiöpumpusta esimerkkinä scroll-pumppu, ja varsinaisesta tyhjiöpumpusta esimerkkinä turbopumppu. Turbopumpulla on kirjallisuuden mukaan mahdollista saavuttaa maksimissaan ultratyyhjiön (Taulukko 1) alue. [14, s. 106 - 107, s.120; 15, s.5.]

3.4 Vuodot

Vuodon aiheuttaja voi olla naarmu, pieni reikä tai roska liitoksessa. Lisäksi tyhjiössä voi esiintyä valevuotoja. Käytännössä jokaisella tyhjiöllä on taipumus vuotaa. Mitä tiiviimäksi tyhjiöjärjestelmä on onnistuttu tekemään, sitä vaativampaa on tiiviiden lisääminen. Kirjallisuudessa vuodon yksiköksi on määritetty *mbar l/s*. Vuotoja voidaan paikallistaa tyhjiöstä esimerkiksi heliumvuodonetsijällä. Suurien vuotojen tapauksissa paine ei laske, vaikka käytettäisiin suuriakin pumppuja. [14, s. 17, s. 235, s.247.]



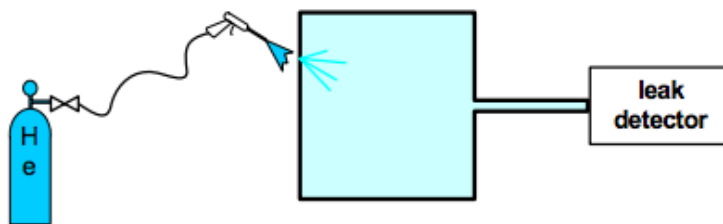
Kuva 3. Valevuoto. P1 on tyhjiökammion paine, P2 on kaviteetin paine, P3 on ulkoilman paine ja Q on kaviteetista vuotava kaasu. [14, s. 237.]

Valevuoto (Kuva 3) esiintyy tyhjiökammioissa, joissa on kaviteetti, joka on yhteydessä kammion tilavuuteen mutta ei ulkoilmaan. Kaviteetti on voinut syntyä esimerkiksi valmistuksen yhteydessä. Kun tyhjiökammioon imetään tyhjiö, jää kaviteetin paine tyhjiökammiota korkeammaksi. Kaviteetin ja tyhjiökammion yhdistävän kanavan virtausvastuksen vuoksi kaviteetin paine purkautuu hitaasti tyhjiökammioon nostaen tyhjiökammion painetta. [14, s. 236.]

3.5 Heliumvuodonetsijä

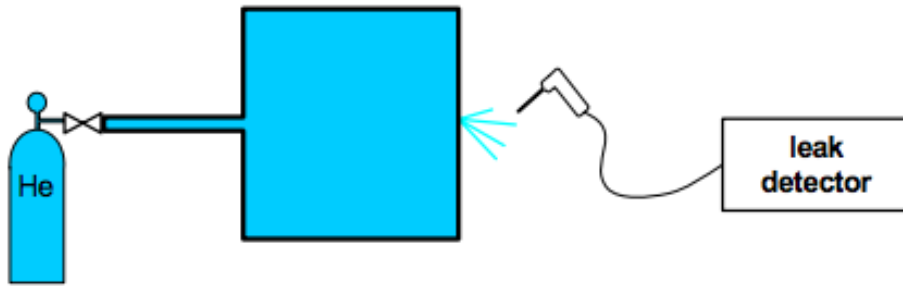
Heliumvuodonetsijä sisältää massaspektrometrin ja oman tyhjiöjärjestelmän, joka koostuu esimerkiksi esityhjiö- ja turbopumpusta. Vuodonetsijän massaspektrometri pystyy määrittämään tarkasti testattavasta tilavuudesta johdetun kaasun heliumpitoisuuden. Massaspektrometrin paineen on oltava riittävän alhainen, jotta näytekaasu voidaan analysoida. Kirjallisuudessa on kerrottu, että massaspektrometrin paineen on oltava alhaisempi kuin 10^{-4} mbar tai todennäköisyys ionien yhteentörmäykseen jonkin muun atomin kanssa on liian suuri [14, s. 240]. Massaspektrometriin saadaan toiminnan kannalta tarpeeksi matala paine heliumvuodonetsijän omalla tyhjiöjärjestelmällä ja kuristusventtiiliä käyttämällä. [14, s. 240 – 247.]

Helium soveltuu hyvin vuotojen etsintään, koska huoneilmassa sen pitoisuus on pieni (4,5 ppm), se on helposti erotettavissa muista kaasuista ja sillä on suuri diffuusionopeus. Lisäksi helium on inertti kaasu, eli se on lähes kaikissa olosuhteissa reagoimaton. Heliumvuodonetsijän käyttötavoista esimerkkeinä ovat tyhjiöttestaus- ja haistelumenetelmä. [14, s. 240 - 248.]



Kuva 4. Yksinkertaistettu kuva tyhjiöttestausmenetelmästä. Testattavan järjestelmän saumojia suihkutetaan heliumilla ja testattavaan järjestelmään liitetty heliumvuodonetsijä (kuvassa leak detector) havainnoi mahdolliset vuodot. [16, Fig.3]

Tyhjiöttestausmenetelmässä heliumvuodonetsijä on liitetty yleensä venttiilin välityksellä testattavaan tyhjiöjärjestelmään. Testauksen alussa testattavaan järjestelmään pumpataan tyhjiö, kun järjestelmän paine on riittävän matala, liitetään heliumvuodonetsijä osaksi järjestelmää. Tyhjiöttestausmenetelmässä heliumia suihkutetaan kuvan 4 mukaisesti testattavan järjestelmän saumoihin. Vuotojen seurauksena heliumia päätyy tyhjiöjärjestelmään ja heliumvuodonetsijä havaitsee sen. Menetelmällä pystytään paikallistamaan vuotojen sijainnit tarkasti. [14, s. 241 – 247.]



Kuva 5. Haistelumentelmä. Testattava järjestelmä paineistetaan Heliumilla. Järjestelmästä havainnoidaan mahdollisia vuotoja heliumvuodonetsijällä (kuvassa leak detector) . [16, Fig.4]

Haistelumenetelmässä (Kuva 5) testattava järjestelmä paineistetaan heliumilla, ja heliumvuodonetsijään kytketyllä niin sanotulla haisteluuletkulla haistellaan testattavan järjestelmän saumakohtia. Haistelu on tehtävä hitaasti, jotta mahdollisimman suuri osa vuotavasta kaasusta saadaan ilmaistua. Tällä menetelmällä saadaan vain noin tuhannesosa vuodosta heliumvuodonetsijään. [14, s. 247 – 248.]

4 Kaasunsyöttölinjan tarkempi kuvaus

Liitteessä 2 on esitetty järjestelmän PI-kaavio, jossa on käytetty standardin PSK 3601 mukaisia piirtomerkkejä. Järjestelmän I/O-lista on esitetty liitteessä 1.

Kaasunsyöttölinjaksi kutsuttu järjestelmän sisältää 12 varastoputkea ja yhden askelmoottori ohjatun injektioruiskun. Järjestelmän päätarkoitus on syöttää näyte ionilähteelle vakioaineella. Järjestelmässä olevat varastoputket mahdollistavat näytteiden syötön puskuroinnin. Varastoputkista on tarkoitus siirtää yksi näyte kerrallaan injektioruiskuun, josta näyte injektoidaan ionilähteelle. Injektioruisku on yhdistetty ionilähteeseen lasikapilaariputkella. Varastoputket on erotettu kaasulinjasta Rotarex Groupin SELFA M4S1-V -kalvoventtiileillä (Liitteessä 2, DV301-DV312).

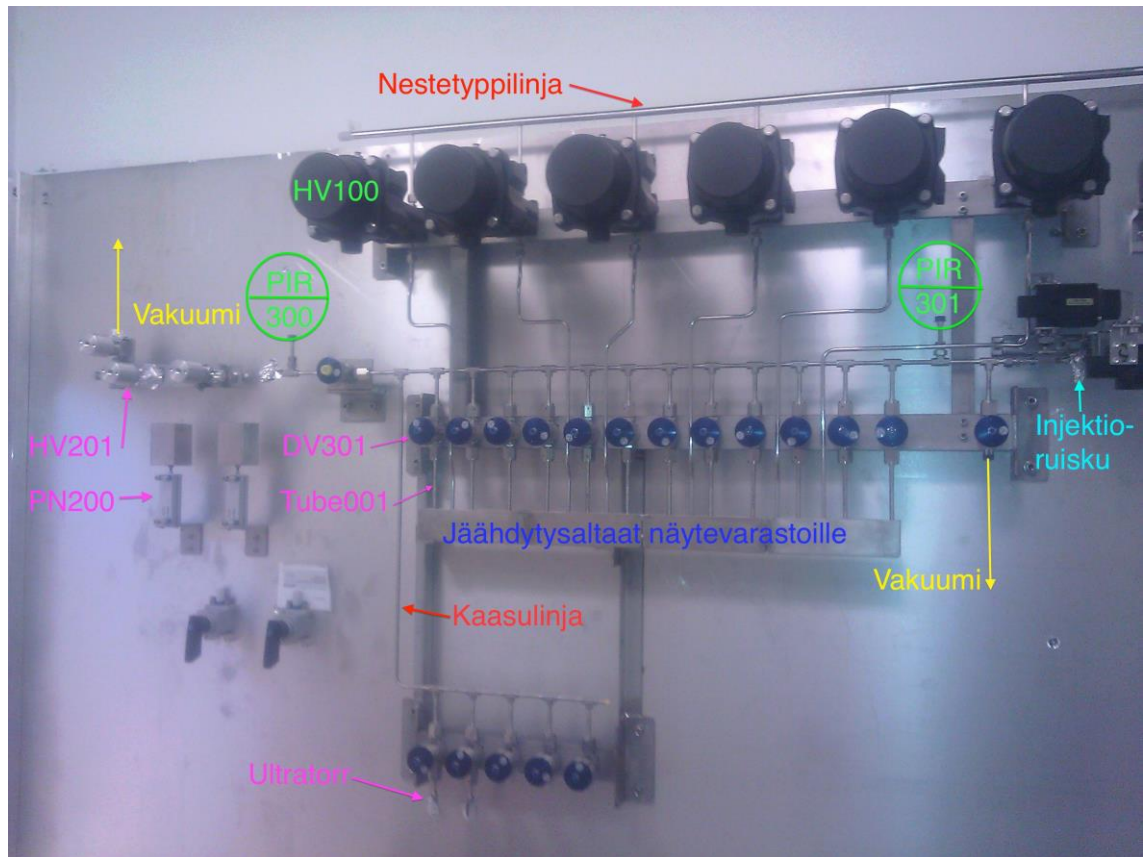
Järjestelmän osana on myös tyhjiöjärjestelmä, jota käytetään jäännöskaasujen poistamiseen järjestelmästä. Tyhjiöjärjestelmän esityhjiöpumppuna on Edwardsin XDS-sarjan scroll-pumppu ja varsinaisena tyhjiöpumppuna Edwards EXT75DX -turbopumppu.

Kuvassa 6 on järjestelmä työn alkuvaiheilta, jolloin järjestelmään kuului rosterirunko sekä paineilmahajattavat venttiilit ja sylinterit. Hiilidioksidinäyte syötetään kaasulinjaan joko

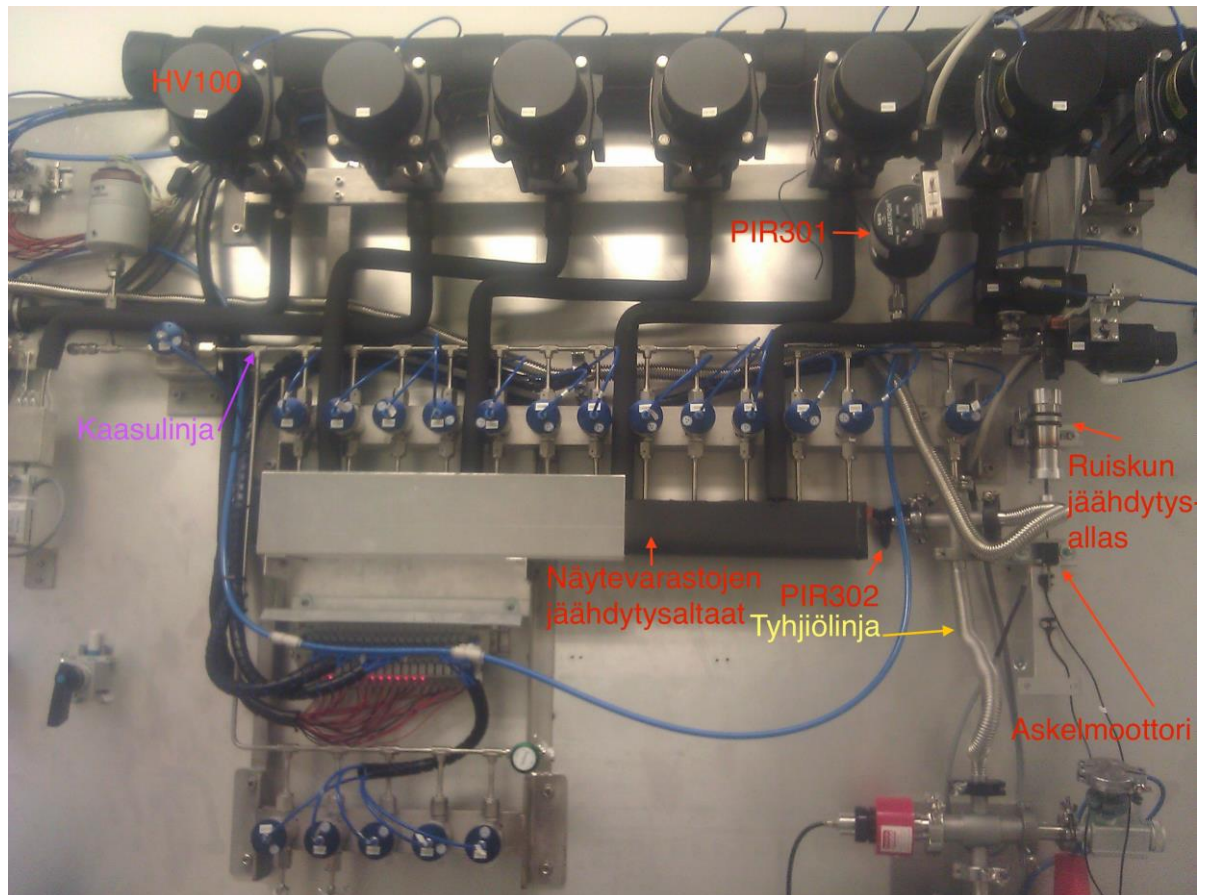
ultratorr-liittimeen (Liitessä 2, DV314 - DV316) liitettävän varastoputken (Kuva 8) kautta tai paljeputken kautta rikottavalla ampullilla (Liitessä 2, DV317 ja DV318). Suoraan kaasulinjaan siirrettävien näytteiden tulee olla niin sanotusti puhtaita, eli niissä on oltava vain hiilidioksidia. Myöhemmissä kehitysversioissa järjestelmän pitäisi pystyä ottamaan vastaan näyte myös venttiilin HV201 (Liite 2) kautta, jolloin syötettävästä näytteestä poistettaisiin kosteus kylmäasormella (Liite 2) ja tarpeettomat kaasukomponentit kvartsilasiputken (Liite 2) avulla.

Kun siirretään näytteitä, siirron alkuvaiheessa kaasulinjaan ja siirron lähteeseen sekä kohteeseen pumpataan tyhjiö eli ne vakumoidaan. Lähteen vakumoinnilla tarkoitetaan, että pumpataan tyhjiö näytteessä olevan venttiilin ja kaasulinjan välinen alue (Kuva 8). Hiilidioksidinäyte siirretään alipaineen avulla kaasulinjaan ja lopuksi hiilidioksidinäyte si-
joitetaan nestetyypen avulla kohteeseen. Nestetyppi annostellaan varastoputken tai injektoruiskun jäähdytysaltaaseen, jolloin kohteen seinämän lämpötila laskee erittäin kylmäksi. Typen kiehumispiste on $-195,8\text{ °C}$ [1, s. 79] ja hiilidioksidin sublimoitumispiste on $-78,5\text{ °C}$ [1, s. 79], joten hiilidioksidi härmistyy kylmään pintaan. Lopuksi kohteeseen menevä venttiili suljetaan ja siirto on valmis.

Järjestelmän nestetyypilinja on päällystetty kaksinkertaisella armaflex-solukumieristeellä ja venttiileistä HV100 - HV106 lähtevät ohuimmat putket yksinkertaisella armaflex-solukumieristeellä. Jäähdytysaltaat ruiskun allasta lukuun ottamatta on päällystetty yksinkertaisella armaflex-solukumieristeellä. Solukumi eristeet näkyvät kuvassa 7.



Kuva 6. Kuvassa on järjestelmä työn alkuvaiheilta.



Kuva 7. Kuvassa on järjestelmä työn loppuvaiheita.



Kuva 8. Kaasulinjaan vietävä näyte kiinnitetty ultratorr-liittimeen venttiilissä DV314 (Liite 2, PI-kaavio).

5 Askelmoottoriohjattu injektioruisku

Järjestelmässä käytetään Hamilton Gastight 1001 -injektioruiskua siirtämään näyte lasikapilaariputken läpi AMS-ionilähteelle. Injektioruiskun tilavuus on 1 ml, jolloin männän poikkeutusliikkeen pituus on noin 60 mm. Injektioruiskun mäntää liikuttamaan valittiin lopulta Haydon kerk 21F4U-2.5 -askelmoottori. Valinnassa vaatimuksena oli, että männän liikuttaja pystyisi liikuttamaan mäntää 60 mm ja paineensäätöpiiri olisi sen avulla helposti toteutettavissa.

5.1 Injektioruiskun lineaariaskelmoottorin valinta

Kun työtä aloitettiin vaihtoehtona männän liikuttajaksi oli SMC:n LES-sarjan askelmoottoripöytä. Nopeasti kävi kuitenkin ilmi, että laite ei sovellu käytettäväksi järjestelmässä. LES-sarjan askelmoottoripöydässä pystyi liikuttamaan pöytää erittäin tarkasti kahden pisteen välillä, mutta jos työntö olisi haluttu suorittaa jollain tietyllä voimalla, olisi voiman tarkkuus ollut $\pm 20\%$ maksimi voimasta [17, s. 11], jolloin epätarkkuus olisi suurempi kuin tarvittava voima.

Tarkastelussa oli myös eri valmistajien ruiskupumppuja. Ruiskupumpulla voidaan toteuttaa injektioruiskun ruiskutus automatisoidusti, ohjelmoimalla tai parametroimalla tavoiteltu ruiskutusprofiili, joka voi olla esimerkiksi vakiopaine. Ruiskupumpuista esimerkkinä Harvard Apparatus'in PHD Ultra. Ruiskupumppujen ominaisuudet sopivat paremmin kliiniseen käyttöön ja nesteiden injektioimiseen. Lisäksi injektioruiskulle olisi vaikeaa rakentaa jäähdytystä, kun se on hyvin kiinnitettynä ruiskupumppuun. Myös ruiskupumppujen hinnat olivat tarjouspyyntöjen perusteella miltei kymmenkertaiset muihin vaihtoehtoihin verrattuna. [18]

Tarkastelujen puolivälissä ehdolle nousi lopulliseksi valinnaksi jäänyt Haydon kerk 21F4U-2.5 -lineaariaskelmoottori (Kuva 9), jossa yksi askel vastaa 0,0015 mm lineaarista liikettä. Lisäksi moottorin ohjaus on helposti suoritettavissa National Instrumentsin NI 9501-moduulilla.



Kuva 9. Haydon kerk 21F4U-2.5 -lineaariaskelmoottori. [19]

5.2 Injektioruiskun jäähditysallas

Injektioruiskun ympärille piti rakentaa jäähditysallas, jotta ruiskuun oli mahdollista siirtää näytteitä nestetyypen avustuksella. Altaan suunnittelussa otettiin huomioon jäähdytyksen aiheuttama lämpölaajeneminen. Taulukossa 2 on listattu eri aineiden lämpölaajenemiskertoimia. Allas rakennettiin yliopiston fysiikan laitoksen verstaalla.

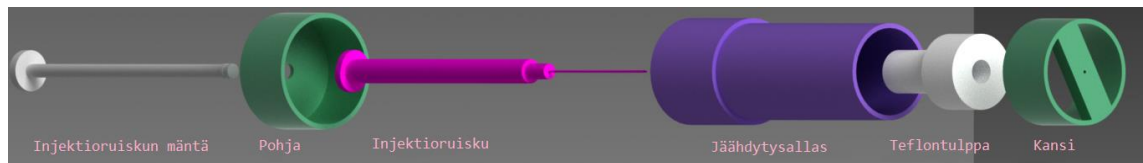
Lämpölaajeneminen voidaan laskea kaavalla [1, s.120]:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0, \quad (2)$$

L on pituus

α on lineaarinen lämpölaajenemiskerroin

T on lämpötila.



Kuva 10. 3D mallinnettu räjäytyskuva jäähditysaltaasta.

Altaan rungon muodostaa kaksi ruostumatonta teräsputkea, jotka ovat hitsattu toisiinsa kiinni välilevyn kanssa. Välilevyn on tarkoitus luoda altaaseen välipohja, jonka yläpuolelle nestetyypen pinta jää. Välilevyn keskelle on porattu myös reikä injektioruiskulle. Kuvassa 11 allas on esitetty ulkoapäin asennettuna seinään ja kuvassa 10 on altaan 3D-mallinnettu räjäytyskuva.



Kuva 11. Injektioruiskun jäähdytysallas.

Altaan yläpuolella on ruostumattomasta teräksestä työstetty avoin kansi, joka ensisijainen tarkoitus on tukea injektioruiskun pystysuoraa asentoa. Myös altaan alaosaan on työstetty pohja ruostumattomasta teräksestä, jossa on reikä ruiskun kammelle. Alaosan kannen ensisijainen funktio on esteettinen.

Jäähdytysaltaan kohdalla keskeinen ongelma oli injektioruiskun ja välilevyn saumakohta, koska lasin lämpölaajeneminen suhteessa ruostumattomaan teräkseen on hyvin pientä (Taulukko 2). Lämpölaajenemisen seurauksena olisi injektioruisku todennäköisesti rikoontunut, jos välilevy ja injektioruisku olisivat suorassa kontaktissa. Saumakohtaan mietittiin esimerkiksi erilaisia massavaahoja, mutta niiden tuotetiedoissa ilmoitetut käyttölämpötilat eivät soveltuneet nestemäisen typen lämpötiloihin. Fysiikan laitoksen vertaamalla ehdotettiin kokeiltavaksi teflonista työstettyä tulppaa (Kuva 11) injektioruiskun ympärille. Työstetty tulppa myös eristää nestetypen välilevyn yläpuolelle.

Aine	Lämpölaajenemiskerroin [10^{-6} K^{-1}]
Teflon (PTFE)	60...100
Borosilikaattilasi	Noin 3
Ruostumaton teräs	Noin 17

Taulukko 2. Eri aineiden lämpölaajenemiskertoimia [1, s. 77.]

6 Kaasulinjan reaaliaikajärjestelmä

6.1 CompactRIO

Työssä käytettäväksi valittiin cRIO-9074 -ohjain. Valinnan perustana on ohjaimen laajennettavuus tulevaisuudessa sekä se on yhteensopiva laboratorion muun laitekannan kanssa. Ohjaimessa on 400MHz reaaliaikaproessori, FPGA-piiri ja ohjaimen runkoon voi liittää kahdeksan I/O-moduulia. Ohjaimessa moduuleina käytettiin kahta digitaalista ulostulo- (NI9476), yhtä digitaalista sisääntulo- (NI9425), yhtä analogista sisääntulo- (NI9215) ja yhtä askelmoottorin ohjainmoduulia (NI9501). Moduulien NI9476, NI9425 ja NI9215 ohjaus suoritettiin *scan engine*’tä käyttäen, ja moduulin NI9501 ohjauksesta huolehtii erillinen FPGA-ohjelma kautta. Turbopumpun ohjaimen hallinta suoritetaan käyttämällä RS232-yhteyttä.

6.2 I/O-moduulit

I/O-moduuleihin liitettyjen laitteiden yksityiskohtaisempi erittely on I/O-listassa liitteessä 1.

6.2.1 Digitaalilähdöt

NI9476:n digitaalilähdöillä ohjataan solenoidiventtiilejä, ja annetaan käynnistys- ja pysäytyspulssi esityhjiöpumpulle. Yhdessä moduulissa on 32 kappaletta 24 voltin digitaalilähdettä. Yhteensä ulostuloon voi liittää 250 mA kuorman [25].

6.2.2 Digitaalitulot

NI9425 moduulissa on 32 kappaletta 24 voltin digitaalituloa. Digitaalituloihin on kytketty askelmoottorin, paineilmasylinterien ja esityhjiöpumpun ilmausventtiilin rajakytkimet sekä esityhjiöpumpun käyntitieto.

6.2.3 Analogitulot

Moduulin NI9215 mitta-alue on ± 10 voltia ja moduulin analogi-digitaalimuunnin on 16 bittinen. [20]

NI9215:n jännitemittaukset on skaalattu suoraan I/O-muuttujassa datalehtien ilmoittamien arvojen mukaisesti. PIR300:lle on ilmoitettu alueeksi $5 \cdot 10^{-1}$ - 1000 torr [21, s. 36], PIR301:lle $5 \cdot 10^{-4}$ - 1 torr [22, s. 20] ja paine-antureille PIR302 sekä PIR303 0 - 689,5kPa [23]. Tyhjiömittareiden mittaukset on skaalattu millibaareiksi ja muiden paineanturien baareiksi.

6.2.4 Askelmoottoriohjain

Moduuli NI9501 on tarkoitettu bipolaaristen askelmoottorien ohjaamiseen [26]. Moduulin ohjausta varten tarvitsee luoda FPGA-sovellus.

6.3 Jaetut muuttujat

CompactRIOlla olevien jaettujen muuttujien verkko-osoiteen alku on muotoa `\|cRIO-Carbondioxide|Variables|`. Muuttujat jakautuvat hakemistoihin *Cylinders*, *Motors*, *Syringe*, *System*, *Tubes*, *Vacuum_system* ja *Valves*, ja näiden hakemistojen alle vielä kokonaisuuksia muodostaviin hakemistoihin. Testikäyttöliittymän sisältävällä tietokoneella on kopiot jaetuista muuttujista ja tiedot synkronoidaan niihin

compactRIO:sta. Muuttujien arvot tietokoneelta tallennetaan tietokantaan *Dataloggin and Supervisory Control* (DSC) -moduulia käyttämällä.

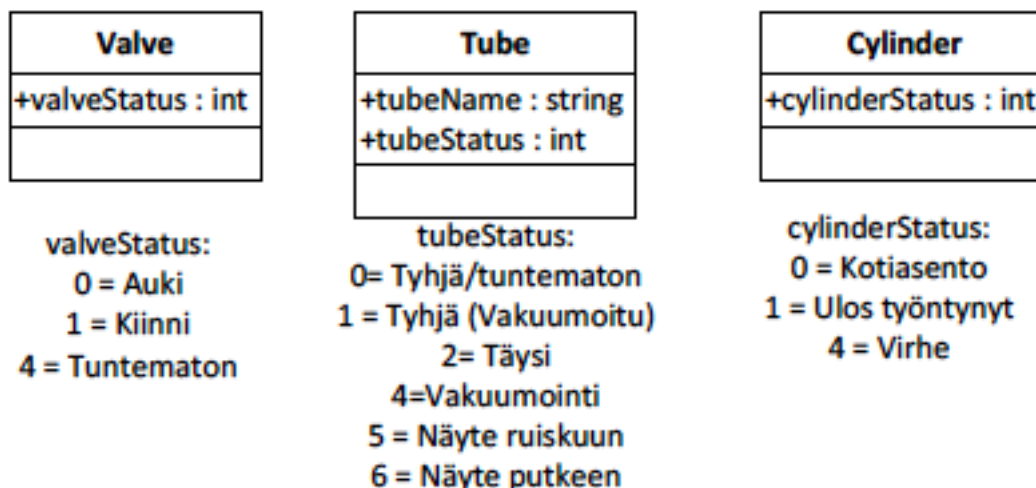
6.3.1 Venttiilit, näyteputket ja paineilmasylinterit

Venttiilien, varastoputkien ja paineilmasylinterien tilamuuttujien osoite muodostetaan taulukon 3 mukaisesti sijoittamalla kohteen nimeksi I/O-listassa (Liite 1) ja PI-kaaviossa (Liite 2) käytettyä nimeä.

Kohde	Osoitteen alkuosa	Kohteen nimi	Muuttuja
Venttiilit	\\cRIO-Carbondioxide\Variables\Valves\		\valveStatus
Varastoputket	\\cRIO-Carbondioxide\Variables\Tubes\		\tubeStatus
Varastoputket	\\cRIO-Carbondioxide\Variables\Tubes\		\tubeName
Paineilmasylinterit	\\cRIO-Carbondioxide\Variables\Cylinders\		\cylinderStatus

Taulukko 3. Venttiilien, varastoputkien ja paineilmasylinterin muuttujien hakemistopolkujen muodostuminen. Kohteen nimeksi tulee sijoittaa PI-kaaviossa (Liite 2) käytetty nimi.

Kaaviossa 1 on esitetty venttiilien (valve), varastoputkien (tube) ja paineilmasylinterien (cylinder) muuttujien tietotyypit ja mahdolliset arvot. Muuttujaan *tubeName* voidaan asettaa varastoputkessa olevan näytteen nimi. Muuttujat joiden nimet ovat status-loppuisia, ovat tilamuuttujia.



Kaavio 1. Venttiilien (*valve*), varastoputkien (*tube*) ja paineilmasylinterien (*cylinder*) muuttujien tietotyypit ja niiden mahdolliset arvot.

6.3.2 Injektioruisku

Injektioruiskun muuttujat sijaitsevat hakemistossa `\\cRIO-Carbondioxide\Variables\Syringe`. Muuttujassa *Setpoint* on painesäätöpiirin asetusarvo ja sen alustettu arvo on 3 (baaria). Muuttujaan *syringeName* voidaan kirjoittaa injektioruiskussa olevan näytteen nimi. Muuttujaan *syringeStatus* on kirjoitettu kokonaislukuna ruiskun tilan.

SyringeStatus'in tila voi olla tuntematon (lukuarvo on 0), injektioruisku on tyhjä ja on pumpattu tyhjiöön (lukuarvo on 1), näytteen siirto ionilähteelle käynnissä (lukuarvo on 2) ja varattu (lukuarvo on 3)

6.3.3 Tyhjiöjärjestelmä

Tyhjiöjärjestelmän muuttujat ovat hakemistossa `\\cRIO-Carbondioxide\Variables\Vacuum_system`. Esityhjiöpumpun muuttujat on alihakemistossa *fv_pump* ja muuttujalla *pumpReadStatus* välitetään tieto pumpun tilasta. Alihakemistoon *ticDriver* on sijoitettu turbopumpun ohjaimelta saatavat tiedot. Turbopumpun muuttujien kuvaukset on kopioitu suoraan ohjaimen LabVIEW-ajurien tiedoista [24]. Tärkeimpinä muuttujina *turboState* ja *turboStatus*. State-muuttuja välittää tiedon pumpun tilasta ja status-muuttujassa kerrotaan mahdollisesta virhetilasta.

6.3.4 Järjestelmätason muuttujat

Järjestelmän tilaa kuvaavat muuttujat ovat hakemistossa `\\cRIO-Carbondioxide\ Variables\ Vacuum\System`. Muuttuja `DvPipelineStatus` kuvaa kaasulinjan tilaa ja `dvPipelineSource` ilmoittaa kaasulinjan sisällön lähteen. Kaasulinjalla tarkoitetaan rosteriputkea, johon venttiilit DV300-DV318 (Liite 2) on kytketty. Muuttuja `ColdFingerStatus` ilmaisee kylmäormen tilan, ja `systemState` ilmoittaa, onko järjestelmä pysäytetty (arvo on 0), automaatti- (arvo on 2), manuaali- (arvo on 3) vai virhetilassa (arvo on -1). Muuttuja `pneumaticsOK` ilmaisee, että paineilman käyttöpaine on järjestelmän toiminnan kannalta miellyttävä. Hakemistossa `Loops` olevat muuttujat välittävät tiedon siitä, onko muuttujan niminen rakenne normaalissa suorituksessa. Muuttujaa `abortLoops` käytetään keskeyttämään ohjelman rakenteita, kun käyttöliittymältä tulee järjestelmän sammutuspyyntö.

6.4 Yhteys tietokoneen ja ohjaimen välillä

CompactRIO on kytketty laboratorion niin sanottuun ohjausverkkoon ip-osoitteella `10.2.0.20` ja ohjaimelle on annettu nimi `cRIO-Carbondioxide`. Käyttöliittymältä annettujen käskyjen lähettämiseen ohjaimelle käytetään `network stream` -funktioita ja tieto välitetään tietueen `uiFifoCluster.ctl` (Taulukko 4) määrittelemällä tavalla.

Jäsen	Tietotyyppi	Kuvaus
Valve/seq	valve_seq_enum.ctl	Manipuloitava asia/ Lähtö sekvensseissä
set Valve	int/lueteltu tyyppi	0 on N/A, 1 on Avaa ja 2 on Sulje
Sample to	int/lueteltu tyyppi	Listattu varastoputket ja ruisku
Stepper	int/lueteltu tyyppi	0 on N/A, 1 on käsikäyttö ja 2 on Automaatti
Target	Target.ctl	Määrittää mille rakenteelle pyyntö ohjataan
Time(s)	double	Sulkemisviive jos venttiilin aukaisupyyntö

Taulukko 4. Tietueen `uififoCluster.ctl` kuvaus.

Tietueen `uiFifoCluster.ctl` jäsenellä `Set valve` määritetään toimilaitteelle uusi tila. `Set valve`'n arvo pitää olla `Open` (lukuarvo 1), jos järjestelmän tilaa vaihdetaan tai suoritetaan sekvenssi. Jäsen `Sample to` määrittelee mihin näyteputkeen näyte sijoitetaan. Jäsen `Valve/seq` määrittää ohjattavan toimilaitteen, sekvenssin tai putken, josta näyte siirretään uuteen paikkaan. `Target`-jäsenellä määritetään käskysilmukka, johon pyyntö ohjataan. Askelmoottorin tilaan liittyvät pyynnöt on ohjattava kohteelle `StepperLoop` ja muiden toimilaitteiden suorat ohjaukset `ValveLoop`'iin. Näyteputkien tyhjiön pumppauspyynnöt on

ohjattava kohteeseen VacuumLoop ja näytteiden siirtopyyntöjen kohde on *SampleToTube*.

7 LabVIEW-ohjelma

7.1 Vaatimukset

Käyttäjälle näkyviä toiminnallisiksi vaatimuksiksi on koostettu seuraavat:

- Näytteen siirto putkesta putkeen tai putkesta ruiskuun
- Näytteen injektointi vakiopaineella
- Yksittäisen alueen tyhjiöön pumppaus
- Automaatti- ja käsikäyttö
- Käsikäytöllä venttiilien ohjaus
- Tyhjiöjärjestelmän ohjaus.

Esimerkkinä yksittäisestä alueesta ovat kaasulinja ja näyteputki.

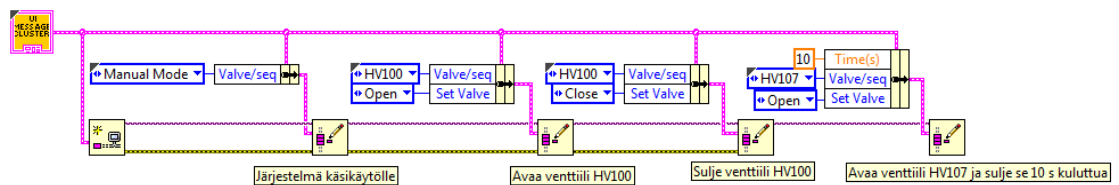
Käyttäjälle näkymättömiä vaatimuksina olivat turbopumpun suojaaminen liialta räsitukselta. Muina määreinä esille nousi lähdekoodin hyvä luettavuus, ohjelman vakaus ja dokumentointi.

7.2 Toteutus

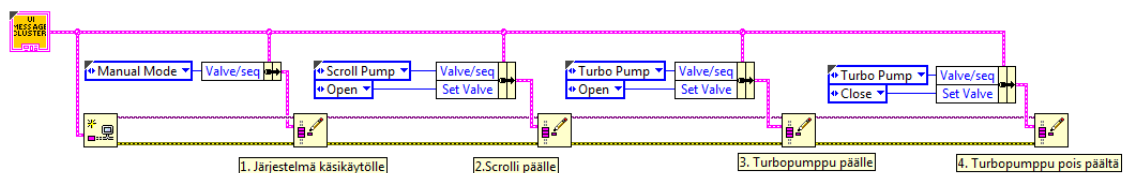
Ohjelma CompactRIOlla jakaantuu *valveLoopV3.vi*hin ja *uiHandlerV3.vi*hin. *UiHandlerV3.vi* toimii rajapintana käyttöliittymän ja *valveLoopV3:n* välillä. *ValveLoopV3.vi* sisältää ohjaukseen liittyvät toiminnallisuudet.

7.2.1 uiHandlerV3.vi

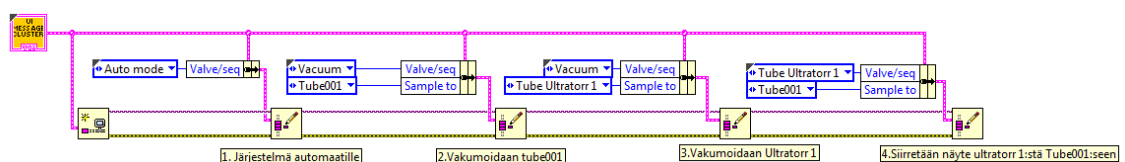
VI luo *network stream reader*'in ja vastaanottaa lukijan(engl. *reader*) välityksellä käskyjä käyttöliittymältä. Yhteyden katkettua uuden yhteyden luominen on mahdollista. Vastaanotetut käskyt välitetään *controlqueue*'n (Taulukko 5) avulla *valveLoopV3.vi*'n *stepper&comm loop*'iin. Kuvissa 12 - 14 on esitetty kommunikointi järjestelmän kanssa. Tyhjiöjärjestelmän pyynnöt ja typpiventtiilien (HV100-HV107) ohjaus on sallittua automaattijä käsi käyttöllä. Typpiventtiilien ohjaus automaattikäytöllä on sallittu linjasta puuttuvan varoventtiilin takia, ja tulee ominaisuutena todennäköisesti poistumaan kun linjaan saadaan asennettua varoventtiili. Järjestelmä käsittelee *network stream* -virtaan kirjoitetut pyynnöt saapumisjärjestyksessä, joten järjestelmä jättää suorittamatta pyynnön, jota ei ole mahdollista suorittaa. Esimerkiksi kuvassa 14 tyhjiön pumppauspyyntöä välittömästi seuraava näytteen siirto -pyyntö jätetään suorittamatta, koska järjestelmä suorittaa pyydettyä tyhjiön pumppausta.



Kuva 12. Käsi käyttöllä venttiilien aukaiseminen ja sulkeminen.



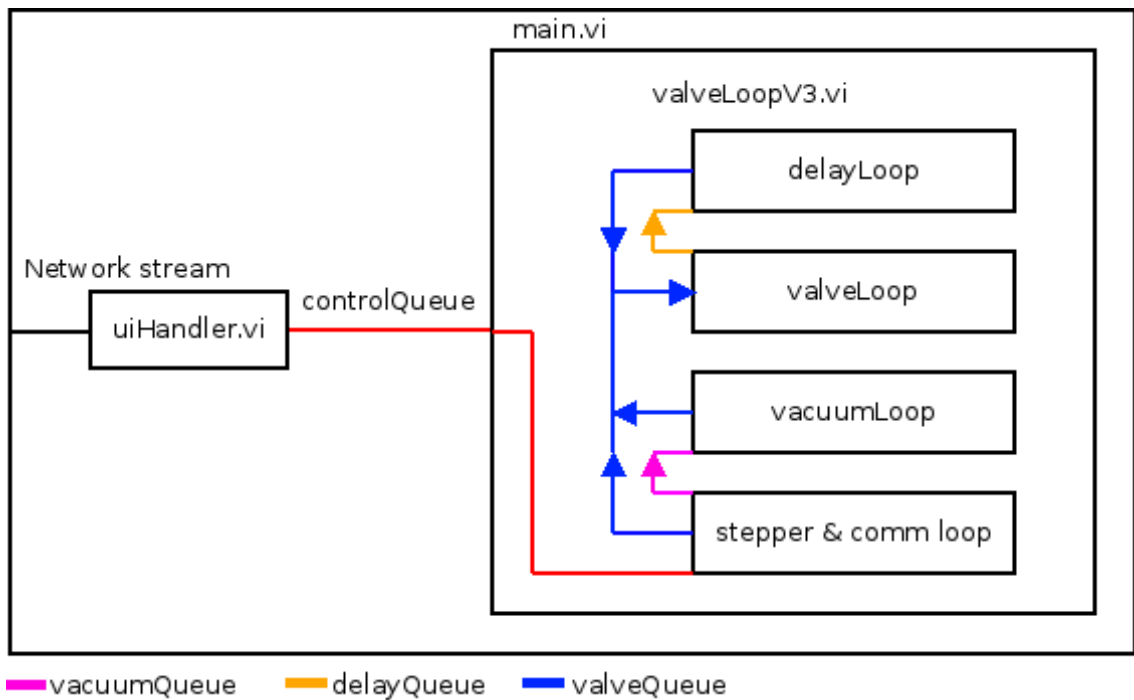
Kuva 13. Tyhjiöjärjestelmän ohjauspyyntöjä.



Kuva 14. Sekvenssien kutsuminen.

7.2.2 valveLoopV3.vi

VI rakentuu neljästä rinnakkaisesta while-silmukasta (Kaavio 2), joista *vacuumloop* lepää enintään noin 200 ms ajan suorituksen jälkeen ja muita silmukoita suoritetaan, jos niille tietoa vievään jonoon kirjoitetaan jokin pyyntö. *Stepper & comm* -silmukkaa päätyy aktiiviseen suoritukseen, jos askelmoottori on aktivoitu.



Kaavio 2. Ohjelman rakenne ja sisäiset kytkennät

Silmukan *valveLoop* tehtävänä on kirjoittaa toimilaitteen I/O-muuttujaan pyydetty arvo ja tilamuuttujaan pyydetty tila. Silmukka käsittelee *valveQueue*-jonoon (Taulukko 5) kirjoitettuja elementtejä. Jos avaamispyynnön mukana tuleva aikatieta on määritetty nolaa suuremmaksi, kirjoitetaan myös sulkemispyyntö *delay*-jonoon. *Delay*-jono käsitellään viivästyssilmukassa (*delayLoop*), joka palauttaa sulkemispyynnön *valveLoop*'ille aikamäärän täytyttyä. Viivästyssilmukan tarjoama viive on epätarkka, mutta soveltuu hyvin esimerkiksi esityhjiöpumpun käynnistys- ja sammutuspulssin luontiin, tai vaikka venttiilien sulkemiseen viiveellä.

Silmukassa *vacuumLoop* suoritetaan ohjauksen kannalta kaikki keskeiset toimenpiteet, mukaan lukien tiedonvaihdon turbopumpun ohjaimen kanssa. Silmukka päivittää tyhjiöjärjestelmään liittyvät muuttujat kolmessa tilakoneen tilassa. Tilojen välissä tilakone odottaa aina 200 ms ajan uutta käskyä ja ennalta määrättyjen tilojen läpikäynti jatkuu

aikakatkaisun tapahtuessa. Silmukka sisältää myös toiminnallisuudet näyteputken tyhjentämiseen ja näytteen sijoittamiseen varastoputkeen. Tyhjiöpumppujen käynnistys- ja sammutuspyyntöjen käsittely tapahtuu myös *vacuumloop*'issa.

Stepper & Comm -silmukka käsittelee ohjauspyynnöt ja jakaa ne oikeisiin jonoihin. Silmukan vastuulle kuuluu myös askelmoottorin ohjauspyyntöjen toteutus. Injektioruiskun paineensäätö on toteutettu realtime-moduulin PID-säätimellä. Askelmoottorille määritetty nopeus välitetään *read/write control* -funktiolla askelmoottoria ohjaavalle FPGA-sovellukselle. FPGA-sovelluksen toteutus on samankaltainen kuin NI:n esimerkkisovelluksen [27].

Jäsen	Tietotyyppi	Kuvaus
Target	Target.ctl	Määrittää mille rakenteelle pyyntö ohjataan
Valve/seq	valve_seq_enum.ctl	Manipuloitava asia/ Lähtö sekvensseissä
Valve 2	valve_seq_enum.ctl	Sekvensseissä kohde
set Valve	int	0 = N/A, 1 =Avaa, 2=Sulje
Sleep(s)	double	Sulkemisviive jos venttiilin aukaisupyntö

Taulukko 5. Controlqueue'ssa ja valveQueue'ssa käytetyn tietueen kuvaus. Target.ctl sisältää ValveLoopV3.vi:ssä olevien silmukoiden nimet lueteltuna tyyppinä ja valve_seq_enum.ctl järjestelmän kaikki osaset, kuten näyteputket ja venttiilit, lueteltuna tyyppinä.

7.3 Sekvenssit

ValveLoopV3.vi:n *vacuumloop*'issa on toiminnallisuudet tyhjiön pumppaus - ja näytteen siirtosekvenssiä varten. Lyhyesti sanottuna, sekvenssit toimivat niin, että järjestelmä sulkee määritetyt venttiilit, kun kaasulinjan paine on ollut tarpeeksi kauan asetusrajan alapuolella. *Vacuumloop*'in tilakoneen tilassa *Read values* on rakenne, jonka avulla voidaan sulkea tietty venttiili, kun kaasulinjan paine on alle ilmoitetun. Rakenne lukee tiedot silmukassa olevasta *seqArr*'ksi nimetystä tietuetaulukosta, joka on liitetty silmukan siirtorekisteriin (engl. *shift register*). Tietue on esitetty taulukossa 6.

Tietueen jäsen	Tyyppi	Kuvaus
Valve/seq	control	Kohteena oleva näyteputki tai alue. (valve_seq_enum.ct!)
check	int	monta iteraatiota pysyttävä alle rajan, arvon oltava <=5
mode	int	Tyyppi: Näyte putkeen on 1 tai Tyhjiön pumppaus on 0
new state	int	Tila johon varastoputken muuttuja päivitetään
limit(mbar)	double	Arvo jonka alle paineen tulee olla, jotta venttiili suljetaan

Taulukko 6. SeqArr-tilaukossa olevan sekvenssitietueen rakenne.

Sekvenssien kutsumisissa yhtenäistä on, että ohjelma tarkistaa järjestelmän tila sekä suorituksen alussa asettaa kaasulinjan tilan sekvenssiä vastaavaksi. Sekvenssiä ei suoriteta, jos järjestelmän tila ei ole sopiva sekvenssin suorittamiselle. Kummatkin sekvenssit tarkistavat aluksi kaasulinjan-, järjestelmän- ja pneumaattikan tilan. Lisäksi siirtosekvenssi tarkistaa lähdön ja tulon tilan, ja tyhjiön pumppaussekvenssi tarkistaa pelkästään pumppauksen kohteen tilan.

Tyhjiön pumppaussekvenssissä lisätään pumppauksen kohde taulukkoon *seqArr*, pyydetään aukaistavaksi kaasu- ja tyhjiölinjan välillä olevaa venttiiliä DV313 ja kohteeseen menevää venttiiliä. Näytteen siirtosekvenssissä lähtö ja kohde pyydetään aukaistavaksi sekä ne lisätään taulukkoon *seqArr*. Kohteen sulkemisrajaksi on asetettu vakio 0,1 (mbar) ja lähdön 0,4 (mbar). Nestetyypen annostelupyynnö tapahtuu myös siirtosekvenssissä.

7.4 Dokumentointi

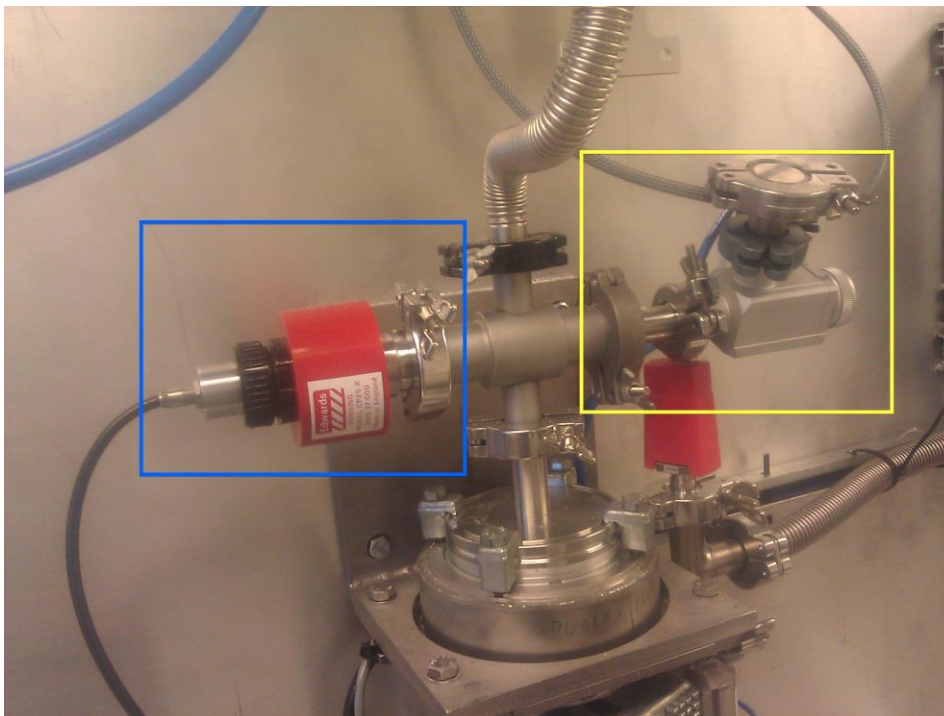
Ohjelman dokumentointi on suoritettu kirjoittamalla tekstiä lohkokaaavion toiminnallisuuksien joukkoon, nimeämällä muuttujat selkeästi ja kirjoittamalla VI:n asetuksissa (engl. *VI properties*) sijaitsevaan dokumentaatio-valinnan VI-kuvaukseen (engl. *VI description*) selkeä kuvaus VI:n toiminnasta.

8 Järjestelmän testaus

Järjestelmän testaus käsittää kaasulinjan vuotojen etsinnän ja näytteiden siirron kokeilun.

8.1 Vuotojen etsiminen kaasulinjasta

Vuotojen etsintä aloitettiin liittämällä turbopumpun imuaukkoon ristihaara, johon liitettiin Edwards Penningin CP25-K –kylmäkatodityhjiömittari, jonka mitta-alue on $1,3 \cdot 10^{-8} \dots 1,3 \cdot 10^{-3}$ mbar [28]. Mittari on kytketty Edwards Penning 8 –näyttöön. Lisäksi ristihaaraan liitettiin käsiventtiili, johon heliumvuodonetsijä voidaan liittää. Kaasulinjassa olevalla kapasitiivisella tyhjiömittarilla (Liite 2, PIR301) pystytään mittaamaan alimmillaan 10^{-4} mbarin painealueelle asti, joten isommalla mitta-alueella voidaan tarkastella paremmin tyhjiön tiivyyttä. Kuvassa 15 on testiasetus, johon ei ole kytketty heliumvuodonetsijää. Järjestelmää pumpattiin ennen testien suorittamista yhtäjaksoisesti kahden viikon ajan, jolloin saavutettiin noin $1 \cdot 10^{-6}$ mbarin paine. Vuototestejä ennen järjestelmää oli myös pumpattu monesti usean päivän jaksoissa sekä ilmattu välillä.



Kuva 15. Tyhjiösystemiin testauksen ajaksi kytketty ristikappale, Edwards Penningin CP25-K - kylmäkatodityhjiömittari (sininen laatikko) ja käsikäyttöinen venttiili (keltainen laatikko), johon heliumvuodonetsijä voidaan liittää.

Alkuun oli syytä epäillä kaasulinjan vuotavan, koska pumppauksen loputtua kaasulinjan paineen kasvu oli kohtalaisen nopeaa ja kaasulinjan paine saavutti 1,33 mbarin muutamassa minuutissa. Vuotojen etsintä suoritettiin heliumvuodonetsijällä ja tyhjiötestausmenetelmällä, jossa liitoksia ja saumoja suihkutetaan hienolla heliumsuihkulla. Tyhjiöjärjestelmän kaikki saumakohdat käytiin heliumsuihkun kanssa läpi järjestelmällisesti.

Vuotojen etsinnöissä kolmannessa (Liite 2, tube003) varastoputkessa havaittiin paineen nousevan poikkeavasti verrattuna muuhun järjestelmään. Kolmannen näyteputken heliumsuihkutuksen aikana heliumvuodonetsijä myös havaitsi heliumia tyhjiössä. Varastoputken irrottamisen ja takaisin kytkemisen jälkeen vuotoa ei enää havaittu.

Testauksessa havaittiin kalvoventtiilin DV300:n toimivan virheellisesti eli venttiili ei mennyt täysin kiinni.

Kaasulinja saatiin pumpattua testeissä noin $1 \cdot 10^{-6}$ mbarin paineeseen, joten voidaan päätellä, ettei järjestelmässä ole suuria vuotoja ja kaasulinjan tiiviys on hyvä järjestelmän

toimintakyvyn takaamiseksi. Kaasulinjassa olevan baratron-mittarin pystyy mittaamaan vain 10^{-4} mbarin painealueelle asti, joten mitattu tyhjiö on parempi kuin kaasulinjan omilla antureilla pystytään mittaamaan. Suurien vuotojen kohdalla ei pystyttäisi pumppaamaan näin hyvää tyhjiötä kaasulinjaan. Ennen vuototestejä havaittu nopeahko paineen nousumisen syy on tyhjiökammion pintoihin tarttuneiden kaasujen irtoaminen.

8.2 Näytteiden siirtäminen

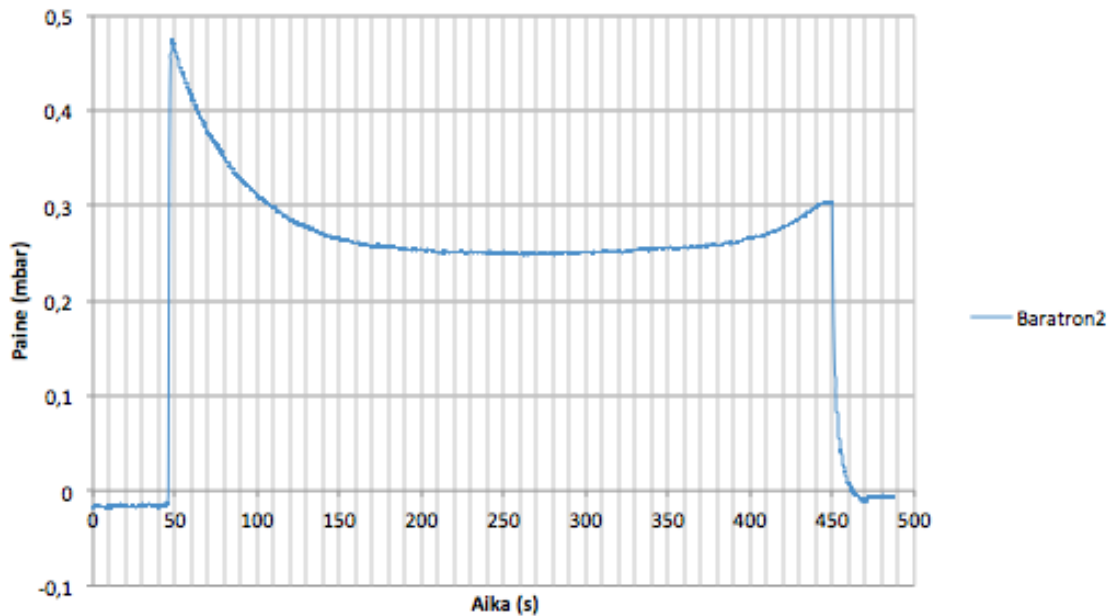
Näytteiden siirtämistä testattiin usealla näytteellä, joiden oletettiin vastaavan aitoja näytteitä. Kuvassa 8 (s.13) on yksi näyte kytkettynä ultratorr-liittimeen.

Liitteessä 3 on piirrettyä kaasulinjan paineen vaihtelu testien ajalta. Kaasulinjassa olevan baratron-mittarin (PIR301) mittaukset eivät ole tallennettuna tietokantaan testien alkuvaiheesta alkaen. Kaasulinjan tyhjiölinjaan yhdistävästä venttiilistä (Liite 2, DV313) ei ole tallennettu tietoja tietokantaan, joten ei pystytä tarkkaan määrittämään milloin kaasua on poistettu pumppaamalla kaasulinjasta. Hiilidioksidin härmistyminen ja sublimoituminen havaitaan kuvaajassa eksponenttifunktion kaltaisesta kuvaajan muodosta. Esimerkkinä näistä mittaukset välillä 15:20:40 - 15:34:38 ja 14:47:13 - 14:57:12 (Liite 3).

Siirtotestiä ennen kaasulinja ja kaikki varastoputket pumpattiin alle $6 \cdot 10^{-4}$ mbarin paineeseen. Testien alussa näytteen lähtö ja kohteena oleva varastoputki pumpattiin tyhjiöön sekvenssillä. Tyhjiön pumppaamisen jälkeen suoritettiin siirtosekvenssi ja aukaistiin näytteessä oleva käsiventtiili. Testeissä nestemäinen tyyppi piti annostella manuaalisesti järjestelmästä altaisiin, koska pelkkään vakioaikaan perustuva annostelu ei osoittautunut toimivaksi.

Siirtotesteissä ilmeni ongelmia, koska siirrettävät näytteet olivat epäpuhtaita. Epäpuhtauksien takia hiilidioksidin härmistymisen jälkeen kaasulinjan jäi näytteestä muita kaasuja, joten kaasulinjan paine jäi odotettua korkeammaksi ja häiritsi siirtosekvenssin toimintaa. Lisäksi näytteiden välillä oli suurta vaihtelevuutta paineen osalta. Osa kaasulinjaan siirretyistä testinäytteistä saturoi kaasulinjan paineen mittauksen myös hiilidioksidin härmistymisen jälkeen, ja osassa paineen muutos oli kuvaajan 2 mukainen eli muutos oli vähäistä. Siirtosekvenssin toiminta todettiin lopulta pakottamalla kaasulinjan paine hyväksymisrajan alapuolelle tyhjiöjärjestelmän avulla, jonka jälkeen sekvenssi suoritti toimintansa oikein loppuun. Siirtosekvenssissä käytetään samaa ohjelman rakennetta

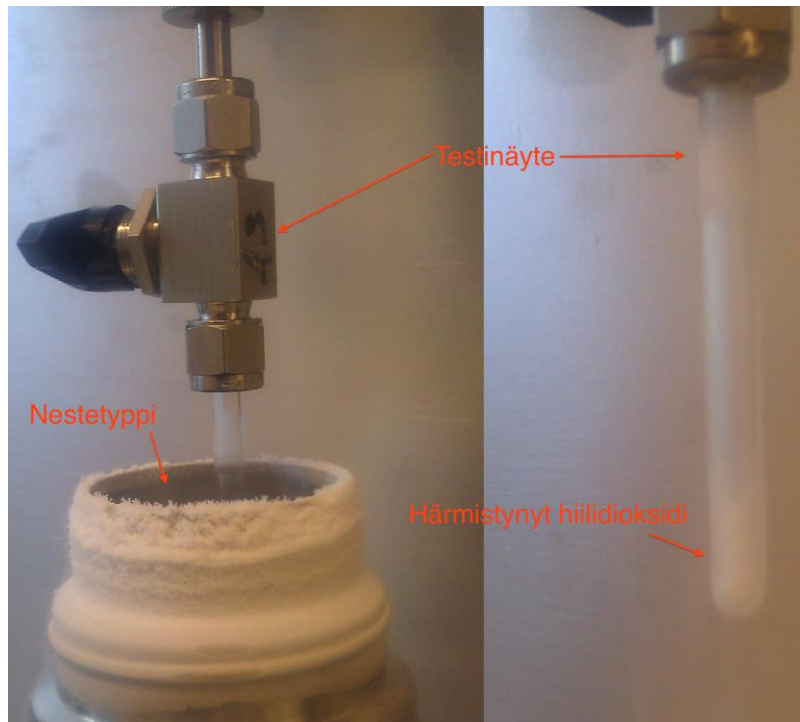
kuin *tyhjiön pumppaus* -sekvenssissä, joten siirron hyväksyminen edellyttää tarpeeksi alhaista painetta kaasulinjassa. Siirtosekvenssin alkuperäinen hyväksymisraja oli 0,1mbar.



Kuvaaja 2. Kaasulinjan paine ajan funktiona erään näytteen siirron aikana.

Testien yhteydessä osalla näytteistä epäpuhtaus varmistettiin liittämällä näyte ultratorr-liittimeen, jonka jälkeen suoritettiin näytteen siirtoon kuuluva tyhjiö pumppaus. Pumpauksen jälkeen näyte päästettiin kaasulinjaan ja testinäyteputki upotettiin termosputlossa olevaan nestetyyppeen kuvan 16 mukaisesti. Putkessa varmistettiin olevan härmistynyt hiilidioksidi, jonka jälkeen putki upotettiin takaisin nestetyyppeen ja kaasulinjaan pumpattiin tyhjiö. Lopputuloksena oli näyte jossa oli vain hiilidioksidia.

Puhtaiden näytteiden kanssa kaasulinjan paine nousi huomattavasti kuvaajaa 2:ta korkeammalle, tällöin paine nousi kaasulinjan baratron-mittarin ylärajalle. Kaiken kaikkiaan testeissä havaittiin kaasulinjan jäävän n. $5 \cdot 10^{-2}$ - $2 \cdot 10^{-1}$ mbarin paineeseen näytteestä riippuen, kun näyte oli siepattu nestetyypellä varastoputkeen.



Kuva 16. Testinäytteen upotus nestetyypeen.

8.3 Testeissä huomattuja puutteita ja muita huomioita

Injektioruiskun käyttöä ei pystytty testaamaan, koska testejä tehdessä ei ollut saatavilla liittosholkkia, joka olisi ollut tarpeeksi pieni injektioruiskun neulalle. Myöskään lasikapillaariputki ei ollut vielä saatavilla.

Käytettyjen kalvoventtiilien teknisissä tiedoissa ilmoitettiin käyttöpaineeksi 5-7 baaria, mutta testit osoittivat, että toiminnan varmistamiseksi paine on pidettävä yli 5,6 baarin. Testejä myös häiritsi laboratorion paineilmaverkon paineen epävakaas, koska verkon paine tippui välillä alle 5 baarin.

Esityhjiöpumppua ohjaava relekytkentä toimi virheellisesti. Kytkennän piti palauttaa tieto vikatilasta, jos pumppu saatettiin vikatilaan, mutta se ei tehnyt sitä.

Kaasulinjassa oleva venttiili DV300 havaittiin toimivan puutteellisesti. Venttiili ei sulkeutunut täysin. Lisäksi nestetyypilinjasta havaittiin puuttuvan varoventtiili (Liite 2, V111).

9 Ilmenneet ongelmat ja kehitysideat

9.1 Nestemäisen typen ohjaus

Typen varastona käytetään CryoThermin Apollo 50 -säiliötä, josta käsiventtiilillä voidaan säätää nesteen virtaamista höyrystimelle ja näin säätää käyttöpainetta. Sopivan paineen pitäminen säiliössä on tällä menetelmällä vaikeaa, koska tyypilinjasta ei päästetä nestettä pois kuin tietyillä hetkillä, ja käytännössä nykyinen menettely päästää jatkuvasti painetta pois varoventtiilin kautta. Suuret painevaihtelut syötössä myös aiheuttavat sen, ettei altaita voida täyttää vakioajalla, vaan tarvitaan tietoa altaan tilasta.

Ratkaisuna paineongelmaan voisi olla säiliöön tarkoitettu lisälaitte, joka mahdollistaa automaattisen paineensäädön. Altaiisiin voitaisiin myös asentaa sopivalle lämpöalueella toimivat lämpöanturit. Anturien avulla voi helposti päätellä, onko altaaseen virtaava typpi nesteenä vai kaasuna.

Nestetyypilinjasta havaittiin puuttuvan varoventtiili (Liite 2, V111).

9.2 Injektioruisku

Kokeilujen yhteydessä havaittiin, että nestetyypellä jäädytetyn ruiskun mäntä kutistui niin paljon, että se pääsi vapaasti tippumaan pois ruiskun sisältä. Männän kutistumisen seurauksena injektioruiskun näytteelle tarkoitettu alue on suorassa yhteydessä huoneilman kanssa, jolloin myös näyte pääsee mahdollisesti poistumaan ruiskusta.

Ongelman ratkaisuun voisi kokeilla nestetyypen pinnan nostamista tai jonkinlaista lämmitystä männälle.

9.3 Turbopumpun ohjaimen hallinta

Ohjainta voidaan hallita ulkoisesti sarjaliikenteen ja rinnakkaisportin avulla. Rinnakkaisportin pinni 25, eli System interlock input, on kytkettävä maapotentiaaliin, jotta pumppu voidaan kytkeä päälle [29].

Rinnakkaisporttiin voisi kehittää kytkennän, jolla pystyisi kytkemään lukituksen päälle ja pois haluttuina ajankohtina. Lukituksella voi estää esimerkiksi pumpun käynnistyminen kun venttiili GV400 on suljettu tai vahingossa käsin tehdyt käynnistykset ohjaimen näytöltä.

10 Yhteenveto

Insinööriyön tuloksena syntyi kaasunsyöttöjärjestelmälle I/O-lista (Liite 1), PI-kaavio (Liite 2), LabVIEW-sovelluksen ensimmäinen versio, injektioruiskulle jäähdytyskuppi ja injektioruiskulle valittiin sopiva lineaariaskelmoottori. Järjestelmään liittyvät kehitysideoita on esitetty kappaleessa 9.

Järjestelmän testauksessa keskeiset ongelmat olivat testinäytteiden epäpuhtaus, epävakaa paineilma-verkko ja injektioruiskun neulaan sopivan liitosholkin puuttuminen. Testauksessa havaittiin venttiilin DV300 toimivan virheellisesti eli se ei sulkeutunut täysin. Lisäksi nestetyypilinjasta havaittiin puuttuvan varoventtiili.

Vuotojenetsintä suoritettiin heliumvuodonetsijällä. Testeissä kaasulinjan paine saavutti noin $1 \cdot 10^{-6}$ mbarin paineen, joka on alhaisempi tyhjiötaso kuin kaasulinjan antureilla voidaan mitata. Kaasulinjan tyhjiömittarin alaraja on 10^{-4} mbarin alueella. Kaasulinjan todettiin olevan järjestelmän toiminnan kannalta tarpeeksi tiivis.

Injektioruiskun lineaariaskelmoottoriksi valittiin Haydon kerk 21F4U-2.5 -lineaariaskelmoottori. Alkuperäisenä vaihtoehtona ollut SMC:n LES-sarjan askelmoottoripöydän ei todettu soveltuvan käytettäväksi järjestelmässä.

LabVIEW-sovellus täytti kappaleessa 7.1 esitetyt vaatimukset pois lukien näytteen siirron vakiopaineella ionilähteelle, koska toiminnallisuutta ei pystytty testaamaan sopivien liitosholkkien puuttumisen takia.

Lähteet

- 1 MAOL Ry, MAOL Taulukot, Otava 2006
- 2 NI LabVIEW Products, <http://sine.ni.com/np/app/main/p/docid/nav-104/lang/fi/fmid/1771/>, viitattu 12.08.2013
- 3 OpenG Libraries - OpenG, <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/fi/nid/209027>, viitattu 31.08.2013
- 4 Ronald W. Larsen, LabVIEW for Engineers, Pearson, 2010
- 5 National Instruments, LabVIEW Core 1 Course Manual, August 2010 Edition
- 6 Understanding Shared Variable Technology, http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/lvconcepts/ni_psp/, viitattu 14.4.2014
- 7 Lossless Communication with Network Streams: Components, Architecture, and Performance, <http://www.ni.com/white-paper/12267/en/>, 27.04.2014
- 8 What Is NI CompactRIO?, <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/global/lang/fi/pg/1/sn/n24:cRIO/fmid/102/>, viitattu 01.12.2013
- 9 The Definitive Guide: Programming NI VxWorks Real-Time Controllers in C/C++, <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-13537>, viitattu 01.12.2013
- 10 William Stallings, Operating Systems, Internals and design principles, 7th edition
- 11 TTY Luentomoniste, Sulautettu ohjelmointi, kappale 6, <http://www.cs.tut.fi/~sulo/pruju/sulo-pruju-6.pdf>, viitattu 14.12.2013
- 12 Timed Structures and VIs, http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361K-01/glang/timed_loop_vis_and_func/, viitattu 26.12.2013
- 13 What is a Real-Time operating System (RTOS)?, <http://www.ni.com/white-paper/3938/en/>, viitattu 13.4.2014
- 14 Tyhjiötekniikka, Suomen tyhjiöseura ry, Fontel et al., 1986
- 15 MARA-separaattorin tyhjiöjärjestelmä, Jyväskylän yliopisto, Jari Partanen

- 16 Leak Detection, K. Zapfe, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany, http://www.desy.de/~ahluwali/technicalnotes/2007_03.pdf, viitattu 26.04.2014
- 17 SMC Electric Slide Table, Series LES, 2012
- 18 Harvard Apparatus PHD ULTRA Syringe pump brochure, <http://www.harvardapparatus.com/Syringe%20Pump%20PHD%20ULTRA%20Brochure.pdf> , viitattu 14.4.2014
- 19 Hydon kerk 21000 series size 8 stepper motor linear actuator, <http://www.haydonkerk.com/LinearActuatorProducts/StepperMotorLinearActuators/LinearActuatorsHybrid/Size8LinearActuator/tabid/74/Default.aspx>, viitattu 24.4.2014
- 20 NI9215, OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS, <http://www.ni.com/pdf/manuals/373779f.pdf>, viitattu 31.01.2014
- 21 MKS Baratron® Type 622B/623B/626B Absolute Pressure Transducers, Manual, <http://www.mksinst.com/docs/R/622B623B626B-MAN.pdf>, viitattu 13.08.2013
- 22 MKS Baratron® Type 127A and Type 128A Absolute Pressure Transducers, Instruction Manual, <http://exshare.lightsource.ca/farir/Manuals/Gauges/FIR PRES 1Torr 127A MAN.pdf>, viitattu 13.08.2013
- 23 SM5812/SM5852 Amplified Pressure Sensor datasheet, http://totem-dcs.web.cern.ch/totem-dcs/index.php?dir=E.03.05.05&file=03.SM5812_-_SM5852.pdf, viitattu 13.08.2013.
- 24 BOC Edwards Turbo Instrument Controller Controller, LabVIEW Plug and Play Instrument Driver, http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display_download_page?p_id_guid=F66CB958B95E5E83E0340003BA230ECF, viitattu 31.01.2014
- 25 NI9476, OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS, <http://www.ni.com/pdf/manuals/373964d.pdf>, viitattu 31.01.2014
- 26 NI9501 OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS, www.ni.com/pdf/manuals/375479d.pdf, viitattu 31.01.2014
- 27 What is the proper programming procedure to account for timing on the NI 9501 stepper drive module, <http://digital.ni.com/pub-lic.nsf/allkb/095FC58BB279E4178625778A0056E048>, viitattu 28.04.2014
- 28 CP25-3 Pennin Gauge Heads, Instruction Manual, http://www.idealvac.com/files/manuals/Edwards_CP25K_Cold_Cathode_Gauge_Sensor_Manual.pdf, viitattu 14.4.2014

29 Turbo Instrument Controller (TIC), Instruction Manual, <http://www.edwardsvacuum.com/Viewers/Document.ashx?id=1930&lcid=2057>, viitattu 14.4.2014

IO-lista

Module: MOD1 NI9476					
PIN	Sähk.		Ohjattava toimilaite		
1	DO0	Y303	HV314	Swagelok	SS-41GS1-31C
2	DO1	Y304	HV315	Swagelok	SS-41GS1-31C
3	DO2	Y305	GV400	Genesis	GNVS-072-NWB-S3
4	DO3	Y306	GV401	SMC	SMC XLF-16A-M9PA
5	DO4	1_X2	FV PUMP ON/OFF CMD		
6	DO5				
7	DO6				
8	DO7				
9	Vsup		24VDC IN (+)		
10	Vsup		24VDC IN (+)		
11	DO8				
12	DO9				
13	DO10				
14	DO11				
15	DO12				
16	DO13				
17	DO14				
18	DO15				
19	COM		0VDC IN (-)		
20	DO16				
21	DO17				
22	DO18				
23	DO19				
24	DO20				
25	DO21				
26	DO22				
27	DO23				
28	Vsup		24VDC IN (+)		
29	Vsup		24VDC IN (+)		
30	DO24				
31	DO25				
32	DO26				
33	DO27				
34	DO28				
35	DO29				
36	DO30				
37	DO31				

Module: MOD2 NI9476						
PIN	Sähk.		Ohjattava toimilaite			
1	DO0	Y100	DV300	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
2	DO1	Y101	DV301	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
3	DO2	Y102	DV302	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
4	DO3	Y103	DV303	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
5	DO4	Y104	DV304	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
6	DO5	Y105	DV305	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
7	DO6	Y106	DV306	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
8	DO7	Y107	DV307	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
9	Vsup	24VDC IN (+)				
10	Vsup	24VDC IN (+)				
11	DO8	Y108	DV308	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
12	DO9	Y109	DV309	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
13	DO10	Y110	DV310	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
14	DO11	Y111	DV311	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
15	DO12	Y112	DV312	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
16	DO13	Y113	DV313	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
17	DO14	Y114	DV314	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
18	DO15	Y115	DV315	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
19	COM	0VDC IN (-)				
20	DO16	Y116	DV316	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
21	DO17	Y117	DV317	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
22	DO18	Y118	DV318	Rotarex Group	SELFA M4SI-V	
23	DO19	Y200	PN200	Festo	SMT-8M-PS-24V-K-2.5-OE	
24	DO20	Y201	PN201	Festo	SMT-8M-PS-24V-K-2.5-OE	
25	DO21	Y202	HV200	Swagelok	6LVV-DPS6M-C	
26	DO22	Y203	HV201	Swagelok	6LVV-DPS6M-C	
27	DO23	Y204	HV202	Swagelok	6LVV-DPS6M-C	
28	Vsup	24VDC IN (+)				
29	Vsup	24VDC IN (+)				
30	DO24	Y205	HV100	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	
31	DO25	Y206	HV101	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	
32	DO26	Y207	HV102	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	
33	DO27	Y208	HV103	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	
34	DO28	Y209	HV104	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	
35	DO29	Y210	HV105	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	
36	DO30	Y211	HV106	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	
37	DO31	Y212	HV107	Swagelok	SS-4UW-TW-TF-6C	

Module: MOD3 NI9425				
PIN	Anturi/lähde			
1	DI0	Festo	SMT-8M-PS-24V-K-2.5-OE	PN200 Limit
2	DI1	Festo	SMT-8M-PS-24V-K-2.5-OE	PN200 Home
3	DI2	Festo	SMT-8M-PS-24V-K-2.5-OE	PN201 Limit
4	DI3	Festo	SMT-8M-PS-24V-K-2.5-OE	PN201 Home
5	DI4	Omron	EE-SX871P	Stepper Limit
6	DI5	Omron	EE-SX871P	Stepper Home
7	DI6		K4	FV PUMP ON INDICATOR
8	DI7		K3	FV PUMP MOTOR FAULT
9	COM		X24VDC (-)	0VDC IN (-)
10	COM			0VDC IN (-)
11	DI8	SMC	ISE30A-01-E	
12	DI9	SMC	SMC XLF-16A-M9PA (D-M9P)	Vent valve closed
13	DI10	SMC	SMC XLF-16A-M9PA (D-M9P)	Vent valve open
14	DI11			
15	DI12			
16	DI13			
17	DI14			
18	DI15			
19	NC		NC	
20	DI16			
21	DI17			
22	DI18			
23	DI19			
24	DI20			
25	DI21			
26	DI22			
27	DI23			
28	COM			0VDC IN (-)
29	COM			0VDC IN (-)
30	DI24			
31	DI25			
32	DI26			
33	DI27			
34	DI28			
35	DI29			
36	DI30			
37	DI31			

Module: NI9215 II						
PIN		Tunnus	Anturi		alue	
0	AI0+	PIR300	MKS Instruments	623A13TAE	5*10 ⁻¹ - 1000 torr	0 - 10 V
1	AI0-					
2	AI1+	PIR301	MKS Instruments	127AA-00001B	5*10 ⁻⁴ - 1 torr	0 - 10 V
3	AI1-					
4	AI2+	PIR302	Silicon Microstructures	5812-100-A-3-LR	0-689.5kPa	0,5 - 4,5 V
5	AI2-					
6	AI3+	PIR303	Silicon Microstructures	5812-100-A-3-LR	0-689.5kPa	0,5 - 4,5 V
7	AI3-					
8	NC					
9	COM					

Järjestelmän testauksen aikainen paineen vaihtelu kaasulinjassa

