

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Koneautomaatiotekniikka

2012

Mikko Kulmala

# AIRI- AJETTAVUUSSIMULAATTORIN MITTAUSJÄRJESTELMÄN MODIFIOINTI



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Koneautomaatiotekniikka

2013 | Sivumäärä 83

Ohjaaja TkT Juha Leimu

Mikko Kulmala

## AIRI-AJETTAVUUSSIMULAATTORIN MITTAUSJÄRJESTELMÄN MODIFIOINTI

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Airi-ajettavuussimulaattorin ja OD-päällepuhallussimulaattorin mittaustoimintaan liittyvät puutteet ja parannuskohteet. Simulaattorilaitteiston siirto toiseen toimipisteeseen mahdollistaa rakenteellisia muutoksia, jotka on selvitetty Diana Lehtosen opinnäytetyössä. Lehtosen työssä suoritettiin Airin ja OD:n uusien rakenteiden mekaniikkasuunnittelu. Tässä opinnäytetyössä keskitytään siirron mahdollistamiin muutoksiin mittausjärjestelmässä ja-järjestelyissä.

Työn tarkoitus on tehostaa tutkimuslaitoksen tulevaa mittaustoimintaa, kartoittaa tulevaisuuden mittaustarpeita ja parantaa nykyistä LabVIEW-mittausohjelmistoa. Työssä tarkasteltiin ensin olemassa olevan järjestelmän toimintaa ja ominaisuuksia. Tarkasteluiden aikana kartoitettiin mittaustoiminnan kannalta tarpeelliset muutokset. Tämän lisäksi etsittiin erilaisia menetelmiä sylinterin nipin tangenttipisteiden paikoittamiseen.

Opinnäytetyön lopputuloksena laadittiin suunnitelmat mittaustoiminnalle uudessa toimipisteessä. Uusi LabVIEW-mittaussovellus suunniteltiin kattamaan tulevaisuuden mittaustarpeet. Tämän lisäksi tutkittiin kahden erilaisen etäisyysanturin soveltuvuutta sulkeutuvan ja aukeavan nipin tangenttipisteen paikoittamiseen.

ASIASANAT:

Ajettavuussimulaattori, tutkimuslaitos, LabVIEW, kehittäminen

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering | Machine Automation technology

2013 | Total number of pages 83

Instructor Juha Leimu, Dr .Tech.

Mikko Kulmala

## MODIFICATION OF THE MEASURING SYSTEM OF AIRI RUNNABILITY SIMULATOR

The objective of this thesis was to define the faults and chances for improvement for the measuring operations of runnability simulators Airi and OD. The simulators are to be located to a new location in Raisio and this enables structural changes which have been reported in the thesis of Diana Lehtonen. Lehtonen's work focused on the mechanic desing of the new versions of Airi and OD. This thesis concentrates on the possible changes of the simulators measuring systems and arrangements.

The goal is to improve the efficiency of future measuring projects, investigate possible new measuring needs and improve the existing LabVIEW measurement software. The first task was to examine the existing systems properties and features. After this examination the necessary changes were surveyed. In addition to this efforts were made to find possible applications for the accurate positioning of the cylinder nip.

As a result of the thesis, designs were made covering the future measuring operations of the new runnability simulators Airi and OD. The new measuring application based on the LabVIEW programming enviroment was designed to be suited to the new location. Two different kinds of displacement sensors were tested as a possible solution to finding the accurate position of the cylinder nip

KEYWORDS:

Runnability simulator, research plant, development, LabVIEW

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 AJETTAVUUSTUTKIMUS</b>	<b>10</b>
2.1 Paperikoneen toiminta yleisesti	10
2.2 Sylinterikuivatus	11
2.3 Päällepuhalluskuivatus	12
2.4 Ajettavuuskomponenttien tutkimus- ja kehitystyö	13
2.5 Airi- ajettavuussimulaattori	15
2.6 Ajettavuusjärjestelmien tutkimustyö Turun ammattikorkeakoulussa	17
<b>3 MITTAUSTARPEET</b>	<b>21</b>
3.1 Pyörähdyspainemittaukset	22
3.2 Mittaustoiminnan komponentit	26
3.2.1 Liukurengaspakka	26
3.2.2 Dewetron siltavahvistin	27
3.2.3 Oskilloskooppi DSO 5014A pyörähdyspainemittauksissa	30
3.2.4 Induktiivinen lähestymisanturi triggerikäytössä	31
3.2.5 Paine-erolähettimet	32
3.2.6 Dataloggeri paine-eromittauksissa	33
3.2.7 Lämpötilamittaukset	34
3.3 Mittaussovellus	34
3.3.1 LabVIEW-ohjelmointi lyhyesti	35
3.3.2 AIRI.exe-mittaussovelluksen toiminta	35
3.4 Mittaustiedostojen analysointi	40
<b>4 KEHITYSKOHEET JA VAIHTOEHTOISET MENETELMÄT</b>	<b>42</b>
4.1 Mittaustoiminnan suunnittelu uuteen tilaan	42
4.2 Mittausjärjestelmän kehittäminen	45
4.3 Tiedonkeruujärjestelmien arkkitehtuuri	46
4.3.1 Tiedonkeruujärjestelmän toiminnot yleisesti	48
4.6 Sulkeutuvan ja aukeavan nipin tangenttipisteen paikoitus.	52
4.6.1 LVDT ja DVRT-anturit	52

4.7 DVRT-antureiden testaus	57
4.7.1 SG-DVRT 38-anturi	59
4.7.2 NC-DVRT 2,5-anturi	62
4.8 DVRT-antureiden koeajojen tulokset	65
4.9 Liipaisutoiminnan kehittäminen	71
<b>5 MITTAUSTOIMINNAN MUUTOKSET</b>	<b>77</b>
5.1 Mittausjärjestelmän layout ja rakenne	77
5.2 LabVIEW-sovelluksen muutokset	79
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>81</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>82</b>

## LIITTEET

Liite 1. Airin ja OD:n uudet rakenteet

Liite 2. Koelaitteiden sijoittelu Raison tutkimuslaitokselle

## KUVAT

Kuva 1. Paperikoneen prosessikuvaus (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003).	11
Kuva 2. Kuivatussyylinterin ja Vac-telan yhdistelmä (KnowPap 2004).	12
Kuva 3. OptiDry Twin (Metso.com 2012).	13
Kuva 4. Ajettavuutta heikentävät paineenvaihtelut (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003).	14
Kuva 5. Ajettavuuslaitteen ja imusylinterin yhdistelmä (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003).	15
Kuva 6. Airi-ajettavuussimulaattori.	16
Kuva 7. OD-päällepuhallussimulaattori asennettuna Airi-ajettavuussimulaattoriin.	17
Kuva 8. Sulkeutuvaan ja aukeavaan nippiin muodostuvat paineet.	18
Kuva 9. Turun ammattikorkeakoulun tiloissa sijaitseva koelaitte.	19
Kuva 10. Uratelan profiili.	20
Kuva 11. Kulite XCS-anturin wheatstone-siltakytkentä (Miulus 2010).	23
Kuva 12. Venymäsillan sijoittelu Kulite XCS-anturin sisällä (Miulus 2010).	23
Kuva 13. Liukurengaspakan pesä.	27
Kuva 14. Liukurengaspakan akselipää.	27
Kuva 15. Dewe-30-4 moduuli ja vahvistinkortit.	28
Kuva 16. Triggausanturi asennettuna Pansion tutkimuslaitoksella.	32
Kuva 17. Rosemount paine-erolähettimien asennus Pansion tutkimuslaitoksella.	33

Kuva 18. AIRI-mittaussovelluksen Main window välilehti.	37
Kuva 19. AIRI-mittaussovelluksen Agilent dso5014a välilehti.	38
Kuva 20. AIRI-mittaussovelluksen Agilent 34970a välilehti.	39
Kuva 21. AIRI-mittaussovelluksen second window välilehti.	40
Kuva 22. Kolmen pyörähdyspaineakanavan data esitettynä Diademissa.	41
Kuva 23. Airi-ajettavuussimulaattorin uusi rakenne (Lehtonen 2012).	43
Kuva 24. OD-päällepuhallussimulaattorin uusi rakenne (Lehtonen 2012).	44
Kuva 25. Kauko-ohjattu ulkoinen väylärakenne (Prof. S. Mukhopadhyay 2009).	47
Kuva 26. Tietokoneen sisäinen väylärakenne (Prof. S. Mukhopadhyay 2009).	47
Kuva 27. Multipleksauskaavio (Prof. S. Mukhopadhyay 2009).	50
Kuva 28. LVDT-anturi (Macrosensors 2012).	53
Kuva 29. LVDT-anturin toimintaperiaate (Microstrain 2012).	54
Kuva 30. DVRT-anturin toimintaperiaate (Microstrain 2012).	55
Kuva 31. DVRT-anturin ulostulosignaalin teoreettinen muoto mittausjärjestelyissä.	56
Kuva 32. Tapahtumaikkunan ja sulkualan alku- ja loppupisteet.	57
Kuva 33. NC-DVRT- ja pyörähdyspaineanturi asennettuna uratelaan.	58
Kuva 34. SG-DVRT 38-anturi, DEMO-DC vahvistin ja jatkojohto.	59
Kuva 35. DVRT-SG 38-anturin tapahtumaikkuna ja sulkuala.	60
Kuva 36. SG-DVRT 38-anturin kiinnitys uratelaan.	61
Kuva 37. SG-DVRT 38-anturi asennettuna uratelaan.	61
Kuva 38. SG-DVRT 38-anturin mittapää.	62
Kuva 39. NC-DVRT 2.5-anturi.	62
Kuva 40. NC-DVRT-anturin kohdemateriaalina toimiva alumiiniteippi.	63
Kuva 41. NC-DVRT-anturi asennettuna uratelaan.	64
Kuva 42. NC-DVRT-anturin tapahtumaikkuna ja sulkuala.	64
Kuva 43. SG-DVRT-anturin testaus nopeudella 333 m/min.	65
Kuva 44. SG-DVRT-anturin testaus nopeudella 990m/min.	66
Kuva 45. SG-DVRT-anturin vioittunut tiiviste.	67
Kuva 46. NC-DVRT-anturin testaus nopeudella 458 m/min.	68
Kuva 47. NC-DVRT-anturin testaus nopeudella 830 m/min.	68
Kuva 48. NC-DVRT-anturin testaus nopeudella 1960 m/min.	69
Kuva 49. NC-DVRT-anturin signaali Diadem-ohjelmalla esitettynä.	70
Kuva 50. Käyrien amplitudihuiput.	70
Kuva 51. SICK Oy:n valmistamia merkinlukijoita (SICK 2012).	73
Kuva 52. Erilaisia pulssiantureita (Metropolia 2012).	73
Kuva 53. SICK merkinlukija KTL-8.	74
Kuva 54. SICK merkinlukija asennettu telan pätyyn.	75
Kuva 55. Merkinlukija alapuolelta kuvattuna.	75
Kuva 56. KTL-8 Merkinlukijan kalibrointi.	76
Kuva 57. Raision tutkimuslaitoksen layout.	78
Kuva 58. AIRI + OD-mittaussovelluksen Main window välilehti.	79
Kuva 59. Settings: Agilent 34972A-välilehti.	80

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

AIRI	Ajettavuussimulaattori, jolla jäljitellään sylinterikuivaimen toimintaa.
OD	Päällepuhallussimulaattori, jolla jäljitellään päällepuhalluskuivaimen toimintaa.
Viira	Telojen välissä kulkee viira, joka on muovista kudottua lujaa kangasta. Paperirata liikkuu koneessa viiran tukemana.
Raina	Paperirata, joka kulkee paperikoneen läpi.
Nippi	Telan ja radan muodostama tangenttipinta, josta paperi irtoaa viiran pinnalta tai vastaavasti tulee telan pinnalle.

# 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Turun ammattikorkeakoulun koneautomaatiolinjan opinnäytetyönä Metso Paper Oy:lle lukuvuonna 2012. Ennen opinnäytetyön aloittamista olin mukana koululla suoritettavassa uratelan mitoitusprojektissa lukukausina 2010 -2011. Projektissa suoritimme koeajoja koulussa sijaitsevalla simulaattorilaitteella ja samalla kehitimme simulaattoria rakenteellisesti. Syksyllä 2011 entisille projektiryhmän jäsenille tarjottiin kahta opinnäytetyötä tehtäväksi Metso Paper Oy:n ilmajärjestelmien tutkimuslaitokselle Airi-ajettavuussimulaattorin muuttoon liittyen. Simulaattorilaitteiston siirto toiseen toimipisteeseen mahdollisti rakenteellisia muutoksia, jotka on selvitetty Diana Lehtosen opinnäytetyössä. Kahdessa jälkimmäisessä opinnäytetyössä oli tarkoitus keskittyä siirron mahdollistamiin muutoksiin simulaattorin mittausjärjestelyissä, ohjauksessa ja sähkökäytöissä. Otimme toisen projektiryhmän jäsenen Riku Jerkun kanssa opinnäytetöiden haasteet vastaan.

Metso Paper Oy:n Pansiossa sijaitsevalla ilmajärjestelmien tutkimuslaitoksella suoritetaan paperikoneiden ajettavuusjärjestelmien käytännön koeajoja ja mittauksia. Tutkimuslaitoksen toiminta siirtyy Raision toimipisteeseen vuoden 2012 syyskuussa. Muuton yhteydessä ajettavuussimulaattori jaetaan kahteen osaan; Airi-ajettavuussimulaattoriin ja OD-päällepuhallussimulaattoriin. Tässä opinnäytetyössä keskitytään ajettavuussimulaattorin siirron ja kahtiajaon mahdollistamiin mittausjärjestelmän ja -järjestelyiden kehitystöihin.

Simulaattoreista kerätään dataa erilaisista fysikaalisista ilmiöistä, joista tärkeimpiä ovat paineenmuutokset. Mittausjärjestelmä koostuu erilaisista antureista ja mittalaitteista, joiden käyttö on suurelta osin automatisoitu Tom Miuluksen vuonna 2010 valmistuneen opinnäytetyön aikana. Tällöin otettiin käyttöön LabVIEW-ohjelmointiympäristö. Mittaustoimintojen automatisointi nopeutti mittaus-työtä ja poisti paljon ongelmia, mutta uusi järjestelmä on todettu monelta osin monimutkaiseksi ja vaikeaksi sisäistää. Alustavissa keskusteluissa tutkimuslaitoksen henkilökunnan kanssa todettiin, että suuri osa mittausjärjestelmään liitty-



västä tiedosta on nykyisten ja entisten operaattoreiden päässä, joten osa opin-  
näytetyöstä tulisi keskittymään simulaattorin operointiin liittyvän materiaalin do-  
kumentointiin.

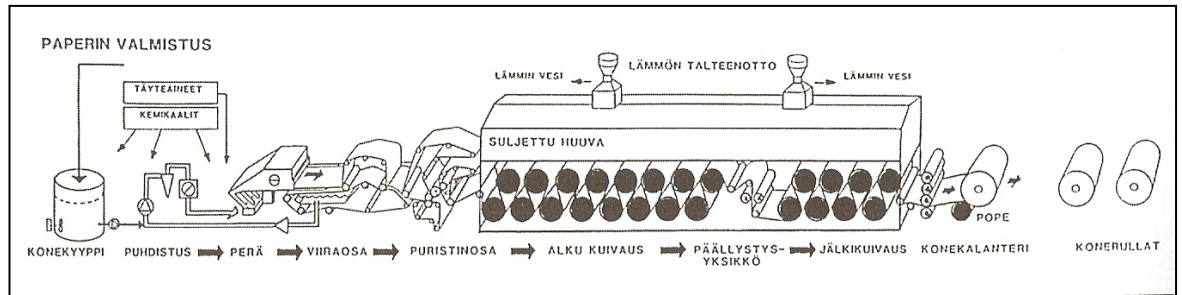
## 2 AJETTAVUUSTUTKIMUS

Termillä ajettavuus (engl. runnability) tarkoitetaan paperikoneen kykyä hallita paperirainan kulkua ja tuottaa laadukasta paperia suurillakin nopeuksilla. Ajettavuuden parantamiseksi paperikoneisiin on kehitetty ajettavuusjärjestelmiä. Erilaisia ajettavuusjärjestelmiä on ollut paperikoneissa käytössä 1980-luvulta asti. Ajettavuusjärjestelmien tutkimus- ja kehitystyön tuloksena on ajettavuuteen vaikuttavista tekijöistä saatu jatkuvasti tarkempaa tietoa. Työn tuloksena tuotantonopeudet ovat kasvaneet tasaisesti ja nykyaikaisilla paperikoneilla on mahdollista saavuttaa jopa 2000 m/min nopeuksia.

Ajettavuuteen vaikuttavat monet tekijät, mutta kuivatusosalla tärkeimpänä pidetään ilmanpaineen muutoksia ja adheesiota. Ilmavirtausten aiheuttamat painenvaihtelut kohdistavat rasiitusta paperirainaan ja sitä tukevaan kudokseen, viiraan. Viiran tehtävänä on tukea paperirainaa kuivatusprosessin aikana ja minimoida ilmavirtausten aiheuttama paperirainan lepattaminen, joka saattaa heikentää sen eheyttä.

### 2.1 Paperikoneen toiminta yleisesti

Nykyaikaisissa paperikoneissa paperirainan kuivatus suoritetaan pääsääntöisesti sylinterikuivatuksen avulla yksiviiraviennillä tuettuna. Kuvassa 1 esitetään paperinvalmistuksen prosessikuvaus. Paperikoneen alkupäätä, jossa paperirainaa muodostetaan syöttämällä märkää laimeaa kuituseosta viiraosalle, kutsutaan paperikoneen märkääpääksi. Viira on muovilangoista valmistettu kudokseksi, jonka tehtävänä on tukea paperirainaa samalla kun sulpun sisältämä vesi poistuu sen kudosten läpi. Viiraosalta raina viiedään puristinosalle, jossa sen kuiva-ainepitoisuus kasvaa noin 40-60 %:iin. Kuivatusosalla rainasta haihdutetaan edelleen vettä, jotta päästään paperin loppukosteuteen, joka paperilajista tai seuraavasta prosessista riippuen on tyypillisesti 3-10%.

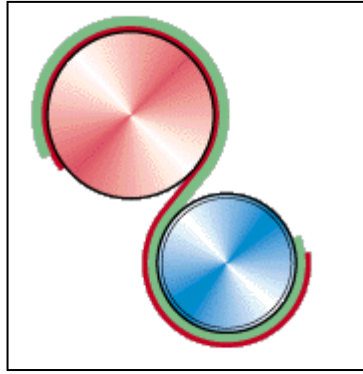


Kuva 1. Paperikoneen prosessikuvaus (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003).

## 2.2 Sylinterikuivatus

Usein paperikoneissa käytetään kuumia sylintereitä poistamaan vettä paperi- tai kartonkirainasta. Yleisimmin käytetään höyrysylintereitä, mutta lämmitys voidaan toteuttaa myös sähköllä tai öljyllä. Kuivatusprosessin kannalta sylinterikuivaimen tärkeimmät laitteet ovat kuivatussylinderit, Vac-telat sekä höyrynsyöttölaitteet ja lauhdevesijärjestelmä.

Kuivatussylinderien halkaisijat ovat tyypillisesti 1500 tai 1830 mm. Kuivatuksen aikana höyryä johdetaan tietyssä paineessa olevaan sylinteriin, jolloin höyry luovuttaa lämpönsä sylinterin seinämään ja lauhtuu vedeksi. Vac-tela on alipaineistettu tela, jolla luodaan imuvaikutus kuivatusviiran läpi rainaan paperirainaan. Näin paperiraina saadaan tehokkaammin pysymään kiinni viirassa. (KnowPap 2004). Kuvassa 2 on esitetty kuivatussylinderin ja Vac-telan yhdistelmä.



Kuva 2. Kuivatussylinderin ja Vac-telan yhdistelmä (KnowPap 2004).

### 2.3 Päällepuhalluskuivatus

Paperikoneiden kasvaneet ylläpitokustannukset ja kilpailukyvyn ylläpitäminen vaativat kuivatusosan jatkuvaa kehittämistä. Yksi ratkaisu kuivatustehon nostamiseksi on päällepuhalluskuivatusmenetelmä (engl. impingement drying). Menetelmän avulla saavutetaan moninkertainen kuivatusteho perinteiseen höyrylämmitteiseen sylinterikuivatukseen verrattuna.

Päällepuhalluskuivatuksessa n. 350 asteista ilmaa puhalletaan suurella nopeudella suoraan kohti paperirainaa. Puhalluksen aikana paperiraina kulkee viiran päällä, jolloin taataan parhaat mahdolliset olosuhteet lämmönsiirrolle ja haihtumiselle. Päällepuhallusyksiköiden määrä ja sijoitus kuivatusosalla on tapauskohtaista ja useissa tapauksissa päädytään yhdistämään päällepuhallusyksiköitä perinteisen sylinterikuivatuksen kanssa (KnowPap 2004). Kuvassa 3 nähdään Metso Paper Oy:n valmistama OptiDry Twin-järjestelmä, jossa käytetään päällepuhallusmenetelmää.



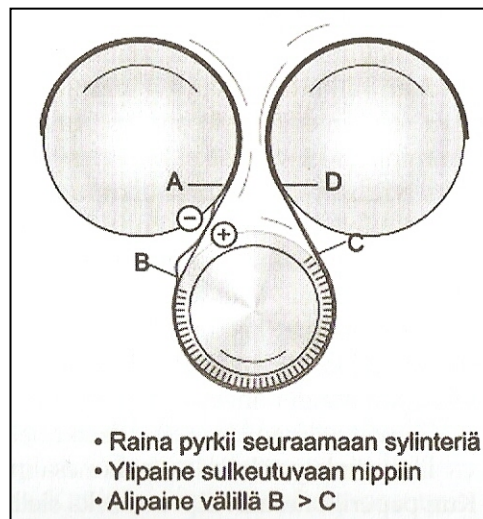
Kuva 3. OptiDry Twin (Metso.com 2012).

#### 2.4 Ajettavuuskomponenttien tutkimus- ja kehitystyö

”Paperikoneiden nousseet nopeudet ovat vaikuttaneet siihen, että kuivatusosan ajettavuudesta on tullut rajoittava tekijä tuotannon lisäämiselle monella paperikoneella” (Hägglom-Ahnger & Komulainen, 168). Nämä ajettavuusongelmat johtuvat suurelta osin sylinterien ja viiran ympärillä tapahtuvista ilmavirtauksista, jotka aiheuttavat paperirainaan epätoivottua lepatusta. Lepatusta estämään on kehitetty erilaisia laitteita, joiden ansiosta tuotantonopeuksia on kyetty nostamaan.

Suurin osa paperirainan katkoista tapahtuu puristinosan ja kuivatusosan välillä, koska tällöin raina sisältää vielä suuren määrän vettä. Puhalluslaatikoita on tämän takia kehitetty tukemaan paperirainan siirtoa puristimelta kuivatusosalle. Suurimmassa osassa nykyaikaisista paperikoneista käytetään yksiviiravientiin perustuvaa kuivatusosaa. Kuivatusosalla paperirainaa kuljetetaan kuivatussylinterien pintaa pitkin, joiden tehtävänä on haihduttaa rainan sisältämä ylimääräinen vesi ympäröivään ilmaan. Kuivatussylinterien lämmitys tapahtuu sylinterin sisälle johdetun kuuman höyryn avulla.

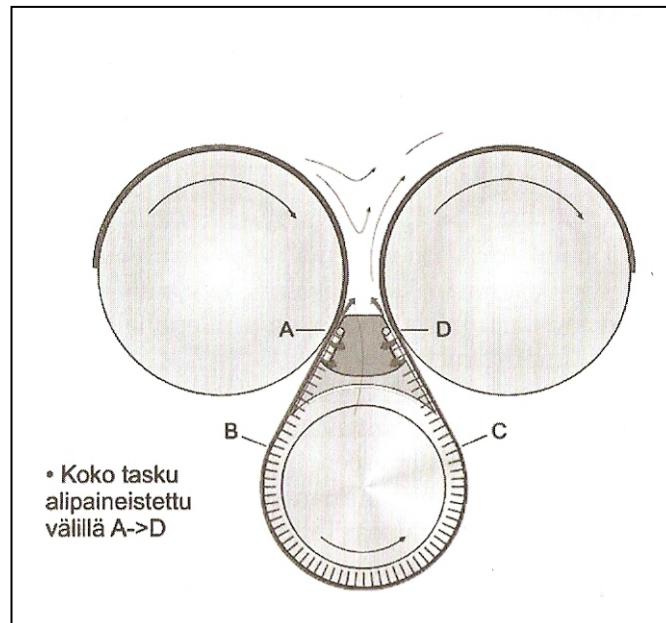
Viiran ja sylinterien nopeasti etenevät pinnat vetävät ilmaa mukanaan ja tästä liikkeestä johtuvat ilmavirtaukset synnyttävät ajettavuutta heikentäviä paineenvaihteluita sylinterien ja viiran väliin muodostuvaan nippiin (Kuva 2). Imutelaa lähestyttäessä sulkeutuvaan nippiin muodostuu ylipainetta, jonka seurauksena paperiraina pyrkii irtoamaan viiran pinnasta. Aukeavaan nippiin muodostuu vastaavasti alipainetta, jonka seurauksena paperirainalla on taipumus seurata sylinterin pintaa viiran sijaan. Paineenvaihteluiden lisäksi imutelalla paperirainaan kohdistuu myös haitallisia keskipakoisvoimia sylinterin nopeasta pyörimisliikkeestä johtuen. Kaikki nämä tekijät aiheuttavat ongelmia prosessin hallinnan kannalta ja saattavat vaikuttaa negatiivisesti paperin laatuun.



Kuva 4. Ajettavuutta heikentävät paineenvaihtelut (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003).

Kuvassa 3 nähdään eräs ratkaisu yksiviiraviennillä toteutetusta radanhallinnasta käyttäen ajettavuuslaitteen ja imusylinterin yhdistelmää. Ajettavuuslaite on suunniteltu minimoimaan viiran lepatus ja vakauttamaan paperirainaa.

Modernin paperikoneen kuivatusosa koostuu n. 40- 70 kuivatussylinderistä, joten kuivatusosan energiantarve on erittäin suuri. Useissa tapauksissa kuivatusosa on myös se kohta paperikoneessa, joka on erityisen altis paperiradan katkeamiselle. Tutkimus- ja kehitystyöllä pyritään parantamaan näitä kuivatusosalla ilmeneviä ongelmia, koska pienetkin parannukset luovat suuria säästöjä suuressa mittakaavassa (Metso Paper Oy intra-net 2012).



Kuva 5. Ajettavuuslaitteen ja imusylinterin yhdistelmä (Hägglom-Ahnger & Komulainen 2003).

## 2.5 Airi- ajettavuussimulaattori

Metso Paper Oy:n ilmajärjestelmien tutkimuslaitos on erikoistunut ajettavuusjärjestelmien tutkimus- ja kehitystyöhön. Tutkimuslaitoksen tiloissa suoritetaan käytännön koeajoja erilaisilla simulaattorilaitteilla, joilla simuloidaan kuivatusosan toimintoja. Ilmavirtauksiin ja ilmalaitteisiin liittyvät mittaukset suoritetaan

Airi-ajettavuussimulaattorilla. Airi-ajettavuussimulaattorilla mallinnetaan metrin levyistä kaistaletta paperikoneen sylinterikuivatusosaa (Kuva 5)

Airilla ajetaan 1000 mm leveää suljettua viiralenkkiä, jonka päällä voidaan tarvittaessa ajaa myös paperirataa. Ajonopeudet ovat säädettävissä portaattomasti välillä 0-2400 m/min.



Kuva 6. Airi-ajettavuussimulaattori.

### **OD-päällepuhallussimulaattori**

OD-päällepuhallussimulaattori on Airiin integroitu koelaitte, jolla suoritetaan luvussa 2.3 esiteltyyn päällepuhalluskonseptiin liittyviä mittaushankkeita (Kuva 7). Koelaitteessa on kolme uratelaa ja telojen välissä on samankaltaisia ajettavuuslaitteita kuin Airissa. OD on liitetty Airiin, jotta sitä pystytään käyttämään ilman erillistä käyttömootoria.





Kuva 7. OD-päällepuhallussimulaattori asennettuna Airi-ajettavuussimulaattoriin.

## 2.6 Ajettavuusjärjestelmien tutkimustyö Turun ammattikorkeakoulussa

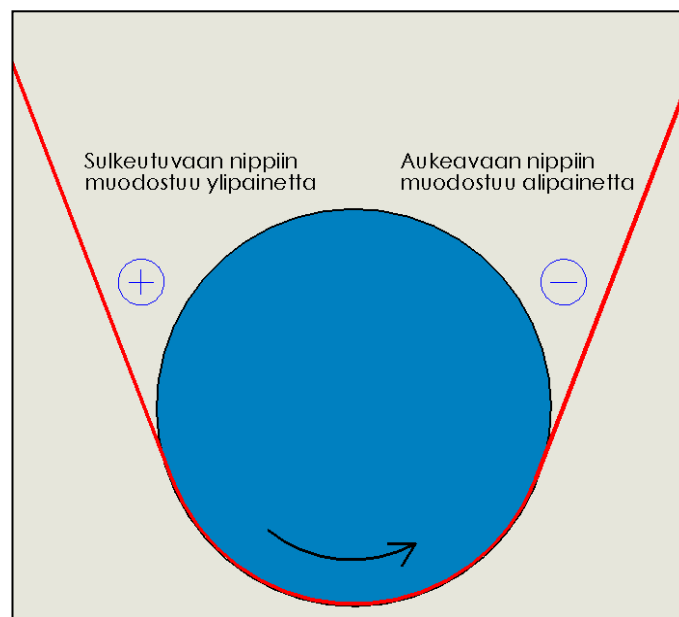
Vuodesta 2008 lähtien Turun ammattikorkeakoulu on ollut osallisena ajettavuustutkimuksissa monivaiheisen hankekokonaisuuden muodossa. Hankkeen toteutukseen on osallistunut vuoteen 2012 mennessä 7 erillistä opiskelijaryhmää eri koulutusohjelmista. Projektin tavoitteena on testata erilaisia variaatioita Metso Paperille patentoidun uratelamallin profiilissa, tallentaa tehdyt havainnot ja luoda havaintojen perusteella laskennalliset mitoitusperusteet uratelan tuotantokäyttöä varten.

Tutkimuslaitoksen omat simulaattorilaitteet ovat kooltaan niin suuria, että profiilivariaatioiden testaaminen ei ole käytännöllistä. Pienikokoisella koelaitteella kokeita voidaan suorittaa nopealla tahdilla häiritsemättä tutkimuslaitoksen arki-toimintoja. Projektin mittaustulokset on havaittu erittäin käyttökelpoisiksi ja erillinen koelaitte on mahdollistanut myös erilaisia kokeiluja ja parannuksia ajetta-

vuussimulaattoreiden mittausjärjestelmissä, joita on myöhemmin voitu soveltaa tutkimuslaitoksen omaan käyttöön.

### Pyörähdyspainemittaukset

Pyörähdyspainemittauksilla tarkoitetaan telan tai sylinterin pinnalla tapahtuvien painemuutosten mittaamista. Telan pyöriessä viiran mukanaan kuljettama ilma pakkautuu sulkeutuvaan nippiin muodostaen ylipainetta. Samaan aikaan aukeavaan nippiin muodostuu alipainetta (Kuva 8). Viiran nopeus, peittokulma, koostumus ja kireys vaikuttavat omalta osaltaan näiden paineilmäiöiden muodostumiseen. Telan pinnalle on asennettu nopea paineanturi, jonka avulla voidaan mitata paperirainaan vaikuttavien ilmanpaineiden käyttäytyminen sylinterin kuljettamalla matkalla

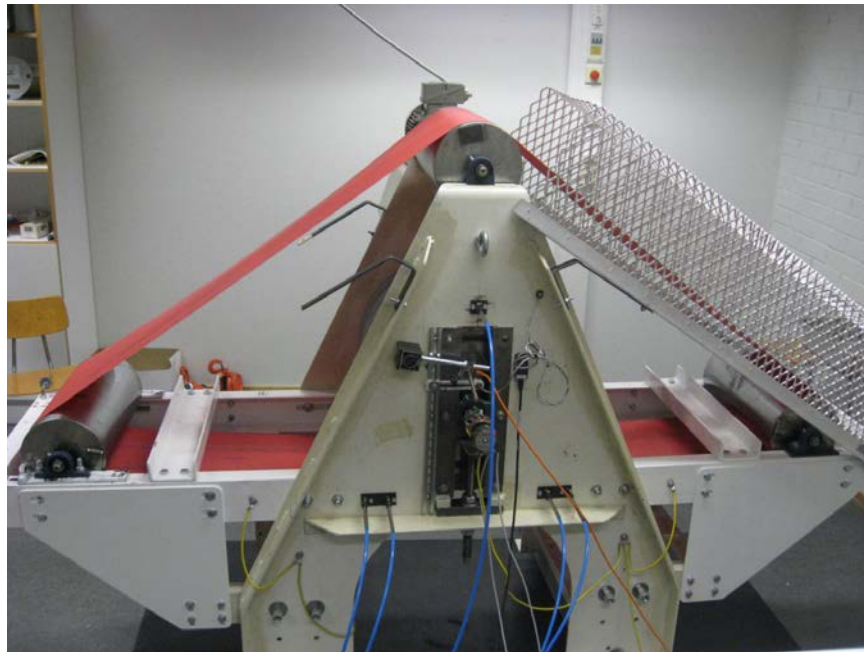


Kuva 8. Sulkeutuvaan ja aukeavaan nippiin muodostuvat paineet.

### Koelaitte

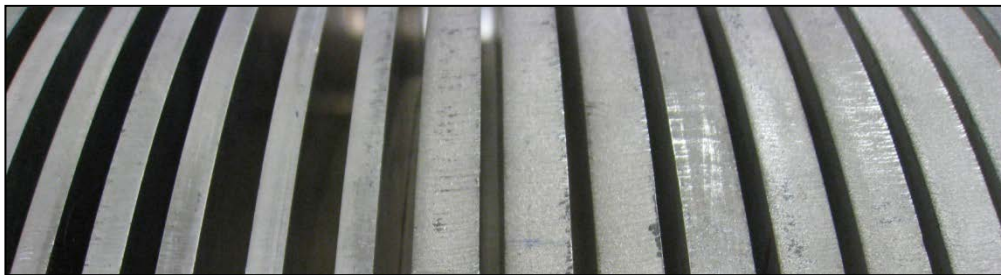
Koulun tiloihin on sijoitettu pienikokoinen koelaitte, jossa on kolme umpitelaa viiran kuljetusta varten ja yksi uratela, josta kerätään mittaustieto (Kuva 6). Koelaitteella ajetaan n. 400mm leveää viiralenkkiä 0-2000 m/min nopeudella.

Muuttujina laitteessa voidaan käsitellä ajonopeutta, viiran peittokulmaa, uratelan halkaisijaa, viiran ominaisuuksia sekä uran leveyttä ja syvyyttä. Uratela sijaitsee koelaitteen keskellä, vetotela ylimpänä ja laitteen sivuilla on kaksi johtotelaa. Näiden telojen asemaa vaihtamalla saadaan määrättyä viiran peittokulma uratelalla.



Kuva 9. Turun ammattikorkeakoulun tiloissa sijaitseva koelaitte.

Uratelan sylinteripinta muodostuu halkaisijaltaan eri kokoisista alumiinirenkaiden, jotka on kiinnitetty yhteen. Alumiinirenkaiden kokoa vaihtamalla saadaan varioitua sylinterin kokoa ja uran ominaisuuksia. Uratelassa tärkeimmät tarkkailtavat mitat ovat kannaksen leveys, uran leveys ja uran syvyys (Kuva 7). Uratelan pinnan profiilin muodolla pyritään kompensoimaan nippeihin muodostuvia ajettavuuden kannalta haitallisia paineenvaihteluita.



Kuva 10. Uratelan profiili.

### 3 MITTAUSTARPEET

Tässä luvussa tarkastellaan Airi-ajettavuussimulaattorin siirron mahdollisuuksia ja ongelmatilanteita mittausjärjestelmän ja -järjestelyiden suhteen. OD- päällepuhallussimulaattorista tulee rakenteellisesti oma laite, mutta mittaustarpeet ja -suureet ovat lähes identtiset Airin kanssa. Ensimmäinen tehtäväni oli selvittää nykyisen mittausjärjestelmän rakenne. Selvitys aloitettiin simulaattorin käyttäjien ja muiden tiimin jäsenten haastatteluilla. Tom Miuluksen vuonna 2010 valmistunut opinnäytetyö Airin mittausjärjestelmien kehityksestä ja virtuaaliinstrumentoinnista toimi selvityksessä suurena apuna, koska suuri osa simulaattorin laitteiston asennustöistä on tehty pienissä osissa ja dokumentoitu puutteellisesti. Selvitystyön tuloksia käytetään myöhemmin kehityssuunnitelman ja toteutuksen tukena.

Simulaattoreista kerätään dataa erilaisista fysikaalisista ilmiöistä, joista tärkeimpiä ovat paineenmuutokset.

Simulaattoreiden mittauskohteet ovat:

- sylintereiden pyörähdyspainemittaukset kuivatus- ja imusylintereissä
- ajettavuuslaitteen paineet ja ilmavirrat
- viiran nopeus
- ilman lämpötila.

Järjestelmästä voidaan kerätä dataa kaikista listatuista ilmiöistä. Kahdesta taskusta ja kahdelta sylinteriltä voidaan suorittaa rinnakkain erillisiä mittauksia.

Mitattavat paineet voidaan jakaa kahteen kategoriaan ilmiöiden nopeuden perusteella. Dynaamisilla pyörähdyspainemittauksilla pyritään keräämään tietoa erittäin nopeasti tapahtuvasta ilmiöstä sylinterin pinnalla. Hitaampiin ilmiöihin kuuluvat staattisen paineen, paine-eron ja ilmamäärän mittaukset.

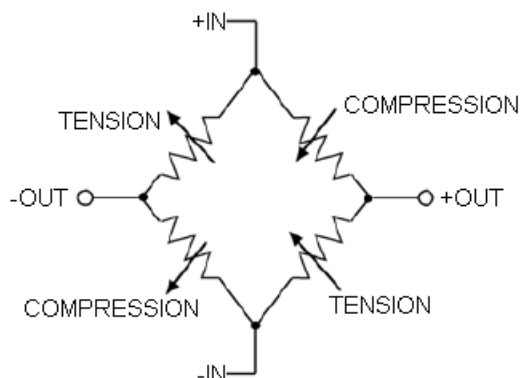
### 3.1 Pyörähdyspainemittaukset

Dynaamiset pyörähdyspaineet syntyvät viiran ja sylinterin pinnan välisestä liikkeestä sekä ajettavuusjärjestelmien aiheuttamista alipaineista viiran pinnan läpi. Mittauksia suoritetaan joko paljaalla tai paperilla päällystetyllä viiralla. Mitattavat paineet ovat suuruudeltaan noin  $\pm 100\text{-}20\ 000\ \text{Pa}$  (0,0001-0,2 bar). Pyörähdyspaineiden muodostumista käsiteltiin tarkemmin luvussa 2.4.

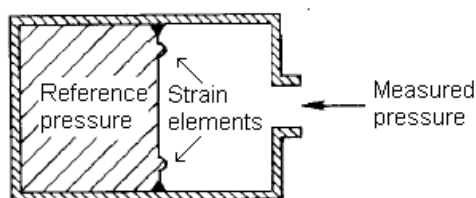
#### **Pyörähdyspaineantureiden toiminta ja asennus**

Pyörähdyspaineantureina käytetään piezoresistiivisiä paineantureita. Anturin toiminta perustuu puolijohdeilla toteutettuun venymäliuskaan. Piezoresistiivinen toimintaperiaate mahdollistaa anturin erittäin pienen koon, korkean herkkyyden sekä erittäin hyvän soveltuvuuden nopeisiin dynaamisiin mittauksiin. (Miulus 2010, 10)

Anturin toiminta perustuu puolijohde-elementtien muodostamaan wheatstone-siltaan. Kuvassa 8 on esitetty wheatstone -siltakytkeä ja kuvassa 9 on esitetty venymäsillan sijainti anturin sisällä. (Miulus 2010,11). Puolijohde-elementteihin kohdistuvat ulkoiset paineenvaihtelut saavat sillan resistiivisen tasapainon muuttumaan ohmin lain mukaisesti. Sillan ulostulosignaaliin muodostuu anturin ulkoiseen paineeseen verrannollinen muutos. Anturin sillan herkkyys on 25 mV/V, joten käytettäessä suositeltua kymmenen voltin syöttöjännitettä ulostulosignaali on n. 250 mV.



Kuva 11. Kulite XCS-anturin wheatstone-siltakytkentä (Miulus 2010).



Kuva 12. Venymäsillan sijoittelu Kulite XCS-anturin sisällä (Miulus 2010).

”Anturin suositeltu käyttöalue on  $\pm 35000$  Pa ja vastaava sillan jännitemuutos  $\pm 100$  mV (Full scale output = FSO). Painealueen ja sähköisen signaalin suhteeksi saadaan tällöin  $\pm 1$  mV/350 Pa. Anturin signaalin ulostulojännite muodostuu siten anturin sillan herkkyuden, käytettävän syöttöjännitteen ja anturiin vaikuttavan ulkoisen paineen suuruudesta. Tässä tapauksessa ulostulosignaalin jännite on ilmanpaineesta riippuen n. 150-350 mV.” (Miulus 2010, 11)

### Pyörähdyspaineantureiden soveltuvuus dynaamiseen ympäristöön

Tutkimuslaitoksen simulaattorilaitteissa pyörähdyspaineanturit ovat käytössä erittäin dynaamisessa ympäristössä. Sylinterin halkaisijasta riippuen sylinterien ja täten myös antureiden pyörimisnopeus on 7-15 kierrosta sekunnissa. Tom Miuluksen opinnäytetyössä on tarkemmin tarkasteltu anturin soveltuvuutta näihin haastaviin olosuhteisiin. Pyörähdyspainesignaalin ei ole täydellistä jaksoa,

josta signaalin taajuuden voisi täsmällisesti määrittää, joten taajuuden approksimointi on suoritettu signaalin nousuaikojen ja muiden perusteiden pohjalta. Soveltuvuutta on tarkasteltu seuraavilla osa-alueilla:

- anturin asennustavasta aiheutuvan resonanssitaajuuden määrittäminen
- anturin lineaarisen taajuuskaistan laskenta
- anturin dynaamisen nousuajan laskenta
- anturin soveltuvuus tutkimuslaitoksen käyttökohteisiin.

### Anturin lineaarinen taajuuskaista

Mitattavan painesignaalin jaksonaika, jota anturi pystyy lineaarisesti seuraamaan  $\pm 5\%$  tarkkuudella, Miulus (2010, 13) laskee seuraavasti.

$$T = \frac{1}{0,2 * F_{n\ sensor}} \quad T = \frac{1}{0,2 * 150000 \text{ Hz}} = 33,3 \mu\text{s} \approx 33,3 \text{ kHz}$$

Kaavan avulla lasketusta arvosta voidaan päätellä, että anturilla voidaan mitata 30 kHz:n taajuisia painesignaalia ilman merkittävää dynaamista virhettä.

### Resonanssitaajuuden määrittäminen

Käytännön mittauksien kannalta tarkempien dynaamisten ominaisuuksien tarkastelut tehdään valmistajan ilmoittamien kaavojen ja käytettävän anturin 150 kHz:n resonanssitaajuuden avulla.

Tutkimuslaitoksen tutkimushankkeissa pyörähdyspaineantureita on asennettu sylintereihin eri tavoin riippuen sylinterin pinnan profiilista ja asennustavan vaikutuksesta tuloksiin. Asennustavoissa tärkeimmät muuttujat ovat olleet asennusreiän halkaisija, upotussyvyys ja anturin mittapään etäisyys sylinterin pinnasta.

Miulus (2010, 12) tarkastelee insinööriytössään asennuksen vaikutusta anturin toimintaan käyttäen anturivalmistajan Internet-sivuilta löytyvän perusohjeen pe-



rusteella. Ohjeen avulla hän määrittää pörähdyspaineantureiden nykyisestä asennustavasta johtuvan resonanssitaajuuden käyttäen suljetun putken resonanssitaajuuden laskentakaavaa.

$$F_{n\text{putki}} = \frac{c}{4L}, \frac{3c}{4L}, \frac{5c}{4L}, \text{ jossa } = \frac{1}{0,2 * 150000 \text{ Hz}} = 33,3 \mu\text{s} \approx 33,3 \text{ kHz}$$

$$c = \text{äänen nopeus} \left( 331,45 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ at } 0^\circ \text{C} \right) \mp \frac{0,6 \text{ m/s}}{^\circ\text{C}}$$

$L = \text{putken pituus (mm)}$

Anturivalmistajan ohjeen mukaan mitattavan signaalin taajuus tulee pysyä alle 20 % lasketusta resonanssitaajuudesta. Pyörähdyspaineanturin lineaarinen taajuuskaista määritettiin olevan 30 kHz, joka on samalla käytännössä mitattavissa olevan painesignaalin suurin taajuus. Jos mitoituksen perusteena käytetään laskettua 30 kHz:n lineaarista taajuuskaistaa, voidaan resonanssitaajuuden alarajana pitää valmistajan anturille ilmoittamaa 150 kHz resonanssitaajuutta. Näiden tietojen perusteella voidaan todeta, että lineaarinen taajuuskaista on alle 20 % resonanssitaajuudesta, joten anturin asennustapa ei aiheuta merkittävää virhettä mittaustuloksiin (Miulus 2010, 12)

### Anturin nousuajan laskenta

Anturin nousuaika on, jonka kuluessa signaali saavuttaa 63 % arvon mitattavasta paineesta (Mattsson 2011). Pyörähdyspaineanturin nousuaika lasketaan seuraavasti.

$$t = \frac{1}{0,8 * F_{n\text{sensor}}} \quad t = \frac{1}{0,8 * 150000 \text{ Hz}} = 8,4 \mu\text{s}$$

Tutkimuslaitoksen simulaattoreiden maksiminopeus on 2400 m/min, joten 8,4 mikrosekunnin nousuaika vastaa n. 0,3 mm viiran kulkemaa matkaa (Miulus 2010, 13).

## **Anturin soveltuvuus tutkimuslaitoksen käyttökohteisiin**

Laskelmien ja kokemusten perusteella anturin dynaamista suorituskykyä voidaan pitää hyvänä jopa simulaattoreiden maksiminopeuksilla. Tällöinkin anturi kykenee reagoimaan painetason vaihteluun n. 0,3 millimetrin viiran kulkemalla matkalla. Tarkastelusta huomataan myös, että anturin asennustavalla on vaikutusta mittaustuloksiin. Tämä tulee ottaa huomioon aina uutta mittaushanketta aloitettaessa.

### **3.2 Mittaustoiminnan komponentit**

Tässä luvussa selvitetään mittaustoiminnassa käytettävien komponenttien ja mittauslaitteiden toimintaa.

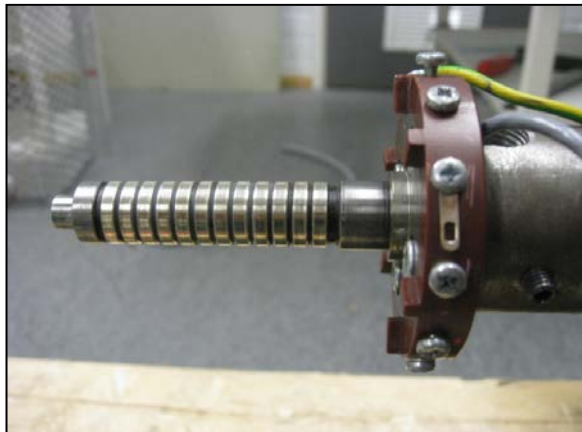
#### **3.2.1 Liukurengaspakka**

Sylinterien nopea pyörimisliike asettaa haasteita pyörähdyspainesignaalien mittaamiselle ja sähköisen viestin kuljettamiselle ilman häiriöitä. Tutkimuslaitoksella ratkaisuna on käytetty liukurengaspakkoja. Pyörähdyspaineantureiden jänniteviesti kuljetetaan johtimia pitkin sylintereiden keskiakselin sisään ja sitä kautta akselin päässä sijaitsevalle liukurengaspakalle. Liukurengaspakassa jänniteviesti siirretään hiiliharjakontaktin välityksellä eteenpäin mittalaitteille.

Liukurengaspakan avulla toteutettu hiiliharjakontakti ei ole ihanteellinen tapa siirtää pyörähdyspainesignaalien matalatehoista jännitesignaalia, mutta kokemuksen perusteella tulokset ovat riittävän tarkkoja ja pakat kestävät käyttöä hyvin.



Kuva 13. Liukurengaspakan pesä.



Kuva 14. Liukurengaspakan akselipää.

### 3.2.2 Dewetron siltavahvistin

Pyörähdyspaineantureiden signaalien vahvistus tapahtuu Dewetron Bridge-b siltavahvistimella. Vahvistinkortit on asennettu erilliseen Dewe-30-4 moduuliin (Kuva 12)



Kuva 15. Dewe-30-4 moduuli ja vahvistinkortit.

Vahvistinta pidetään yleisesti anturin jälkeen tärkeimpänä komponenttina signaali-kohinasuhteen laadun kannalta. Dewetron bridge-b siltavahvistimessa on anturin käyttöjännitteen syöttö sekä sillan ulostulojännitteen vahvistus. Vahvistimen ominaisuuksiin kuuluu myös mahdollisuus signaalin alipäästösuodatukselle sekä signaalin nollaukselle. Vahvistimella on kiinteä ulostulon jännitealue, joka on  $\pm 5$  V.

Tutkimuslaitoksella on jo pitkään ollut käytössä Dewetronin valmistamia silta-vahvistimia ja niiden soveltuvuudesta pyörähdyspainesignaalien vahvistamiseen on tehty useita mittauksia ja testejä. Miulus (2010) on opinnäytetyössään tarkastellut vahvistimien ominaisuuksia eri asetuksilla kokeellisesti sekä laskennallisesti. Soveltuvuutta on tarkasteltu seuraavilla osa-alueilla:

- vahvistimen dynaamiset ominaisuudet
- vahvistimen vahvistuskertoimen laskenta
- vahvistimen alipäästösuodatuksen asetukset
- pyörähdyspainesignaalin nollatason ryömintä.

## Vahvistimen dynaamiset ominaisuudet

Luvussa 3.2.1 pyörähdyspaineanturien ominaisuuksien selvitykseen käytetty anturivalmistajan dynaamisiin mittauksiin soveltuva perussääntö tulee ottaa huomioon myös vahvistimen taajuuskaistan kohdalla. Säännön vaatimuksena oli, että vahvistimen taajuuskaistan tulee olla viisi kertaa suurempi kuin vahvistettavan signaalin taajuus. Verrattaessa pyörähdyspaineanturin 30 kHz:n lineaarista taajuuskaistaa vahvistimen 200 kHz:n dynaamiseen taajuuskaistaan voidaan vahvistimen dynaamisia ominaisuuksia pitää riittävänä nykyisissä käyttökohteissa (Miulus 2010, 14)

## Vahvistimen vahvistuskertoimen laskenta

Vahvistimen vahvistuskertoimen riippuu syöttöjännitteestä sekä anturin sillan herkkyydestä ja se määritetään jakamalla vahvistimen kiinteän ulostulon jännitealue anturin käyttämällä jännitealueella. Pyörähdyspaineanturin sillan herkkyys on 25 mV/V ja käyttöjännite 10 V

$$x = \frac{\text{output}}{\text{input range}} \quad x = \frac{\mp 5000\text{mV}}{\mp 250\text{mV}} = 20$$

Pyörähdyspaineanturin ulostulojännitteen ja paineen suhteen määritettiin luvussa 3.2.1 olevan  $\pm 1 \text{ mV}/350 \text{ Pa}$ . Täten 1 mV:n muutos anturin ulostulossa vaati 350 Pa:n paineen muutoksen. Vahvistuksen jälkeen vastaava painemuutos on mitattavissa 20 mV:n muutoksena jännitesignaaliassa (Miulus 2010, 13)

## Vahvistimen alipäästösuodatuksen asetukset

Alipäästösuodatin on yleinen ns. anti- aliassuodatin, jolla parannetaan signaali-kohinasuhdetta suodattamalla mitattavaa signaalia. Alias -ilmiötä käsitellään tarkemmin luvussa 4.5.7. Dewetron siltavahvistimessa on mahdollista määrittää

alipäästösuodatuksen taajuusrajat käsin. Tutkimuslaitoksella on päädytty kokeilujen jälkeen käyttämään 30 kHz:n taajuutta alipäästösuodatuksessa, suodattimen jyrkkyyden ollessa 12 dB/oktaavi. Tällöin alipäästösuodatin vaimentaa signaalista kaikki 30 kHz:n ylittävät taajuudet jyrkkyydellä 12 dB/oktaavi. Miulus (2010, 16) toteaa, että tätä suodatusasetusta voidaan pitää hyvin perusteltuna pyörähdyspaineantureiden dynaamisten tarkastelujen perusteella. Lisäksi hän toteaa, että seuraava käytettävissä oleva suodatustaajuus, 10 kHz, aiheuttaisi mitattavaan signaaliin merkittäviä vääristymiä.

### **Signaalin nollaus**

Signaalin nollauksella tarkoitetaan vahvistimen jälkeen mitattavan jännitteen asettamista nollassoon. Nollaus on loogista suorittaa anturin kun anturiin kohdistuu pelkästään tilassa vallitseva ilmanpaine. Ilmanpainetta vastaava anturin ulostulojännite asetetaan vahvistimen ulostulossa vastaamaan dynaamisten mittausten lähtötilannetta. Tutkimuslaitoksella nollaus suoritetaan vahvistinkortissa sijaitsevasta ohjausnäppäimestä, mutta nollaus on mahdollista tietokoneeseen kytkettynä myös ohjelmallisesti.

”Nollauksen jälkeen anturiin kohdistettavasta ilmanpaineesta poikkeava paine muuttuu vahvistimen ulostulojännite  $n. \pm 20 \text{ mv}/350 \text{ Pa.}$ ” (Miulus 2010, 17).

#### **3.2.3 Oskilloskooppi DSO 5014A pyörähdyspainemittauksissa**

Pyörähdyspaineita mitataan ja tallennetaan nelikanavaisella Agilent Oy:n valmistamalla digitaalisella oskilloskoopilla. Yhdeltä sylinteriltä vastaanotetaan sekä triggaussignaali, että pyörähdyspaineanturin signaali, joten oskilloskoopilla voidaan täten mitata pyörähdyspainesignaaleita kahdelta sylinteriltä samanaikaisesti. Oskilloskoopissa on mittaustoimenpiteiden aikana käytössä high-resolution asetukset.

Oskilloskoopin sisäisen muistin koko on 1 Mt (megatavu). Noin puolet tästä muistista on varattu oskilloskoopin esitriggeraustoimintoa varten ja loput on jaettu neljän mittauskanavan kesken. Mittaustulosten tallentamiseen jää siis käytännössä 125 kt jokaista kanavaa kohti.

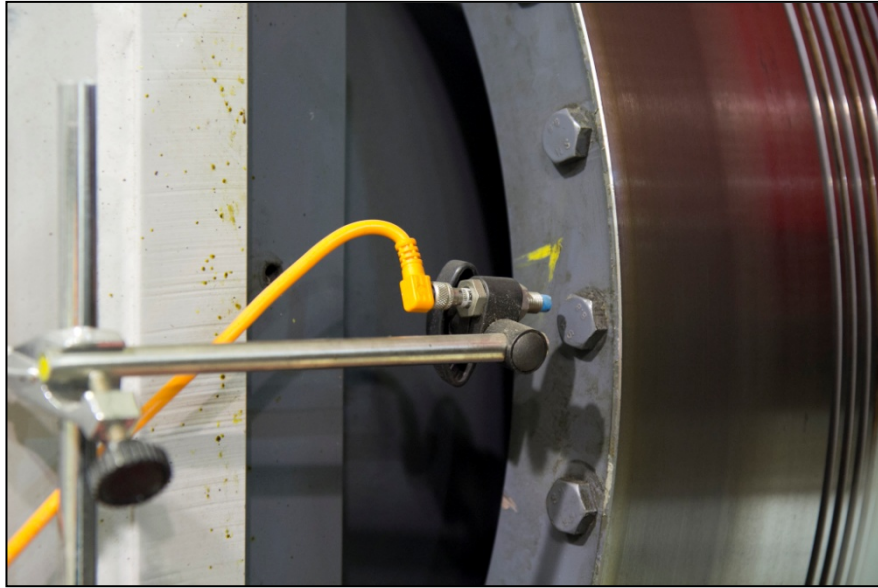
Oskilloskoopin ADC-muuntimen kvantisointinopeus muuttuu valitun mittausajan mukaan siten, että muistin käyttö on aina 100 %. ”Esimerkiksi jos valittu mittausaika on 0,5 s, muodostuu ADC-muuntimen kvantisointinopeudeksi 2 MS/s. Tällä tavoin oskilloskooppi käyttää sisäistä muistia mahdollisimman tehokkaasti tallentamalla aina mittaussekvenssin aikana yhden megatavun edestä mittausnäytteitä.” (Miulus 2012, 21)

Oskilloskoopin analoginen taajuuskaista ylettyy 100 MHz:iin asti, joten voidaan todeta, että luvussa 3.2.2 selvitettyt dynaamiset vaatimukset täyttyvät. Oskilloskoopin ADC-muuntimen (analog-digital-converter) maksiminopeus on 2 GS/s (giga Sample/s), mutta käytössä saavutettu maksiminopeus muodostuu mittaussekvenssin pituudesta sekä sisäisen muistin määrästä. ADC-muuntimen digitoima signaali on saatava tilapäisesti tallennettua oskilloskoopin sisäiseen muistiin, joten mittaussekvenssi tulee mitoittaa sen mukaisesti (Agilent 2012)

#### 3.2.4 Induktiivinen lähestymisanturi triggerikäytössä

Triggauksella eli liipaisulla tarkoitetaan hetkeä, jolloin oskilloskooppi aloittaa mittaamaan pyörähdyspaineanturilta saamaansa tietoa. Triggauksen aloittamiselle määritetään jokin ehto, yleensä triggeraussygnaalien nouseva tai laskeva reuna tai jokin tietty jännitetaso.

Airin mittaussovelluksessa käytetään erillisiä triggerauskanavia, joissa mittaus on määritetty alkavaksi kun signaalien jännitetaso ylittää 5 V. Triggeraasantureina käytetään induktiivisia lähestymisantureita (Kuva 13). Kaikkiin mitattavien sylinterien pätyyn on asennettu korotettu nasta, jonka anturi havaitsee.



Kuva 16. Triggasanturi asennettuna Pansion tutkimuslaitoksella.

### 3.2.5 Paine-erolähettimet

Simulaattorilaitteiden ajettavuuslaitteilta mitataan useasta eri pisteestä sekä staattisia paineita, että ilmanvirtauksia. Tutkimuslaitoksella käytettävät paine-erolähettimet ovat Rosemount merkkisiä. Lähettimien ulostulosignaali on standardi virtaviesti, 4-20 mA (Rosemount 1993). Virtausmittauksissa käytetään lähettimien lisäksi erikokoisia mittarenkaita, joiden avulla paine-erosta saadaan määritettyä ilmavirtauksen suuruus.

Paine-erolähettimien toiminta perustuu kalvotyypin anturointiin. Kalvoon kummallekin puolelle johtaa painekanava, johon voidaan kiinnittää impulssilinja. Kun toinen kanava jätetään auki, voidaan mitata paine-ero suhteessa ilmanpaineeseen. Paine-erolähettimet on asennettu simulaattorilaitteen alla sijaitsevaan syvennykseen, josta painekanavat on kytketty mittapisteisiin (Kuva 14).





Kuva 17. Rosemount paine-erolähettimeiden asennus Pansion tutkimuslaitoksella.

### 3.2.6 Dataloggeri paine-eromittauksissa

Paine-erolähettimeiden signaalien vastaanottamiseen käytetään tiedonkeruulaitetta eli ns. dataloggeria. Paine-erolähettimeiden virtaviesti muutetaan vastuskytkennällä dataloggerin inputissa jänniteviestiksi 2-10 V, koska dataloggeri ei voi vastaanottaa virtaviestejä. Tutkimuslaitoksella vastuskytkennöissä käytetään 500 ohmin vastuksia.

Dataloggeriin on mahdollista liittää enintään kolme mittauskorttia, joissa on 16 - 22 tallennuskanavaa. Tutkimuslaitoksella käytössä on ollut yksi 22 kanavainen multiplexer mittauskortti paine-erolähettimeiden signaaleja varten ja toinen 16 - kanavainen mittauskortti lämpötila-antureiden signaaleja varten.

Dataloggerin ADC-muuntimen kvantisointinopeus on 60 S/s ja tämä nopeus täytyy jakaa kaikkien mitattavien kanavien kesken. Suhteellisen hitaasta kvantisointinopeudesta huolimatta dataloggeri sopeutuu paine-eromittauksien kal-

taisten hitaasti muuttuvien ilmiöiden mittaamiseen. Dataloggerin mittaustoimintaa ohjataan PC:ltä ohjelmallisesti USB-väylän välityksellä. (Miulus 2010, 28)

### 3.2.7 Lämpötilamittaukset

Mittausprosessin aikana ympäristön lämpötilaa mitataan PT-100 vastuslämpötila-anturilla. Mitattavat paineet ovat suuruudeltaan suhteellisen pieniä, joten suuri lämpötilan vaihtelu mittaushankkeiden välillä saattaa vääristää tuloksia. Lämpötila-antureiden signaalit vastaanotetaan dataloggerin mittauskortilla ja tulokset siirretään automaattisesti jokaisen mittatiedostoon. Dataloggeriin on mahdollista liittää kaksi lämpötila-anturia, mutta useimmiten käytössä on vain yksi anturi.

### 3.3 Mittaussovellus

Mittaustoiminta on suurelta osin automatisoitu Tom Miuluksen 2010 valmistuneen opinnäytetyön aikana. Aikaisemmin mittauslaitteita on jouduttu säätämään mittaustoimenpiteiden aikana ja tulokset on kirjattu suurelta osin käsin. Automatisoinnin jälkeen simulaattorilaitteen operaattori sijoittaa paineilmaletkut ja triggerianturit haluamiinsa mittauspisteisiin ja valmistelee mittauslaitteet, mutta tämän jälkeen hän hallitsee mittaustoimintoja lähes yksinomaan pöydällä sijaitsevalta PC:ltä. Mittaustapahtumasta syntynyt data tallentuu PC:n kovalevylle, josta se siirretään USB muistitikulle jatkokäsittelyä varten.

”[Tom Miuluksen] opinnäytetyön lopputuloksena simulaattorin mittausjärjestelmän toimivuutta saatiin kehitettyä kokonaisuutena varmemmaksi sekä mittaus-tarkkuutta parannettua. Virtuaali-instrumentoinnin ja LabVIEW-ohjelmointiympäristöllä toteutetun mittaussovelluksen avulla mittausjärjestelmän toiminta saatiin automatisoitua yksinkertaisemmaksi sekä tehokkaammaksi.” (Miulus 2010, 2)

Sovelluksen avulla järjestelmän erilliset mittausinstrumentit virtuaali-instrumentoitiin tietokonepohjaiseksi tiedonkeruujärjestelmäksi. Mittausinstru-

mentit ovat näin käytettävissä virtuaali-instrumentteina LabVIEW- ohjelmointiympäristössä.

### 3.3.1 LabVIEW-ohjelmointi lyhyesti

LabVIEW on National Instrumentsin kehittämä ohjelmointiympäristö, joka on kehitetty erityisesti tekniikan ja tieteen aloja varten. Ohjelmointiympäristöön on pyritty sisällyttämään yleisiä toiminnallisuuksia, jotta voidaan vähentää kehitystyöhön ja simulointiin käytettävää aikaa. Ohjelmointi perustuu graafiseen G-kieleen, jossa tietovuon kulkua esitetään visuaalisesti johdottamalla eri toimilohkojen kytkennät. Yksittäistä ohjelmaa kutsutaan Virtuaali -instrumentiksi eli VI:ksi. VI koostuu käyttöpaneelistä (front panel) sekä lohkokaaviosta (block diagram). Ohjelmakoodia muokataan lohkokaaviosta ja käyttöpaneelissa sijaitsevat käyttöliittymään sijoitettavat kontrollit ja indikaattorit. (Bishop, 2010, 53)

LabVIEWillä rakennetut sovellukset kasvavat usein niin laajoiksi, että ohjelma joudutaan rakentamaan useammasta pienemmästä ohjelmakokonaisuudesta, eli aliohjelmasta. LabVIEW-ohjelmoinnissa aliohjelmien käyttö on suositeltavaa myös siitä syystä, että aliohjelmista on mahdollista rakentaa hyvin helposti muokattavia ikoneita, joiden käyttö yksinkertaistaa pääohjelman rakennetta. Esimerkiksi tutkimuslaitoksella käytössä olevassa AIRI.exe mittaussovelluksessa oskilloskoopin ohjaus, viirannopeuden laskenta ja mittatiedostojen luonti ovat kaikki omia itsenäisiä ohjelmakokonaisuuksiaan.

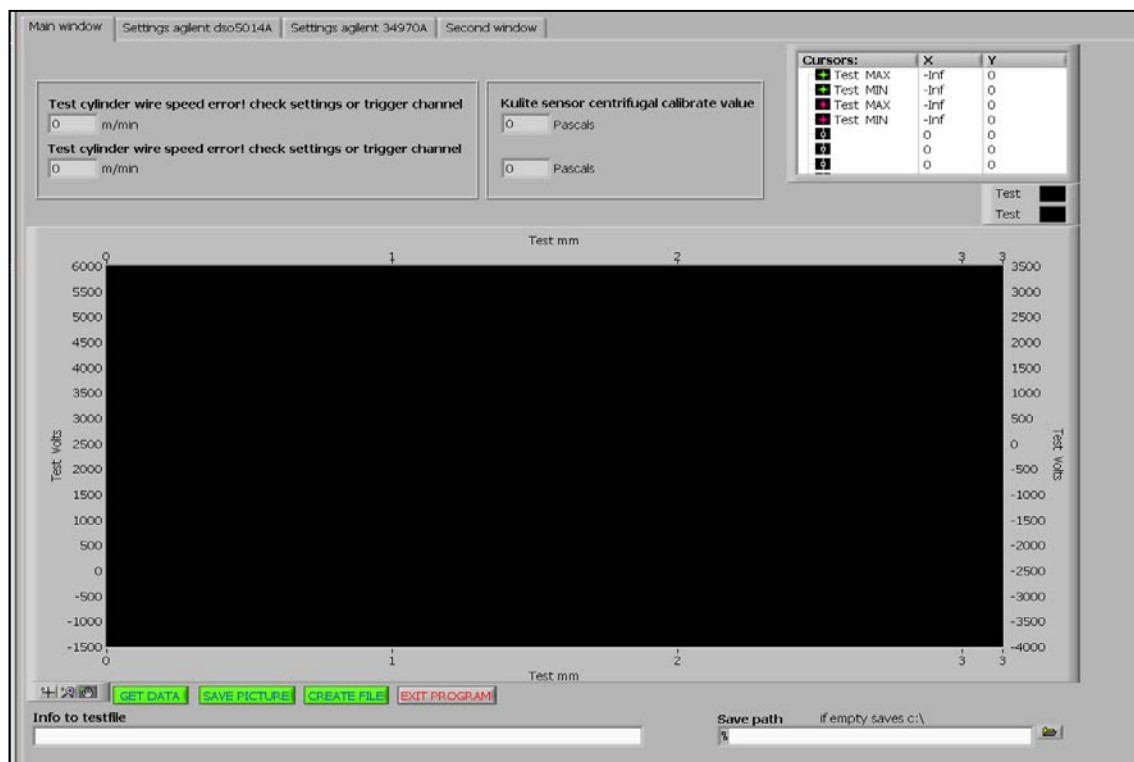
### 3.3.2 AIRI.exe-mittaussovelluksen toiminta

AIRI -mittaussovelluksella ohjataan mittausinstrumenttien toimintaa mittaustoiminnan aikana ja luodaan kerätystä datasta tarvittavat mittaustiedostot. Mittausinstrumenttien ja PC:n väliseen I/O kommunikointiin käytetään VISA-ajureita (Virtual-Instrument Software Architecture). Oskilloskooppi kommunikoi PC:n kanssa USB-väylän ja dataloggeri GPIB-väylän (General Purpose Interface Bus) välityksellä

Mittaussovelluksen toimintaa ohjataan käyttöpaneelilla, joka on jaettu neljään eri välilehteen:

- main window
- settings agilent dso 5014A
- settings agilent 34970A
- second window.

Main window-välilehdelle on sijoitettu kaikki mittausajojen aikana tarvittavat painikkeet ja näytöt, joilla ohjataan sovelluksen päätoimintoja. Käyttäjä voi määrittää muodostettavaan tekstitiedostoon otsikon sekä tallennuspolun paneeli alareunasta löytyvillä kirjoitusalueilla. Datankeruu tapahtuu get data ja create testfile näppäimillä. Get data painiketta painettaessa oskilloskooppi ja dataloggeri suorittavat asetusten mukaiset mittaus-toiminnot ja siirtävät kerätyn datan sovelluksen välimuistiin. Samalla välilehden näytölle piirtyy kuvaaja mittaus-toiminnan aikana kerätystä pyörähdyspainedatasta. Käyttäjä voi tämän jälkeen halutesaan luoda mittaus-tiedoston, joka tallentuu käyttäjän määrittämään osoitteeseen tietokoneen kovalevylle.



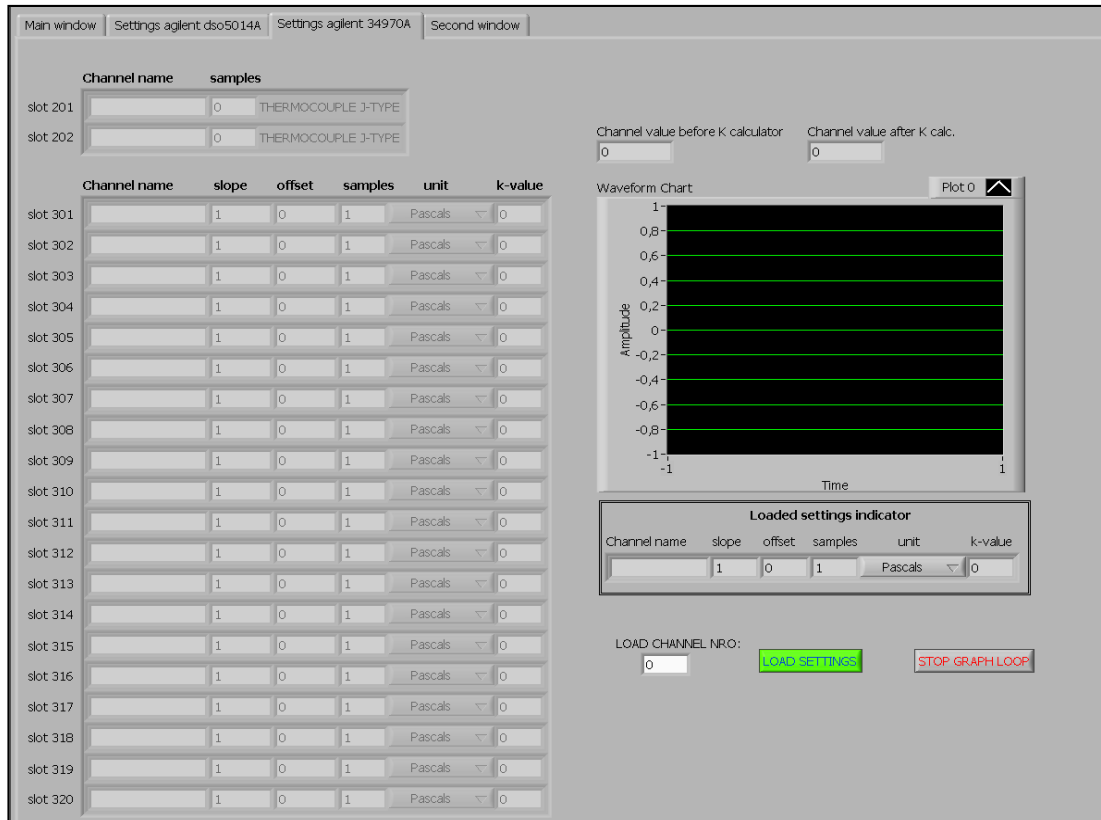
Kuva 18. AIRI-mittaussovelluksen Main window välilehti.

Settings agilent DSO5014A-välilehdessä määritellään kaikki oskilloskoopin suoritettuihin mittauksiin liittyvät arvot, kuten kanavien nimet ja sylinterien halkaisijat. Custom cursor painikkeilla voi lisätä main window-välilehden graafiselle näytölle erillisiä kursoreita. Pyörähdyspainesignaalien testaus tapahtuu oskilloskoopin rollmode toiminnon avulla. Rollmode painiketta painamalla triggeri- ja pyörähdyspaineantureiden signaalit päivittyvät oskilloskoopin näytölle reaaliajassa.



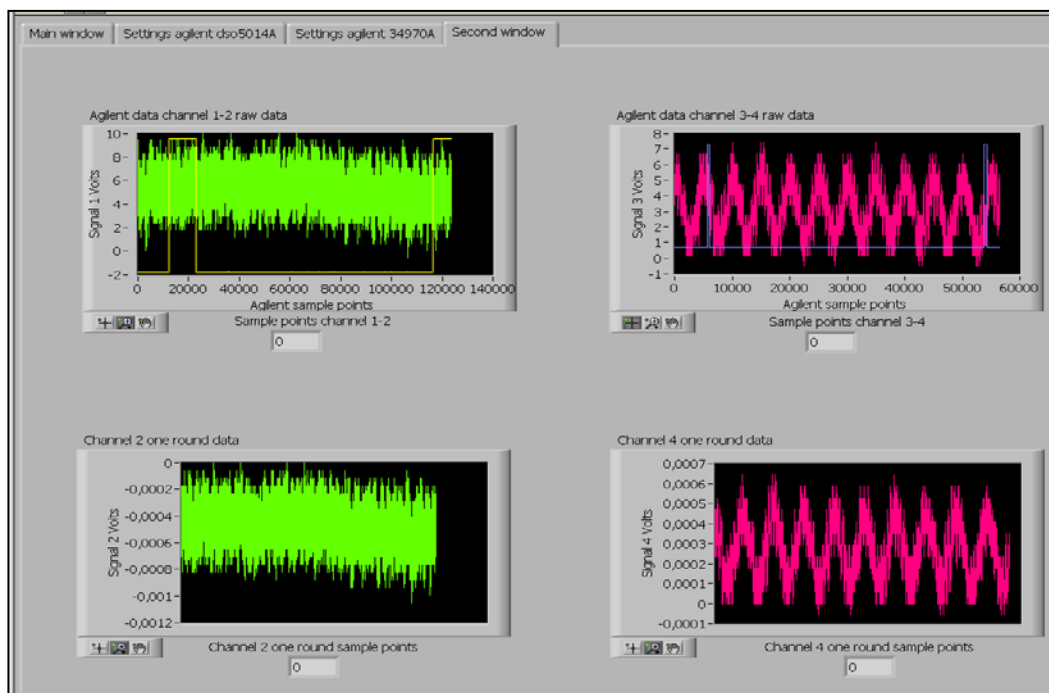
Kuva 19. AIRI-mittaussovelluksen Agilent dso5014a välilehti.

Settings agilent 34970A-välilehdessä kontrolloidaan dataloggerin toimintoja tiedonkeruun ja kanavien monitoroinnin aikana (Kuva 17). ”Mittaussovelluksessa on mahdollisuus määrittää dataloggerin 22 kanavalle yksilölliset asetukset, joita ovat mitattavan kanavan nimi, kulmakerroin, vakio, mitattava näytemäärä, ilmamäärämittauksissa virtausarvo ja mittarenkaan k-arvo”. (Miulus 2010, 56). Tämän lisäksi välilehdellä on erillinen graafinen näyttö, josta käyttäjä voi halutessaan tarkastella yksittäistä kanavaa reaaliaikaisesti load setup-toiminnolla. Toiminnolla voi tarkastella vain yhtä kanavaa kerrallaan, koska dataloggerissa on vain yksi ADC -muunnin.



Kuva 20. AIRI-mittaussovelluksen Agilent 34970a välilehti.

Second window-välilehdellä ei ole lainkaan kontroleja, vaan se on käytössä pelkästään testauskäyttöä varten. Välilehden neljällä graafisella näytöllä esitetään oskilloskoopin tietokoneelle lähettämää mittausdataa (Kuva 18).



Kuva 21. AIRI-mittaussovelluksen second window välilehti.

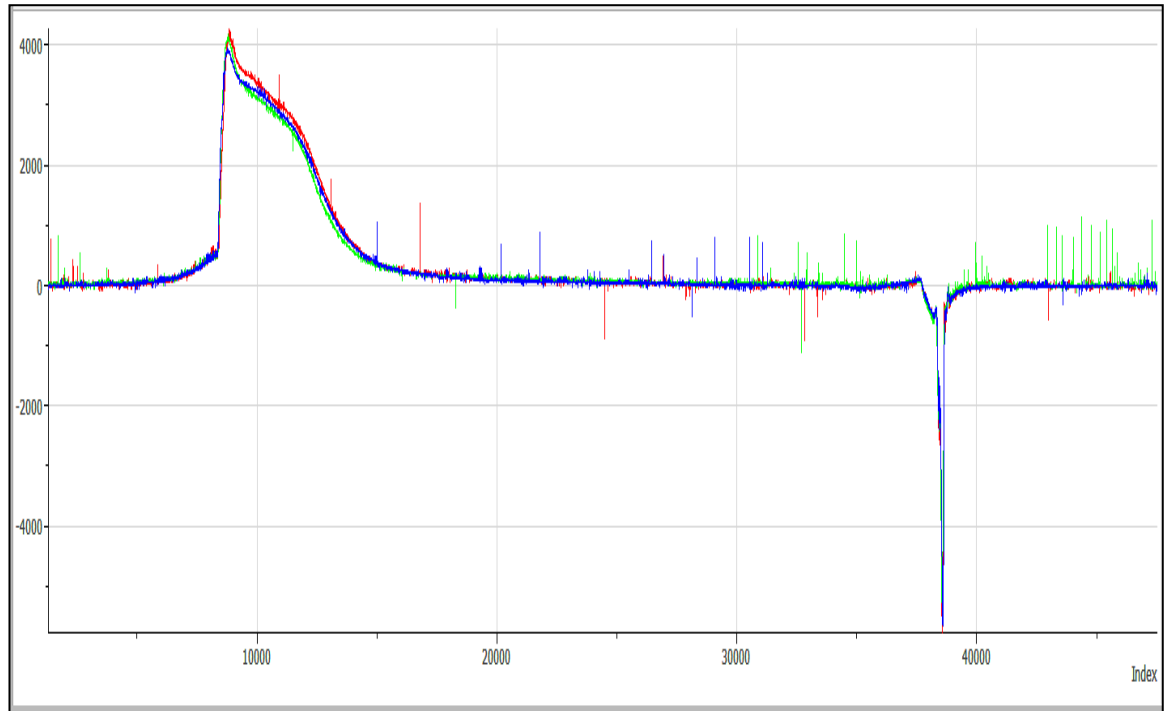
### 3.4 Mittaustiedostojen analysointi

AIRI mittaussovelluksen create file painiketta painettaessa sovellus muodostaa kerätystä datasta mittaustiedoston sekä kuvatiedoston. Mittaustiedosto on formaattia txt. Mittaussovelluksen main window-välilehdestä otetaan print screen toiminnolla kuvatahtiointi, josta muodostetaan kuvatiedosto helpottamaan mittaustiedostojen jälkikäsitelyä. Mittausajojen aikana kerätyt mittaustiedostot kerätään ulkoiselle muistitikulle ja tiedostojen analysointi ja lopullinen muotoilu tehdään jälkepäin National Instrumentsin Diadem analysointi- ja esitysohjelmalla.

Mittaustiedostot avataan Diadem-ohjelmalla ja kerättyä data muokataan edelleen helpommin esitettävään muotoon. Tutkimuslaitoksella ei ole käytössä yhtä tiettyä tapaa esittää mittaustiedostojen sisältö vaihtelee mitaushankkeesta riippuen. Ohjelma tarjoaa useita mahdollisuuksia signaalien keskiarvoistukseen, rajaukseen ja analysointiin (NI 2012). Kuvassa 18 on esitet-



ty kolme pyörähdyspainekäyrää, jotka on kerätty samalla simulaattorin nopeudella. Diademissa näitä käyriä voidaan vertailla nopeasti esittämällä ne samassa kaaviossa.



Kuva 22. Kolmen pyörähdyspainekanavan data esitettynä Diademissa.

## 4 KEHITYSKOhteet JA VAIHTOEHTOiset MENETELMÄT

Tässä kappaleessa keskitytään mittausjärjestelmästä löydettyihin epäkohtiin ja esitetään niihin erilaisia ratkaisuja. Osat ratkaisuista ovat vanhoja menetelmiä kehittäviä pienempiä parannustöitä ja toiset ovat laajempia kokonaisuuksia, jotka tulisivat muuttamaan järjestelmää perusteellisesti.

### 4.1 Mittaustoiminnan suunnittelu uuteen tilaan

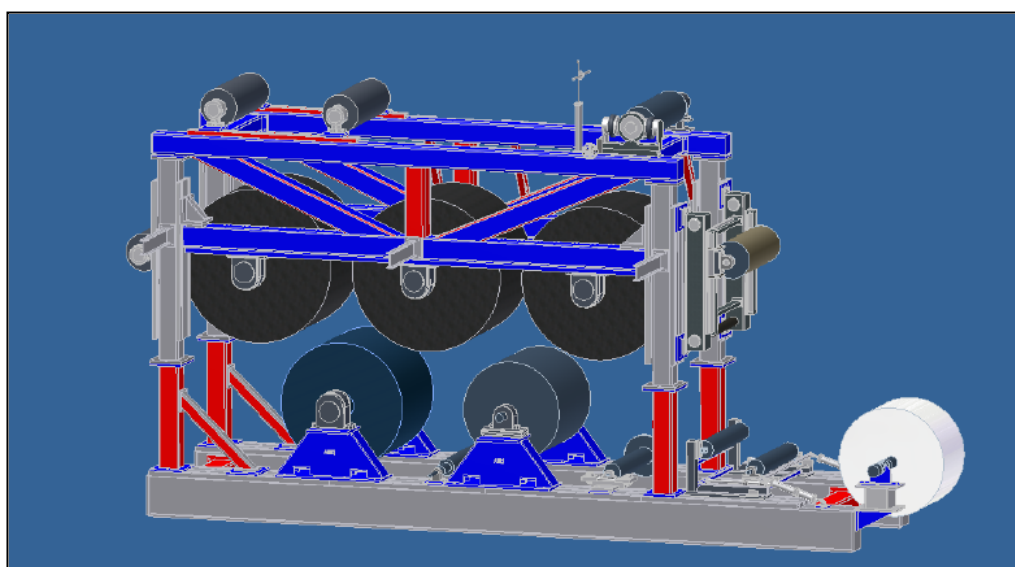
Yksi opinnäytetyölle asetetuista tavoitteista oli parantaa nykyisen mittausjärjestelmän käytettävyyttä ja tehdä mahdolliset muutokset tulevia mittausarpeita varten. Simulaattorilaitteen operaattorit eivät tulevaisuudessa välttämättä ole mittaustekniikkaan erikoistuneita henkilöitä, joten uuden järjestelmä toivottiin olevan helppokäyttöinen ja helposti muokattava. Tilapäisratkaisuna käytetyistä Mikor painemittareista haluttiin myös päästä eroon.

Mittausjärjestelmä on rakentunut nykyiseen muotoonsa monen kehitysvaiheen ja käyttäjän myötä. Mittauskohteet ja tarpeet vaihtuvat usein, joten operaattorit ovat usein käyttäneet Mikor ja Magnehelic painemittareita Rosemount paine-erolähtimien sijaan. Rosemount paine-erolähtimet on sijoitettu simulaattorilaitteen alle kellarikerrokseen, joten paineilmaletkujen viennit ovat tarpeettoman pitkiä ja niissä on useita mutkia, jotka heikentävät paineilmaviestiä. Järjestelmän käyttöön ja säätötoimenpiteisiin liittyvä tietoa ei ole myöskään taltioitu kirjalliseen muotoon kovinkaan kattavasti, joka myös puolestaan kannustaa tilapäisratkaisujen käyttöä mittausten aikana.

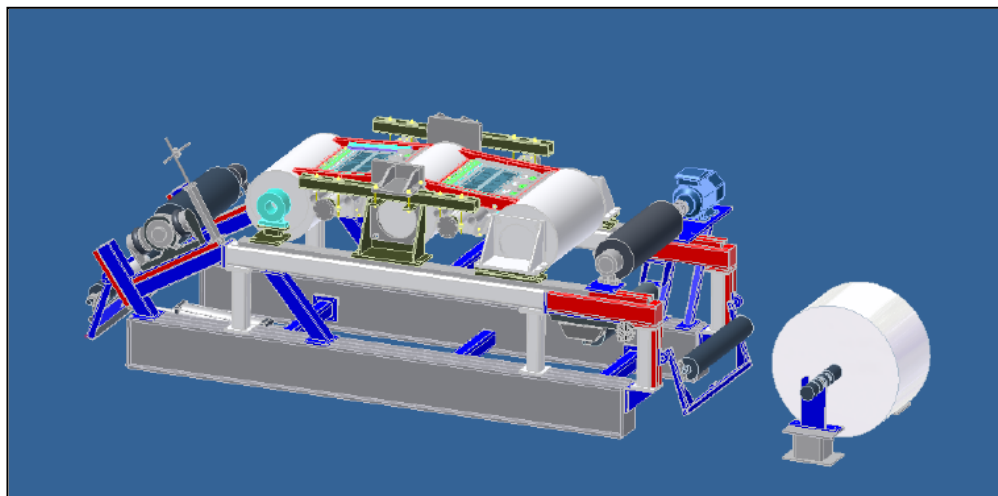
## Simulaattorilaitteiden jako kahteen

Muuton yhteydessä Airi-ajettavuussimulaattori tullaan jakamaan kahteen erilliseen osaan. OD-päällepuhallussimulaattorista tulee oma testilaitteensa ja Airi-ajettavuussimulaattorin rakenne muuttuu mahdollistamaan uusia mittaustarpeita. OD-päällepuhallussimulaattorilla suoritetaan luvussa 2.3 esiteltyyn päällepuhalluskuivauskonseptiin liittyviä mittaushankkeita.

Uusien laitteiden mekaaninen suunnittelu toteutettiin Diana Lehtosen 2012 valmistuneessa opinnäytetyössä.



Kuva 23. Airi-ajettavuussimulaattorin uusi rakenne (Lehtonen 2012).



Kuva 24. OD-päällepuhallussimulaattorin uusi rakenne (Lehtonen 2012).

Uusien testilaitteiden mittaustarpeet ovat hyvin samankaltaiset kuin vanhassa kokoonpanossa. Mittauspisteiden määrä voi tulevaisuudessa lisääntyä, mutta nykyinen mittausjärjestelmän kapasiteetti riittää palvelemaan kumpaakin simulaattoria, koska simulaattoreita ei tulla ajamaan samanaikaisesti. Tutkimuslaitoksen henkilökunnan toiveena oli, että tulevan mittausjärjestelmän mittaus tapahtuisi mahdollisuuksien mukaan yhdeltä tietokoneelta ohjelmallisesti.

### **Mittausjärjestelmän käytön opastus**

Tutkimuslaitoksen henkilökunnan toiveena oli, että mittausjärjestelmän käyttö tehtäisiin mahdollisimman helpoksi ja järjestelmälle laadittaisiin kattavat käyttöohjeet. Mittausjärjestelmää on muokattu useaan otteeseen, jonka takia järjestelmän toiminnan dokumentointi on jäänyt vähälle. Tutkimuslaitoksen vakituisen henkilökuntaan ei kuulu sähkö- tai ohjelmointitekniikkaan erikoistunutta henkilöä, joten suuri osa järjestelmään liittyvästä tiedosta on siirtynyt ns. ”hiljaisena tietona” operaattoreiden keskuudessa.

## 4.2 Mittausjärjestelmän kehittäminen

Automatisoitu mittausjärjestelmä on ollut käytössä kahden vuoden ajan ja se on yleisesti nopeuttanut ja parantanut mittausprosessia huomattavasti. Kahden vuoden aikana sovelluksessa on esiintynyt joitain puutteita ja kehityskohteita.

Operaattoreiden havaitsemat kehityskohteet:

- sataloggerin tietojen syöttö mittaussovellukseen välimuistin avulla
- mittaustiedostojen tulosten ohjelmallinen keskiarvoistaminen
- triggauspisteen liikkuminen OD-päällepuhallussimulaattorin koeajoissa
- sulkeutuvan ja aukeavan nipin tangenttipisteiden paikoittaminen.

Dataloggerin kanavakohtaiset tiedot joudutaan syöttämään joka kerta uudelleen kun mittaussovellus käynnistetään. Operaattoreiden toiveena on, että kanavien tiedot saataisiin talletettua välimuistiin. Mittaustiedostojen keskinäinen vertailu tapahtuu normaalisti jälkikäsitteilyä Diadem-ohjelmistolla. Yhdeksi tavoitteeksi asetettiin mittaustiedostojen mahdollinen ohjelmallinen keskiarvoistaminen. Operaattorit ovat huomanneet OD-päällepuhallussimulaattorin mittausten aikana triggauspisteen siirtyvän satunnaisesti. Triggauspisteen siirtyessä mittaustiedostojen analysointi vaikeutuu, joten yhdeksi tavoitteeksi asetettiin triggaustoiminnan kehittäminen. Nämä ongelmat ratkaisemalla mittaustoimintaa pyritään saamaan yleisesti nopeammaksi ja selkeämmäksi.

Viimeiseksi tavoitteeksi opinnäytetyölle asetettiin sulkeutuvan ja aukeavan nipin tangenttipisteiden tarkka paikoitus. Tarkan tangenttipisteen paikoitus olisi erittäin arvokas tieto pyörähdyspainedataa analysoitaessa.

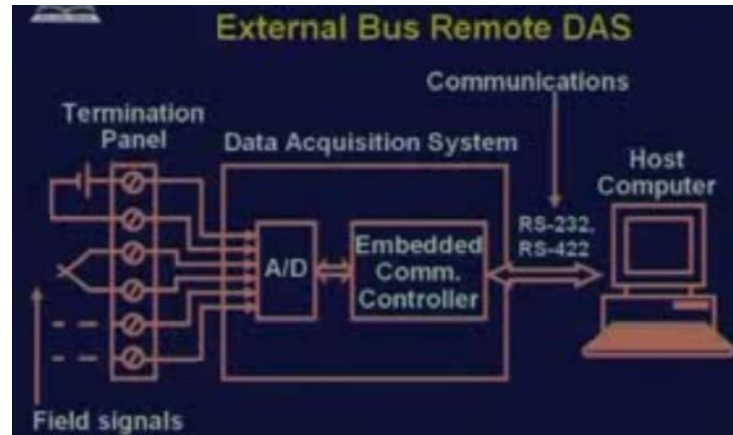
### 4.3 Tiedonkeruujärjestelmien arkkitehtuuri

Tiedonkeruujärjestelmillä, engl. data acquisition system (DAS), tarkoitetaan kokonaisuutta, joka koostuu laitteisto- ja ohjelmistorakenneosista, jotka mahdollistavat fyysikaalisten signaalien käsittelyn ja esittämisen tietokoneella. Tiedonkeruujärjestelmä käsitetään yleisesti rajapintana, joka on yhteydessä mitattavaa prosessia lähellä sijaitsevien antureiden, sekä kerätyn datan esittämistä varten käytettävien tietokoneiden kanssa. Prosessista kerätty analogidata muutetaan antureiden avulla fyysikaalisesta ilmiöstä sähköiseen muotoon, tämän jälkeen digitoidaan ja kuljetetaan eteenpäin tietokoneisiin. Tämä digitaalinen data käy läpi tietokoneen lukuisat algoritmit, jonka jälkeen se ohjataan tarvittaessa muille tietokoneille tai käytetään hyväksi automatisoidun prosessin eri vaiheissa.

Tässä kappaleessa käsitellään yleisellä tasolla miten antureiden lähettämä tieto päätyy tietokoneelle ja mitä eri vaiheita tähän tapahtumaan yleensä kuuluu.

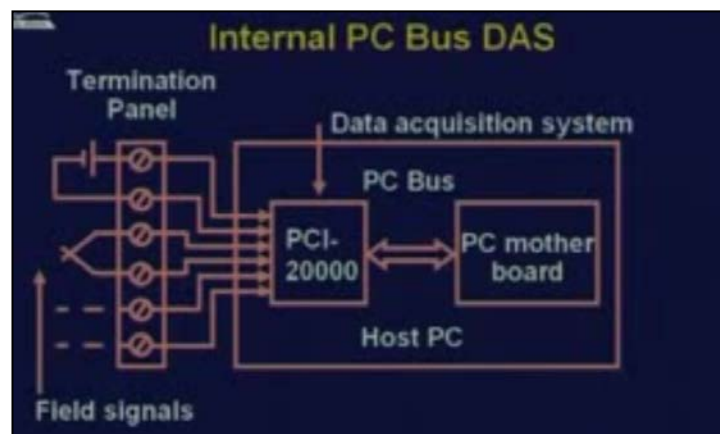
Tiedonkeruujärjestelmien rakenne vaihtelee käyttökohteesta riippuen, mutta yleisesti tunnetaan kaksi yleistä rakennekategoriaa; kauko-ohjattu ulkoinen väylärakenne eli External Bus Remote (Kuva 23) ja tietokoneen sisäinen väylärakenne eli Internal PC Bus (Kuva 24).

Ulkoinen väylärakenne koostuu elektronisista kulkureiteistä, jotka yhdistyvät tiedonkeruujärjestelmän eri komponentit tietokoneeseen. Itse tietokone voi sijaita kaukana tarkkailtavasta prosessista. Järjestelmän muilla komponenteilla on yleisesti omat virtalähteensä ja prosessorinsa, toimivat itsenäisesti ja sijaitsevat lähempänä prosessia. Tietokoneen ja muun järjestelmän kommunikointi tapahtuu yleensä USB-tai sarjaliikenneväylää pitkin (Prof. S. Mukhopadhyay, 2009).



Kuva 25. Kauko-ohjattu ulkoinen väylärakenne (Prof. S. Mukhopadhyay 2009).

Tietokoneen sisäisessä väylärakenteessa tiedonkeruujärjestelmä sijaitsee tietokoneen rungon sisällä. Tässä ratkaisussa järjestelmä kommunikoi tietokoneen kanssa PCI-väylää pitkin, jolloin saavutetaan ulkoisiin väylärakenteisiin verrattuna huomattavasti nopeampi yhteys. Järjestelmän data siirtyy tietokoneen muistiin, josta se voidaan kerätä jälkikäsitteilyä varten.



Kuva 26. Tietokoneen sisäinen väylärakenne (Prof. S. Mukhopadhyay 2009).

## Tiedonkeruuohjelmistot

Tiedonkeruujärjestelmiin on saatavilla useita erilaisia ohjelmistoja, komponenteista ja rakenteesta riippuen. Yleisesti voidaan sanoa, että tiedonkeruuohjelma muuttaa tietokoneen avulla tiedonkeruujärjestelmän eri osat yhdeksi järjestelmäksi, jossa kerättyä dataa voidaan käsitellä, analysoida ja esittää.

Ohjelmistoa valittaessa on yleensä kaksi vaihtoehtoa; erilliset tiedonkeruuohjelmistot (engl. Data Acquisition Software) eli DAQ-ohjelmistot, kuten esimerkiksi LabView ja DASYPAL tai ohjelmoitavat ohjelmistot, kuten C++ ja Basic. Laittevalmistajat tekevät myös tuotteilleen erilaisia ajureita, joiden avulla on mahdollista ladata eri ohjelmointikielillä rakennettuja ohjelmia tiedonkeruuohjelmiston käyttöön. Tällä tavoin voidaan saada aikaan käytännössä minkälaisia toimintoja tahansa, mutta metodi vaatii paljon ohjelmointityötä. Ohjelmoitavien ohjelmistojen käytön opettelu vaatii myös erityisosaamista ja aikaa, joten yleisesti teollisessa ympäristössä käytetään muita menetelmiä. (Prof. S. Mukhopadhyay, 2009)

DAQ-ohjelmistojen etuna on ohjelmoinnin suhteellinen yksinkertaisuus. Esimerkiksi LabView on National Instrumentsin kehittämä ohjelmointiympäristö, joka perustuu graafiseen G-kieleen (Bishop 2010, 4). Ohjelmointiympäristössä käyttäjä voi suhteellisen helposti luoda omiin tarkoituksiinsa sopivia ohjelmointityökaluja.

### 4.3.1 Tiedonkeruujärjestelmän toiminnot yleisesti

Tässä kappaleessa käydään läpi tiedonkeruujärjestelmien yleisimpiä toimintoja. Toiminnot ovat:

- A/D -muunnos ja signaalin näytteistys
- multipleksaus
- sample & Hold



- alias- ilmiö.

## **A/D-muunnos ja signaalin näytteistys**

A/D-muunnin eli analogia-digitaalimuunnin (engl. Analog to Digital Converter) on elektroninen laite, jolla muunnetaan analogiasignaalin arvot digitaalisiksi arvoiksi. Nykyaikaisten tietokoneiden tiedonkäsittely perustuu lähes täysin digitaalitiedon käsittelyyn, joten lähes jokaisessa automatisoidussa prosessissa on käytössä A/D-muuntimia.

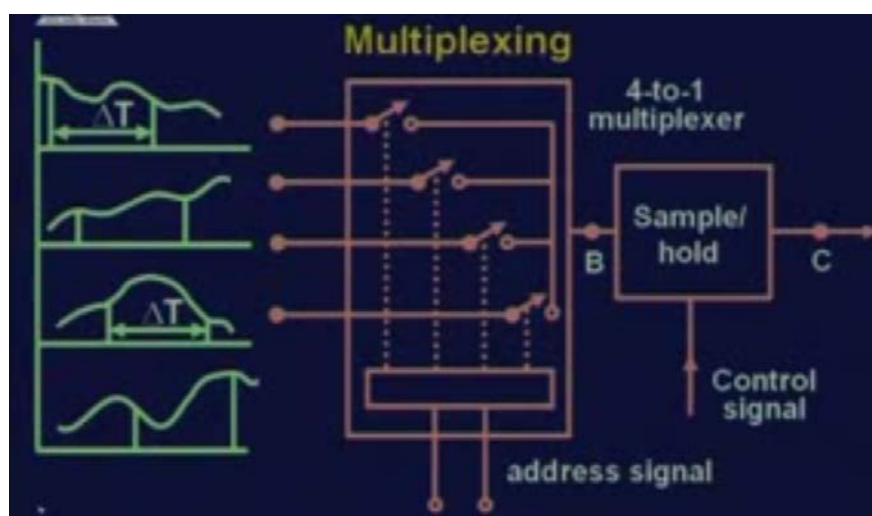
A/D-muuntimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat erottelukyky sekä muunnosnopeus. Erottelukyvyllä, eli resoluutiolla, osoitetaan kuinka monella numerolla AD-muunnin muuntaa kunkin analogisen signaalin digitaalisiksi arvoksi. Esimerkiksi 8-bittisen A/D -muuntimen resoluutio olisi 256, koska  $2^8 = 256$ . Täten voimme sanoa, että kahdeksan bitin avulla voimme esittää 256 arvoa.

Näytteenottotaajuus kertoo kuinka montaa kertaa sekunnissa signaalista otetaan näyte. Mittainstrumentin mittaaman signaalin arvojen tarkkuus riippuu suurelta osin sen näytteistysnopeudesta. Suurempi näytteistysnopeus tarkoittaa tarkemmin mallinnettua signaalia, mutta vaatii mittainstrumenteilta suurempaa nopeutta ja tietokoneelta suurempaa dataprosessointikykyä. Käyttäjän tehtäväksi jää määrittää kuinka suuri virhemarginaali mitattavassa prosessissa sallitaan ja kuinka paljon aikaa tuloksien keräämiseen käytetään. Ideaalitulanteessa näytteistys tapahtuu alhaisimmalla mahdollisella nopeudella, jolla häiriöt ovat toivotulla tasolla. (Bishop 2010, 423)

## **Multipleksaus**

Yleensä valmistajat esittävät tuotteissaan, että kyseinen laite voi vastaanottaa esim. 4 eri analogiasignaalia samanaikaisesti. Käytännössä analogiasignaaleja ei kuitenkaan vastaanoteta täsmälleen samanaikaisesti, vaan ne käyvät läpi ns. multipleksausprosessin.

Kuvan 27 esimerkissä neljälle kanavalle syötetään jokaiselle eri analogiasignaali, joka halutaan muuntaa digitaaliseen muotoon. Jokaisella kanavalla on sähköinen kytkin, joka voidaan kytkeä aktiiviseksi ns. osoite signaalin avulla (address signal). Kun yksi kanavista kytketään aktiiviseksi, kanavan input-puolen signaalista mitataan näyte, joka muunnetaan digitaaliseen muotoon. Kun kaikki neljä kytkintä kytketään aktiiviseksi peräkkäin mahdollisimman nopeasti, saadaan kaikista signaaleista näyte, joka on lähes samanaikainen (Prof. S. Mukhopadhyay, 2009)



Kuva 27. Multipleksauskaavio (Prof. S. Mukhopadhyay 2009).

Oletetaan tapahtuman aikaväliksi delta-t ja kytketään kaikki neljä kanavaa aktiiviseksi peräkkäin tällä aikavälillä. Tällöin jokaisella delta-t aikavälillä saamme neljä näytettä, yhden jokaiselta määrättyltä kanavalta. Jos kytkennästä aiheutuva hyvin pieni ajoitusvirhe on riittävän pieni mitatun signaalin variointiin verrattuna, voidaan ehdottomasti olettaa, että mitatut näytteet ovat kaikki tapahtuneet aikavälillä delta-t

### Sample & Hold

Multipleksaus prosessin jälkeen, suoritetaan usein ns. Sample & Hold-toiminto. A/D-muuntimen suorittaessa tietyn signaalin muunnosta voidaan Sample & hold-piirin avulla ylläpitää toisen mitatun signaalin näytettä A/D-muuntimen input puolella. Tämä toiminto ei ole mahdollista pelkästään A/D-muuntimen avulla, koska muuntimen kytkeytyminen on/off asennosta toiseen ei voi tapahtua ilman pientä viivettä. Sample & hold piiri toimii siis eräänlaisena välimuistina multiplekserin ja A/D-muuntimen välillä (Prof. S. Mukhopadhyay 2009).

### **Alias-ilmiö**

Signaalia näytteistäessä tulee ottaa huomioon sekä mitattavan signaalin taajuus, että näytteistystaajuus. Nyquistin teoreeman mukaan signaalia täytyy näytteistää vähintään kaksi kertaa nopeammalla taajuudella kuin näytteistettävän signaalin suurimman komponentin taajuus. Jos esimerkiksi näytteistetään signaalia, jonka yhden komponentin taajuus on 5 Hz ja toisen komponentin taajuus on 100 Hz, niin teoreettisesti signaali on mahdollista rekonstruoida ainoastaan 200 Hz taajuisella näytteistystaajuudella. Käytännössä usein kuitenkin käytetään viidestä kymmeneen kertaa nopeampia näytteistysnopeuksia

Alhaisemmillä näytteistysnopeuksilla signaalissa saattaa esiintyä ns. Alias-ilmiö. Ilmiön takia tietyn taajuinen signaali ilmenee näytteistyksen jälkeen olevan taajuudeltaan alhaisempi kuin se oikeasti on. Tämänkaltainen virhe signaalin taajuuksissa saattaa tehdä signaalista täysin käyttökelvottoman jälkikäsitteilyä ajatellen.

Alias-ilmiö saadaan poistettua ns. anti -alias suodattimella. Suodatin sijaitsee yleensä samassa piirikortissa signaalivahvistimen kanssa. Näytteistystaajuus on yleisesti sama koko mittausprosessin ajan, mutta mitattavan analogiasignaalin taajuudessa saattaa olla eri taajuisia komponentteja. Anti-alias suodattimella voidaan määritellä taajuustaso, jonka ylittävät signaalit eivät pääse etenemään suodattimen läpi A/D-muuntimen input- puolelle. Tällä tavalla signaaliin ei pääse syntymään alhaisten taajuuksien häiriöitä (Prof. S. Mukhopadhyay, 2009).

#### 4.6 Sulkeutuvan ja aukeavan nipin tangenttipisteen paikoitus.

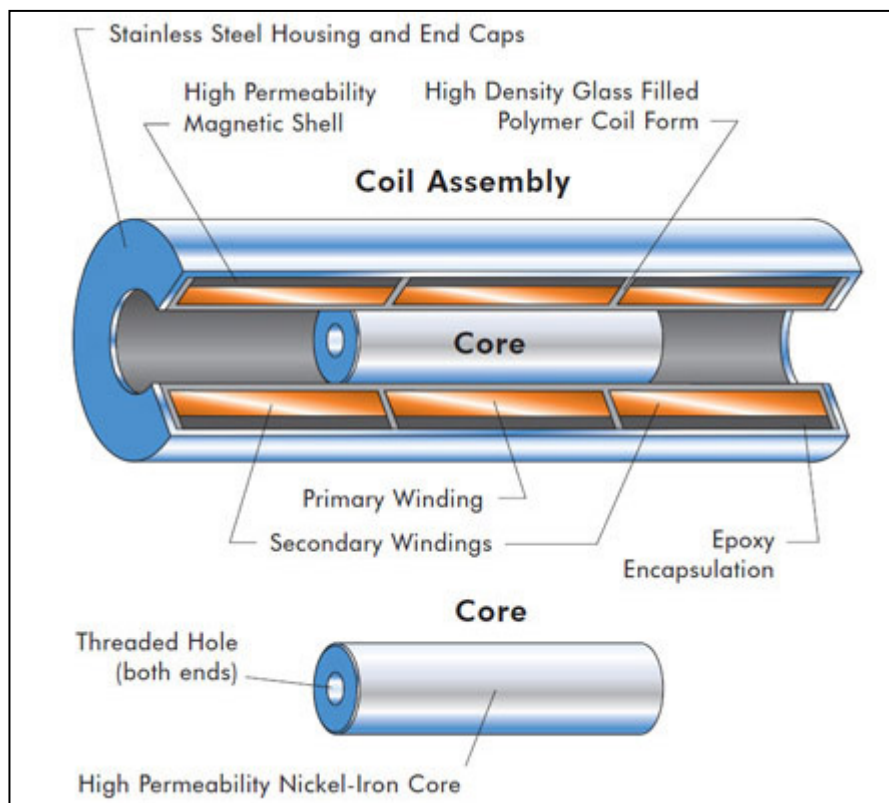
Yksi opinnäytetyölle asetettu tavoite oli määrittää tarkka hetki, jolloin nippi sulkeutuu ja aukeaa. Dynaamisen paineen mittauksen kannalta tarkka sulkeutumishetki olisi arvokas tieto, koska tällöin pyörähdyspainekäyrää kyettäisiin analysimaan tarkemmin. Mitatuista dynaamisista paineista piirrettävä käyrä muodostuu yhden sylinterin kierroksen aikana tapahtuvista painemuutoksista, mutta pelkästään tästä käyrästä ei voida määrittää tarkkaa sulkeutumishetkeä. Ongelmaan on etsitty ratkaisua eri menetelmin, mutta sylintereiden suuri pyörimisnopeus, tilan ahtaus ja viiran koostumus asettavat sulkeutumisen paikoittamiselle suuria haasteita.

##### 4.6.1 LVDT ja DVRT-anturit

Yksi mahdollinen ratkaisu nipin paikoittamiseen on käyttää LVDT-(Linear variable differential transducer) tai DVRT-(Differential Variable Reluctance Transducer) antureita. Kummankin anturityypin toiminta perustuu muuntajaperiaatteeseen, jonka avulla voidaan mitata lineaarisuuntaista liikettä erittäin tarkasti. Antureiden huomattavin ero on primääri- ja sekundaarikäämien muotoilu.

#### **LVDT-anturin toimintaperiaate**

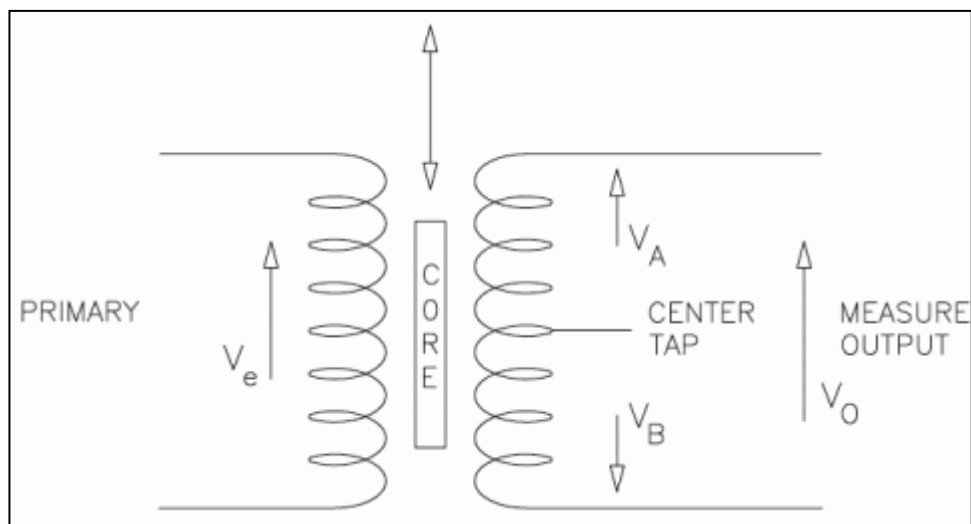
LVDT-anturin (Linear variable differential transducer) toiminta perustuu muuntajaperiaatteeseen (Kuva 26). Anturin keskellä sijaitsee lähetinkäämi ja päissä mittakäämit, joiden välillä liikkuu metallinen sydän. Sydämen lineaariliike muunnetaan vastaavaksi sähköiseksi signaaliksi. Anturilla on erittäin hyvä toistotarkkuus ja oikeissa olosuhteissa lähes loputon käyttöikä, koska anturin eri osat ovat erittäin vähän kosketuksissa toisiinsa. (Macrosensors 2012)



Kuva 28. LVDT-anturi (Macrosensors 2012).

Anturi koostuu yhdestä primäärikäämistä ja kahdesta sekundaarikäämistä (Kuva 27). Primäärikäämi viritetään johtamalla siihen vaihtovirtaa, yleensä 10V. Anturin sydämen ollessa keskiasennossa kytkentä sekundaarikäämien ja primäärikäämin välillä on tasapainotilassa. Sydämen liikkeessä  $V_a$ :n voimakkuus ja vaihe muuttuvat suhteessa  $V_b$ :en.

Mittaamalla sydämen liikkeestä aiheutuvat jännitteen muutokset voidaan helposti määrittää kuinka paljon sydän ja täten myös anturin mittapää ovat liikkuneet.

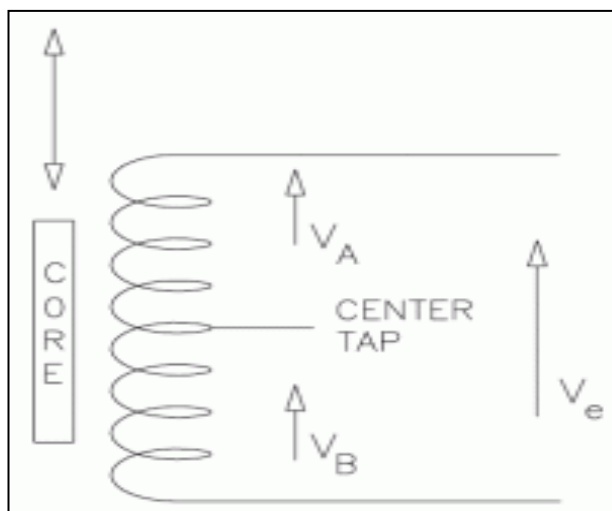


Kuva 29. LVDT-anturin toimintaperiaate (Microstrain 2012).

### DVRT-anturin toimintaperiaate

Kuvassa 28 esitetty käämi viritetään johtamalla siihen vaihtovirtaa keskitapin läpi. Käämi on useimmiten sovitettu Wheatstonesillan kaltaisesti keskitapin toimiessa sillan ulostulona, täten muodostaen ns. puolisillan. Anturin sydämen ollessa keskiasennossa signaalit  $V_A$  ja  $V_B$  ovat tasapainotilassa. Sydämen liike aiheuttaa  $V_A$  ja  $V_B$  signaalien suhteellisen muutoksen. Sydämen asema määritetään mittaamalla käämien differentiaalinen reluktanssi käyttäen siniaaltomuotoista herätysvirtaa ja synkronoitua demodulaattoria. Differentiaalinen mittausmenetelmä mahdollistaa erittäin herkän ja tarkan mittaustuloksen.

Yksinkertaisen toimintaperiaatteen takia DVRT-anturit ovat hieman LVDT-antureita pienempiä kooltaan. DVRT-antureita valmistetaan sekä mekaanisesti, että kosketuksettomasti toimivia. Selvästi yleisempi anturimalli on perinteinen mekaaninen vaihtoehto.



Kuva 30. DVRT-anturin toimintaperiaate (Microstrain 2012).

Tutkittavan tapahtuman nopeus, viiran epätasaisuus ja tilan ahtaus aiheuttavat ongelmia anturin soveltamiselle nipin sulkeutumisen ja avautumisen määrittämiseen. Ajettaessa koelaitetta suurimmalla mahdollisella nopeudella sylinterit pyörivät halkaisijasta riippuen 7-15 kierrosta sekunnissa, joten anturilta vaaditaan erittäin pientä vasteaikaa. Suuri nopeus lisää myös anturin mittapäähän syntyvää impulssia. Simulaattorilaitteen nopeutta muutettaessa viira ja sylinteri liikkuvat hetkellisesti eri nopeudella ja tämä ilmiö saattaa aiheuttaa anturiin epätoivottuja sivuttaisvoimia.

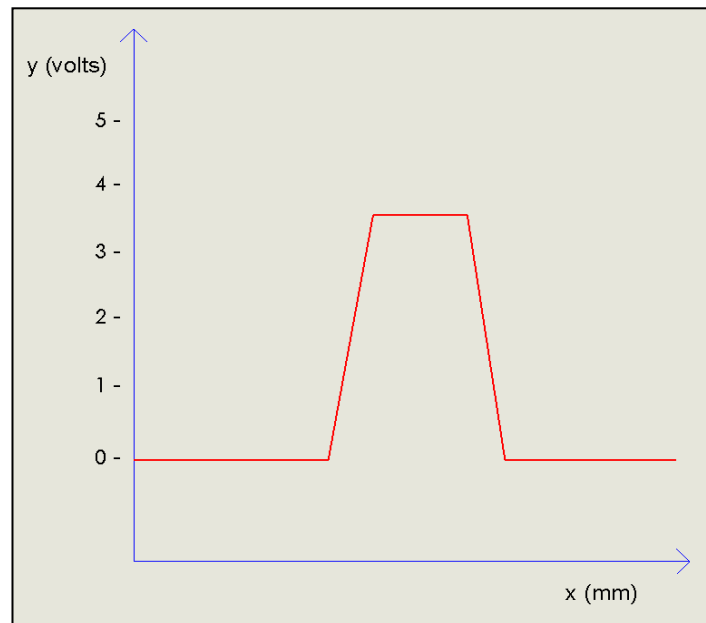
### **Tapahtumaikkuna ja sulkualue**

DVRT-antureilla ei voida määrittää pelkästään absoluuttista sylinterin ja viiran tangenttipistettä, eli nipin sulkua- tai aukeamispistettä, vaan anturin ulostulosignaalista muodostuu etäisyyttä esittävä käyrä, josta tarkka tangenttipiste tulee määrittää. Tämä käyrä esitetään pyörähdyspainedatan tapaan sylinterin pinnan millimetripaikoituksen funktiona.

Tarkempaa tarkastelua varten on tarpeellista määritellä kaksi termiä DVRT-antureiden mittaustutkimuksissa, tapahtumaikkuna ja sulkualue. Tapahtumaik-

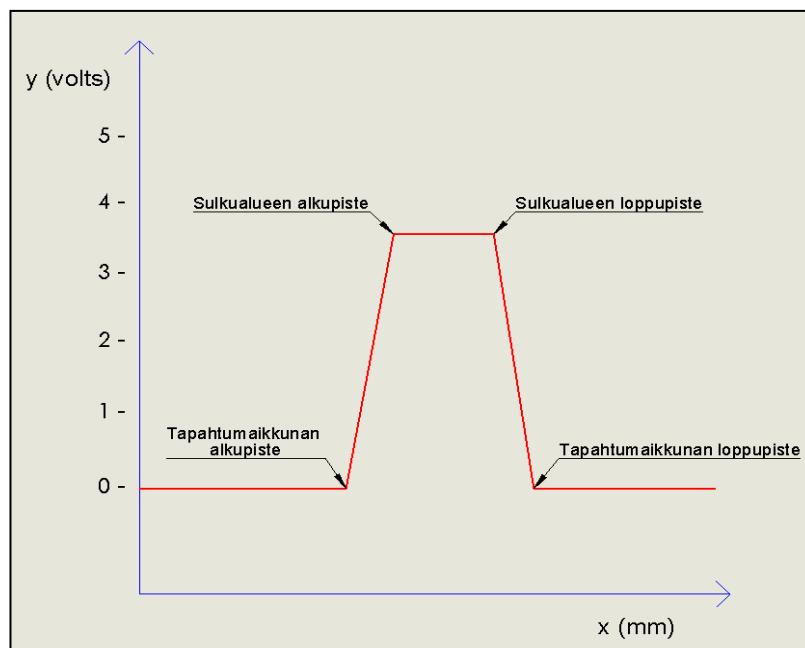
kunalla tarkoitetaan sitä osaa DVRT-anturin ulostulosignaalin muodostamasta käyrästä, joka on suurempi kuin 0V. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä hetkeä, kun anturin mittapää on kosketuksissa viiraan. Tapahtumaikkuna on helposti määritettävissä etäisyyskäyrästä, mutta on vähemmän tärkeä tangenttipisteen määrittämisen kannalta. Sulkualueella tarkoitetaan tangenttipisteiden välistä aluetta, eli aluetta, jolla viira ja sylinterin pinta ovat kosketuksissa toisiinsa.

Kuvissa 29 ja 30 on kuvattu mittausjärjestelyiden aikana syntyvän ulostulosignaalin teoreettinen ihanteellinen muoto. Kuvissa punainen viiva esittää DVRT-anturin ulostulosignaalia millimetripaikoituksen funktiona. Kuvaan 30 on merkitty tapahtumaikkunan ja sulkualueen alku- ja loppupisteet.



Kuva 31. DVRT-anturin ulostulosignaalin teoreettinen muoto mittausjärjestelyissä.





Kuva 32. Tapahtumaikkunan ja sulkualan alku- ja loppupisteet.

Sulkualuetta ei todennäköisesti voida määrittää suoraan kuvaajasta, vaan alueen tarkkaa määrittelyä varten joudutaan suorittamaan erilaisia referenssimittauksia ja koeajoja.

#### 4.7 DVRT-antureiden testaus

Nipin aukeamispisteen tutkimuksia varten hankittiin kaksi erilaista DVRT-anturia. Markkinoilta löytyviä vaihtoehtoja vertailtuani testattavaksi hankittiin Microstrain yhtiön valmistamat Subminiature Gauging- ja Non-Contact DVRT-anturimallit. Antureiden testaus suoritettiin luvussa 2.4 esitellyllä koelaitteella Turun ammattikorkeakoulun tiloissa. Koelaitteen uratela on huomattavasti pienempi kuin tutkimuslaitoksen ajettavuussimulaattorien telat, mutta testattavien antureiden toiminnan kannalta kokoerolla ei ole merkitystä. Koelaitteen uratelan modulaarinen rakenne mahdollisti erilaisten asennusmahdollisuuksien testaamisen lyhyen ajan sisällä.

## DVRT- ja pyörähdyspaineantureiden signaalien synkronointi

Tarkkojen tulosten takaamiseksi DVRT- ja pyörähdyspaineantureiden signaalit tulee synkronoida mahdollisimman tarkasti, jotta antureiden keräämää dataa voidaan vertailla keskenään ja näin määrittää tarkka nipin aukeamispiste. DVRT-anturin ja pyörähdyspaineanturin mittauksien tulee siis alkaa ja loppua samanaikaisesti. Tämä tosiasia tuli ottaa huomioon antureiden asennusvaiheessa sekä triggaustoiminnon suunnittelussa.

Kummankin DVRT-anturin sekä pyörähdyspaineanturin havaintopäät ovat suunnilleen samankokoisia, n. 2mm halkaisijaltaan, joten kokoerosta aiheutuvat virheet ovat erittäin pieniä. Anturit tulee asentaa sylinteriin tai telaan akselin suhteen samalle linjalle, jotta kummankin anturin signaalin näytteistys tapahtuu yhtä pitkältä matkalta (Kuva 38).



Kuva 33. NC-DVRT- ja pyörähdyspaineanturi asennettuna uratelaan.

Tutkimuslaitoksen mittauksissa yhdeltä sylinteriltä kerätään dataa yhdeltä pyörähdyspaineanturilta, joten oskilloskoopin kanavat riittävät samanaikaisesti kahden sylinterin mittauksiin. DVRT-antureita käytettäessä yhdeltä sylinteriltä kerätään dataa kahdelta anturilta, joten yhden triggeranturin signaalia joudutaan käyttämään sekä DVRT, että pyörähdyspaineanturin signaalin triggaukseen. Käytännössä tämä tapahtui helpoiten ohjaamalla yhden triggeranturin signaali kumpaankin oskilloskoopin triggerkanavaan, jolloin voidaan olla varmoja, että triggaukset alkavat DVRT- ja pyörähdyspainesignaalien osalta samanaikaisesti. Tä-

mä tarkoittaa sitä, että DVRT-ja pyörähdyspaineanturin yhdistelmää käytettäessä mittauksia voidaan suorittaa ainoastaan yhdeltä sylinteriltä kerrallaan, koska järjestely vaatii kaikki oskilloskoopin neljä kanavaa toimiakseen.

#### 4.7.1 SG-DVRT 38-anturi

SG-DVRT-anturi (Subminiature Gauging-Differential variable reluctance transducer) toimii luvussa 4.6.3 esitetyn muuntajaperiaatteen tavoin. Mittapää on jousipalautteinen ja anturin rakenne on suunniteltu vastustamaan epätoivottuja sivuttaisvoimia. Anturin mitta-alue on 38mm ja valmistaja lupaa anturille 20 kHz vasteaikaa ja hyviä dynaamisia ominaisuuksia (Kuva 36)



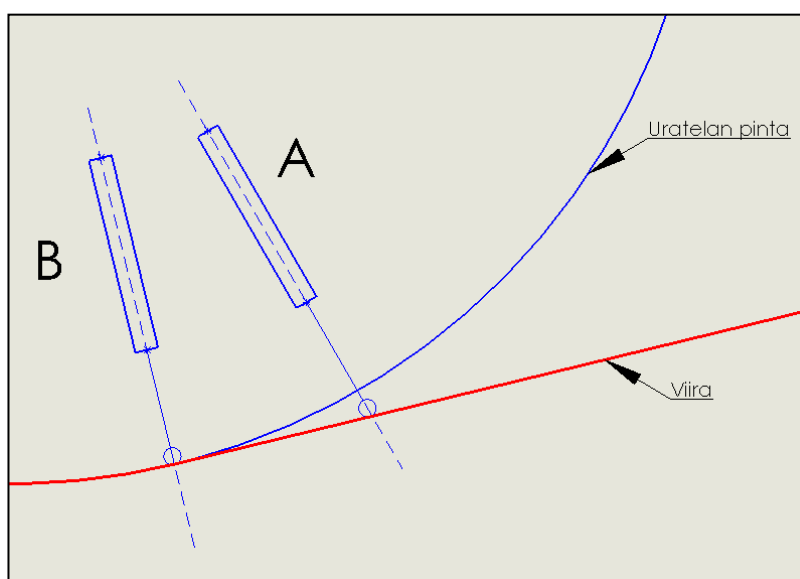
Kuva 34. SG-DVRT 38-anturi, DEMO-DC vahvistin ja jatkojohto.

#### **DVRT-SG 38-anturin asennus ja mittausjärjestelyt**

Mekaanisen DVRT-anturin hankintaa suunnitellessa yliarvioitiin tapahtumaikkunan tärkeys mittauksissa. Tutkimuksia varten hankittiin SG-DVRT-anturi, jonka mittausetäisyys on 38 mm. Pitkällä mittausetäisyydellä pyrittiin mahdollistamaan asennussyvyyden vaihtelu, mutta ensimmäisiä koeajoja ajettaessa ilmeni, että

anturi ei tule kestävään koekäytössä jos mittapää on useita millimetrejä uratelan pinnan yläpuolella.

Kuvassa 39 näkyy läpileikkaus uratelasta, jossa nähdään anturin toiminta nipin sulkeutuessa. Tapahtumaikkuna alkaa kohdassa A, anturin mittapään koskiessa viiran pintaan mikä aiheuttaa ulostulosignaalin muutoksen ja sulkualue, eli viiran ja telan tangenttipiste, alkaa kohdassa B. Anturin asennussyvyyttä muutettaessa tapahtumaikkunan alkupiste muuttuu suhteessa sulkualan alkupisteeseen.



Kuva 35. DVRT-SG 38-anturin tapahtumaikkuna ja sulkualue.

Anturi asennettiin siten, että mittapään kärki jäi 2 mm uratelan pinnan yläpuolelle (Kuvat 40 -42). Kuvista käy ilmi, että anturi on väärin mitoitettu mittaustarkoituksiin. Kyseisen anturin mittaskaala on 38 mm, mutta tässä tapauksessa käytössä on vain 2 mm koko skaalasta. Anturin ulostulosignaali muuttuu siis mittausten aikana välillä 0- 0,5 V vaikka ulostulosignaalin koko skaala on 0-5 V. Tällä järjestelyllä ei saavuteta anturin täyttä erottelukykä ja toistettavuutta.



Kuva 36. SG-DVRT 38-anturin kiinnitys uratelaan.



Kuva 37. SG-DVRT 38-anturi asennettuna uratelaan.



Kuva 38. SG-DVRT 38-anturin mittapää.

#### 4.7.2 NC-DVRT 2,5-anturi

Non -Contact DVRT 2.5-anturi toimii luvussa 4.6.3 esitetyn muuntajaperiaatteen tavoin, mutta perinteisistä DVRT -antureista poiketen NC- mallin anturit eivät ole nimensä mukaan kosketuksissa mitattavaan kohteeseen. NC-DVRT 2.5-anturi havaitsee 0-2,5 mm päässä sijaitsevan metallisen kohdemateriaalin ja muuntaa etäisyyden vastaavaksi sähköiseksi signaaliksi. Mittaustuloksiin ei vaikuta anturin ja kohdemateriaalin välissä olevat sähköä johtamattomat materiaalit kuten polymeerit tai biomateriaalit (Kuva 37).



Kuva 39. NC-DVRT 2.5-anturi.

Anturin sisällä on kaksi käämiä, mittakäämi ja kompensatiokäämi. Kun anturin havaintopää tuodaan rautapitoisen materiaalin läheisyyteen, mittakäämin reluktanssi muuttuu. Verrattaessa tätä muutosta kompensatiokäämin reluktanssiin saadaan anturin ulostulona tarkka paikkasignaali.

Rautapitoiset kohteet muuttavat mittakäämin reluktanssia muuttamalla magneettisen virtapiirin läpäisevyyttä. Sähköä johtavien kohdemateriaalien, kuten alumiinin, havainnointi perustuu kohteen pinnalle syntyvien pyörrevirtojen ja mittakäämin ympärille muodostuvan magneettikentän väliseen vuorovaikutukseen (Microstrain 2012)

### **NC-DVRT-anturin asennus ja mittausjärjestelyt**

NC-DVRT anturin kohdemateriaaliksi valittiin alumiiniteippi (Kuva 46). Alumiiniteippi valittiin, koska teippi on helppo levittää viiran päälle kummalle tahansa puolelle. Toisena vaihtoehtona olisi ommella viiran sisään rauta- tai alumiinipitoista lankaa, mutta tämänkaltaisen viiran valmistaminen olisi vienyt huomattavasti aikaa.

Anturi asennettiin mahdollisimman lähelle uratelan pintaa siten, että anturin mittapää koskettaa viiraa sulkualueella (Kuva 47). Alumiiniteippi kiinnitettiin viiraan uratelan vastakkaiselle puolelle. Anturi siis havaitsee kohdemateriaalin viiran läpi.

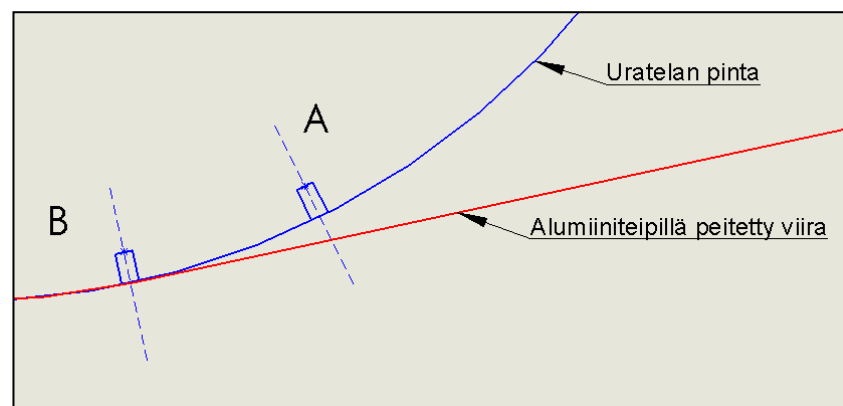


Kuva 40. NC-DVRT-anturin kohdemateriaalina toimiva alumiiniteippi.



Kuva 41. NC-DVRT-anturi asennettuna uratelaan.

Kuvassa 48 näkyy läpileikkaus uratelasta, jossa nähdään NC-DVRT -anturin toiminta nipin sulkeutuessa. Tapahtumaikkuna alkaa kohdassa A kun anturi havaitsee kohdemateriaalin 2,5 mm päässä anturin mittapäätä. Sulkualue alkaa kohdassa B, kun anturin ulostulosignaali saavuttaa suurimman arvonsa.



Kuva 42. NC-DVRT-anturin tapahtumaikkuna ja sulkualue.

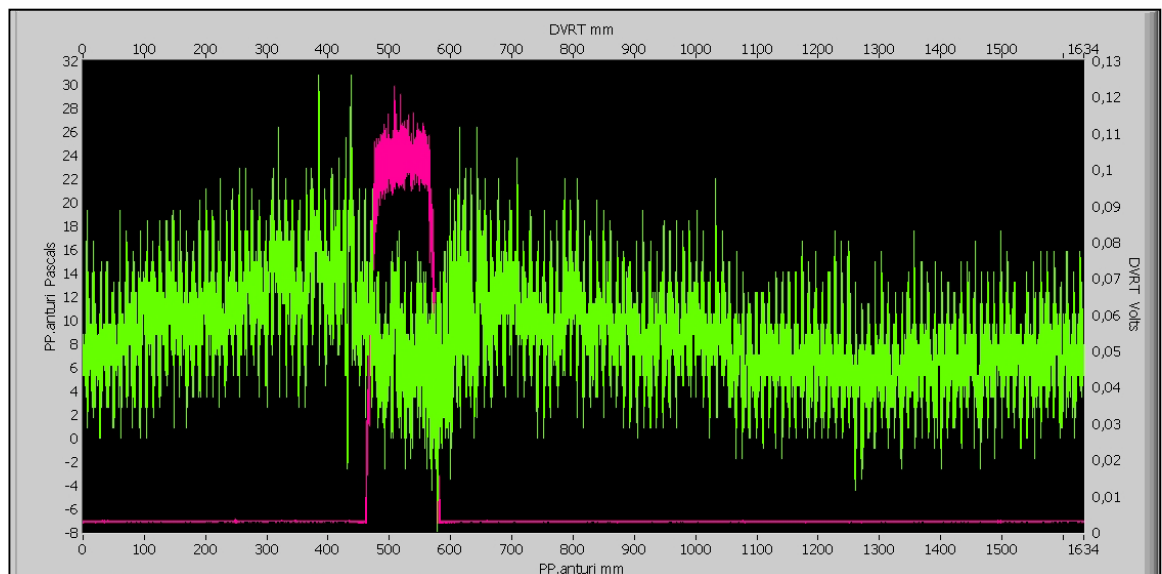


#### 4.8 DVRT-antureiden koeajojen tulokset

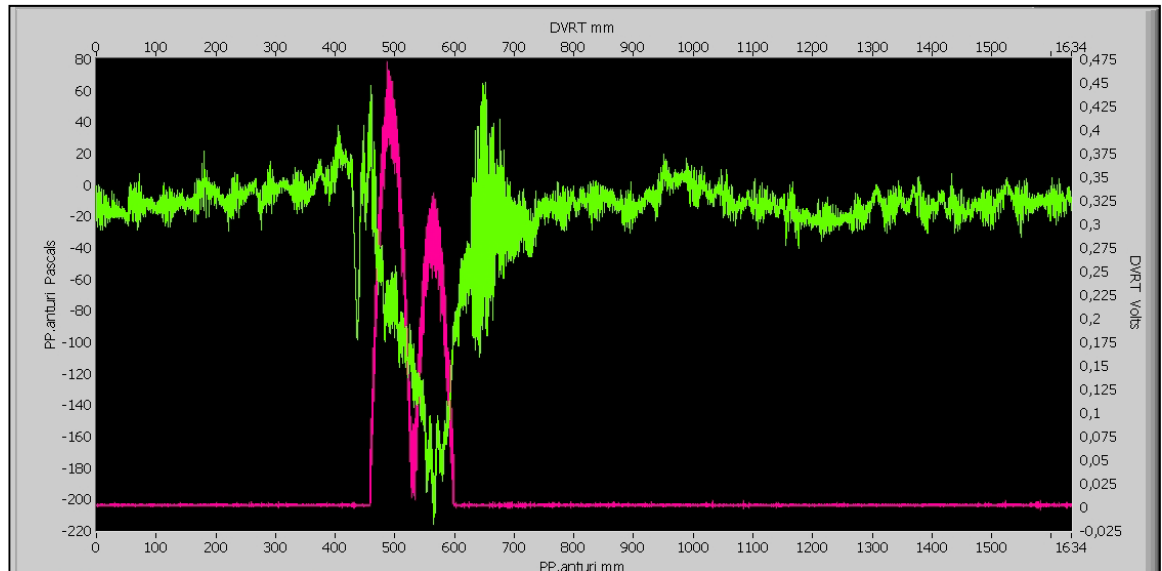
AIRI + OD-Mittaussovellusta muutettiin siten, että DVRT-antureiden ja pyörähähdyspaineantureiden signaalien kuvaajat saatiin esitettyä samalla graafisella näytöllä ja tulokset tallennettua samaan mittauskansioon.

#### SG-DVRT 38-anturin koeajojen tulokset

Kuvissa 43 ja 44 on esitetty AIRI + OD mittaussovelluksella taltioidut kuvat kahdesta DVRT-anturin testiajosta. Kuvissa 43 ja 44 vihreä käyrä muodostuu pyörähähdyspainesignaalin ja punainen käyrä SG-DVRT 38-anturin arvoista yhden telan kierroksen ajalta.



Kuva 43. SG-DVRT-anturin testaus nopeudella 333 m/min.



Kuva 44. SG-DVRT-anturin testaus nopeudella 990m/min.

Kuvista nähdään, että nopeuden kasvaessa anturi ei toimi halutulla tavalla. 333 m/min nopeudella DVRT-anturin signaalista piirretty käyrä on melko paljon luvussa 4.6.1 esitetyn ihannesignaalin muotoinen. 990 m/min nopeudessa signaalikäyrässä nähdään suuria muutoksia signaalin ulostuloarvoissa tapahtumaikkunan sisäisellä alueella. Tämän ilmiön oletetaan johtuvan anturin mittapään syntyvästä impulssista, joka syntyy mittapään osuessa viiraan. Anturin mittapää vetäytyy impulssin voimasta haluttua syvemmälle uratelan sisään eikä tällöin anna tarkkaa tietoa tapahtumaikkunan sisäisistä tapahtumista. Impulssin voima kasvaa nopeuden kasvaessa, joten myös epäsäännöllisyyksien määrä tapahtumaikkunan sisällä kasvaa. Kyseistä anturia käytettäessä tapahtumaikkunan alkupiste on ainoa luotettava mittaustulos.

### SG-DVRT 38-anturin voittuminen

Koeajojen aikana havaittiin myös, että SG-DVRT-anturi ei kestänyt mittausympäristön rasitusta. Yli 1500 m/min nopeuksissa anturin varsi kärsi vaurioita ja

jumittui kesken koeajojen. Anturin päässä oleva tiiviste irtosi ja esti varren liikkeen ja täten myös koko anturin toiminnan (Kuva 45)

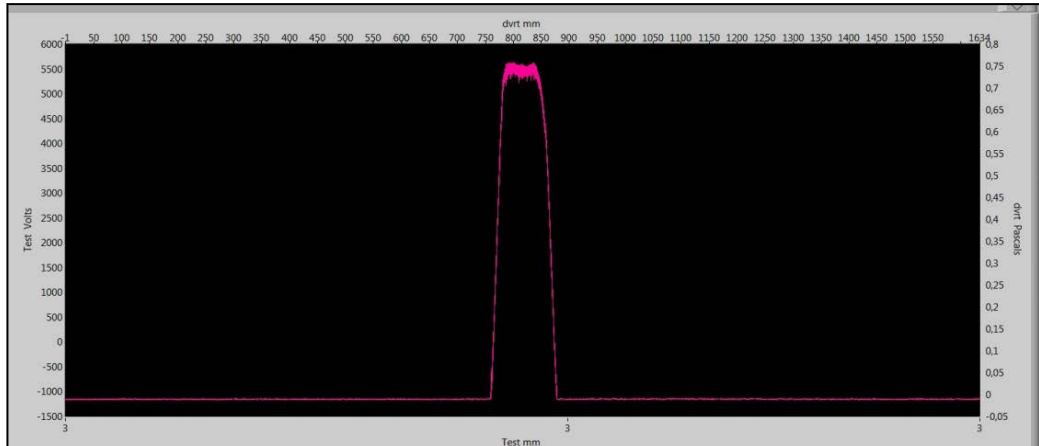


Kuva 45. SG-DVRT-anturin vioittunut tiiviste.

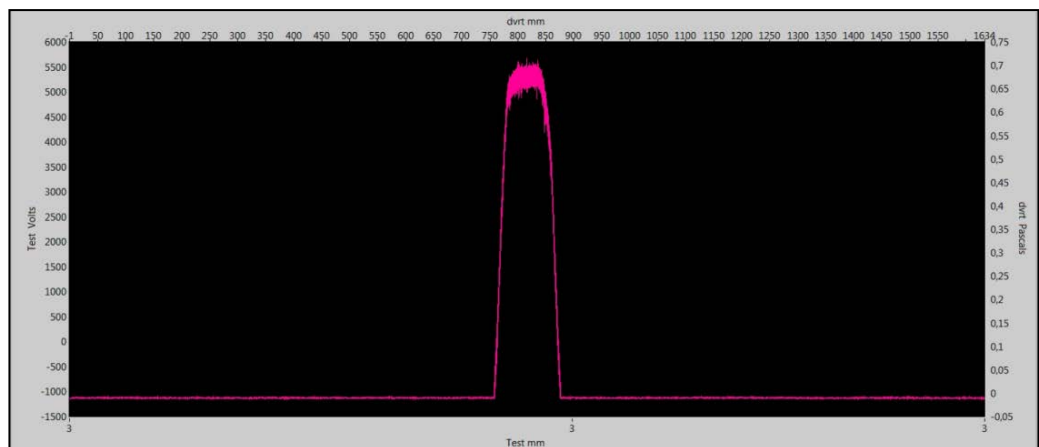
Tiiviste poistettiin ja koeajoja jatkettiin, mutta ilman tiivistettä anturin mittapäähän kohdistuvat pienetkin sivuttaisvoimat vaikeuttavat anturin toimintaa. Tiivisteiden puuttuessa sivuttaisvoimat saavat mittapään varren taipumaan, josta johtuen anturin sydän saattaa joutua kosketukseen anturin kuoren kanssa. Pitkällä aikajaksolla sydän saattaa kulua tai vaurioitua.

## NC-DVRT 2,5-anturin koeajojen tulokset

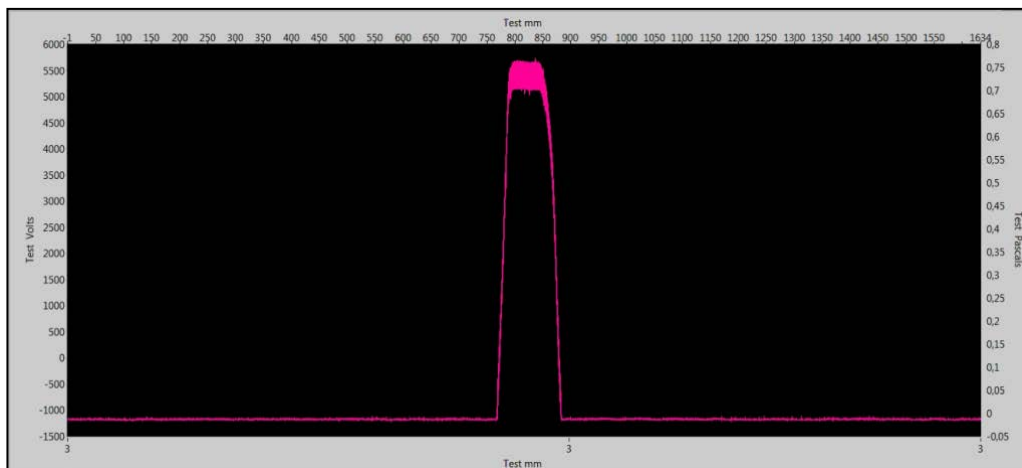
Kuvissa 49 -51 näkyy AIRI + OD-mittaussovelluksella taltioituja mittaustuloksia NC-DVRT -anturin koeajoista. Alumiiniteippiä levitettiin viiran päälle kolme päällekkäistä kerrosta, jotta voitiin varmistua, että anturi havaitsee kohdemateriaalin.



Kuva 46. NC-DVRT-anturin testaus nopeudella 458 m/min.



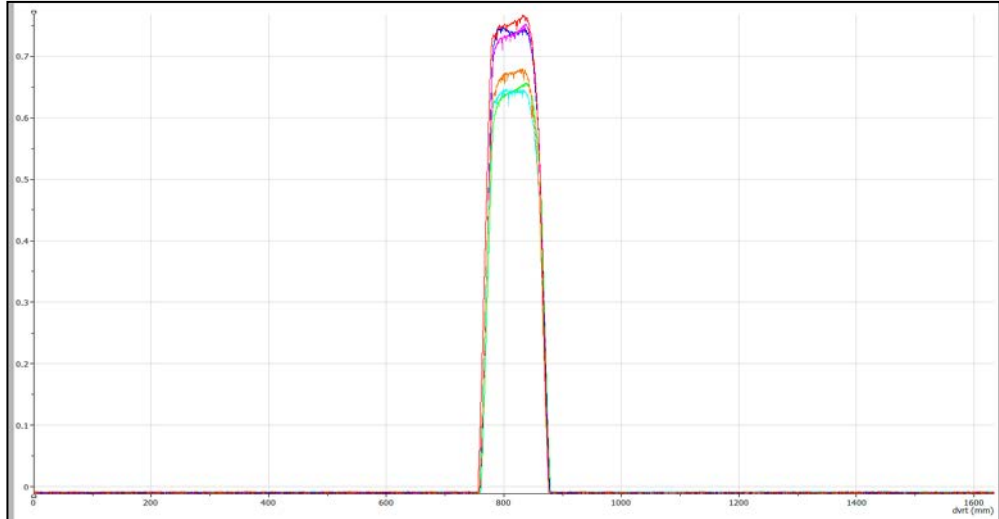
Kuva 47. NC-DVRT-anturin testaus nopeudella 830 m/min.



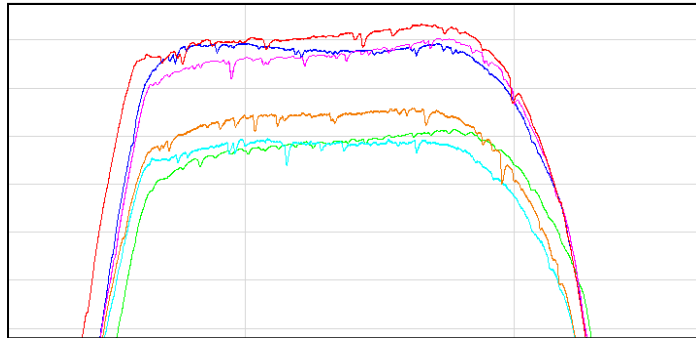
Kuva 48. NC-DVRT-anturin testaus nopeudella 1960 m/min.

Mittaustiedostoja ehdittiin taltioimaan vain 11 kappaletta, jonka jälkeen koelaitteen viira rikkoutui. Koeajoja ei voitu tästä johtuen suorittaa loppuun suunnitellusti. Koeajojen pienestä määrästä huolimatta NC-DVRT-anturin tuloksissa voidaan havaita huomattavasti parempaa toistuvuutta kuin mekaanisen anturin tuloksissa. Käyrän muoto on lähes samankaltainen alhaisilla ja suurilla nopeuksilla. Signaalin suurin amplitudi vaihteli mittauskertojen välillä noin  $\pm 0,3$  voltia, eli etäisyydeksi muunnettuna  $\pm 0,15$  mm. Syytä tähän vaihteluun on mahdoton määrittää ilman tarkempia koeajoja. Sähköisten häiriöiden määrä kasvaa odotetusti suurilla nopeuksilla, koska anturimalli on herkkä ulkoisten magneettikenttien aiheuttamille häiriöille.

Kuvassa 52 on esitetty koeajojen tulokset kuudella eri nopeudella välillä 400 - 2000 m/min. Mittaustuloksia on käsitelty Savitzky -Golay suodattimella, jotta käyrien yhteneväisyydet erottuvat selkeämmin. Kuvassa 53 nähdään käyrien amplitudihuiput. Käyrien muodosta on vielä mahdoton määrittää tarkkaa sulkualan alkua- tai loppupistettä, mutta signaalin säännöllisyys on merkki siitä, että anturin testausta on kannattavaa jatkaa.



Kuva 49. NC-DVRT-anturin signaali Diadem-ohjelmalla esitettynä.



Kuva 50. Käyrien amplitudihuiput.

#### 4.9 Liipaisutoiminnan kehittäminen

Tutkimuslaitoksen ajettavuussimulaattoreissa tavoitteena on taltioida yhden telan kierroksen aikana tapahtuvia paineilmiöitä simulaattorin eri nopeuksilla. Tätä varten tarvitaan jokin kiintopiste, jonka perusteella saadaan eroteltua yhden kierroksen pituinen osa tarkkailtavasta signaalista.

Triggauksella eli liipaisulla tarkoitetaan hetkeä, jolloin oskilloskooppi aloittaa ja lopettaa pyörähdyspaineanturilta saamaansa tiedon mittaamisen. Näin saadaan piirrettyä signaali toistuvasti samasta kohdasta jaksoa. Mittaustoiminnan kannalta liipaisutoiminnon tarkkuus ja toistettavuus ovat erittäin tärkeitä, koska mitattavien paineilmiöiden millimetripaikoitus määräytyy liipaisutoiminnon perusteella. Liipaisutoiminnosta johtuvat mahdolliset epätarkkuudet aiheuttavat osaltaan vääristymiä kaikkiin mittaustuloksiin.

Tässä luvussa käsitellään erilaisia menetelmiä ja antureita, joilla saataisiin kehitettyä mittausjärjestelmän liipaisutoimintoa. Tutkimuslaitoksella on käytetty triggausantureina sekä etäisyysantureita, että induktiivisia lähestymisantureita. Induktiiviset anturit on todettu käytännöllisemmäksi ja edullisemmäksi ratkaisuksi.

OD-päällepuhallussimulaattoria ajettaessa operaattorit ovat havainneet triggauspisteen siirtyvän eri mittauskertojen välillä. LabVIEW-sovelluksen get data painiketta painettaessa main window välilehden graafiselle näytölle muodostuvan painekäyrän kuvaajasta voidaan nähdä, että triggauspiste saattaa siirtyä useita kymmeniä millimetrejä suuntaan tai toiseen. Triggausanturi ja-toiminto on täsmälleen sama kuin muissakin AIRIn mittauskohteissa, joten vian pääteltiin johtuvan OD-päällepuhallussimulaattorin telojen pienestä halkaisijasta. Pienempi halkaisija saa aikaan suuremman kehänopeuden triggauspisteenä toimivalle pultinpäälle kuin muissa AIRIn sylintereissä.

Kuivatussylinterin halkaisija on 1830 mm ja imutelan halkaisija 1500 mm, kun taas OD-päällepuhallussimulaattorin telan halkaisija on 700 mm. Airi-ajettavuussimulaattorin täydellä nopeudella viira etenee 2400 m/min, joten kui-

vatussylintereiden pyörimisnopeus on n. 7 kierrosta sekunnissa, imutelan n. 9 kierrosta sekunnissa ja OD:n telojen n 15 kierrosta sekunnissa.

### **Induktiiviset lähestymisanturit**

2010 vuodesta lähtien tutkimuslaitoksella on käytetty triggausantureina nopeita 5 kHz:n kytkentätaajuuden omaavia induktiivisia antureita, joiden reagointiaika on noin 0,2 ms. Induktiivinen lähestymisanturi tunnistaa metalliset kohteet muutamaman millimetrin etäisyydeltä. Anturi havaitsee sylinterin päädyssä korotetun pultinpään. Anturin aktivoituessa metallin läheisyydessä saadaan ulostulosignaalinä jännitetason muutos, jota hyödynnetään oskilloskoopissa triggaustoiminnon ehtona. Induktiivisiin antureihin siirryttäessä triggauksen paikoituksen tarkkuus tarkentui lähes seitsemänkertaisesti. (Miulus 2010, 37)

Induktiivisten antureiden toistotarkkuutta on kyseenalaistettu, koska on vaikea määrittellä täsmällistä kohtaa pultin pinnassa, jossa anturin ulostulosignaali saavuttaa triggaustoiminnon ehdot. Nopeuksien kasvaessa ongelmaksi muodostuu myös anturin rajallinen reagointiaika.

### **Optiset merkinlukijat**

Optisella merkinlukijalla kyetään havaitsemaan erittäin pieniä harmaaskaalan muutoksia. Merkinlukijoita käytetään pääasiallisesti pakkaus- ja painokoneissa havaitsemaan erilaisia merkkejä havaittavissa kohteissa (Kuva 31). Merkinlukijoilla kyetään havaitsemaan hyvin pieniä kontrastin vaihteluita suurillakin nopeuksilla, joten nopeusominaisuuksiltaan ne sopivat myös triggauskäyttöön. Tutkimuslaitoksen käyttökohteissa ongelmaksi saattaa kuitenkin muodostua tarkan triggauspisteen määrittäminen sylinterin pinnassa.





Kuva 51. SICK Oy:n valmistamia merkinlukijoita (SICK 2012).

### Pulssianturit

Yksi mahdollinen vaihtoehto triggausanturiksi olisi sylinterin akseliin asennettava pulssianturi (Kuva 32).



Kuva 52. Erilaisia pulssiantureita (Metropolia 2012).

Sylinterin akselin kääntyessä pulssianturi generoi pulssijonon, jossa yksi pulssi vastaa tiettyä jako-osaa, inkrementtiä, akselin kokonaisesta kierroksesta. Inkrementtejä laskemalla voidaan määrittää akselin kulma tietyllä ajanhetkellä. Pulssit muodostetaan yleisesti optisen tekniikan avulla. Anturin sisällä sijaitseva segmentteihin jaettu kiekko pyörii valolähteen ja valontunnistimen välissä ja pulssit syntyvät aina segmenttien katkaistessa valon pääsyn tunnistimelle (Metropolia 2012).

Kääntymiskulman referenssipisteenä toimii ns. nollapulssi, joka on kiinteässä suhteessa muihin pulssikanaviin. Mahdollisessa triggauskäytössä tätä nolla-

pulssia voitaisiin käyttää liipaisuehtona. Pulssiantureiden signaalit johdettaisiin logiikkayksikölle, josta määrättäisiin ohjelmallisesti mitä anturia tarkkaillaan.

Ajettavuussimulaattoreiden rakenne asettaa pulssiantureiden triggauskäytölle joitain haasteita. Sylintereiden akseleihin joudutaan asentamaan liukurengaspakka signaalien vastaanottoa varten, joten pulssianturit jouduttaisiin asentamaan koneen käyttöpuolelle. Joidenkin sylintereiden osalta tämä ei kuitenkaan olisi mahdollista käyttömootoreiden ja ilmapuhalluslinjojen takia.

### **KTL -8 merkinlukijan testaus**

SICK oy:n valmistamaa KTL-8 merkinlukijaa testattiin vaihtoehdoksi nykyisille induktiivisille lähestymiskytkimille triggauskäyttöön (Kuva 54)



Kuva 53. SICK merkinlukija KTL-8.

Anturin lähettämä laserpiste osoitetaan pinnalle, jota halutaan tarkkailla, esim. sylinterin tai telan pääty (Kuva 55). Telan päätyyn tulee merkata jollain tavalla selvä kontrastin muutosalue. Tässä esimerkissä tämä alue on merkitty ohuella paperisuikaleella. Telan pyöriessä anturi havaitsee telan pinnan ja paperisuikaleen välillä tapahtuvan kontrastieron ja muuttaa anturin ulostulosignaalia. Tätä ulostulosignaalin muutosta käytetään oskilloskoopin liipaisuehtona.



Kuva 54. SICK merkinlukija asennettu telan pätyyn.

### Anturin kalibrointi käyttökohteeseen

Anturi tulee kalibroida uudelleen aina kun vaihdetaan käyttökohdetta. Kalibrointi tapahtuu anturin alapuolella sijaitsevan SET-painikkeen avulla (Kuva 56).

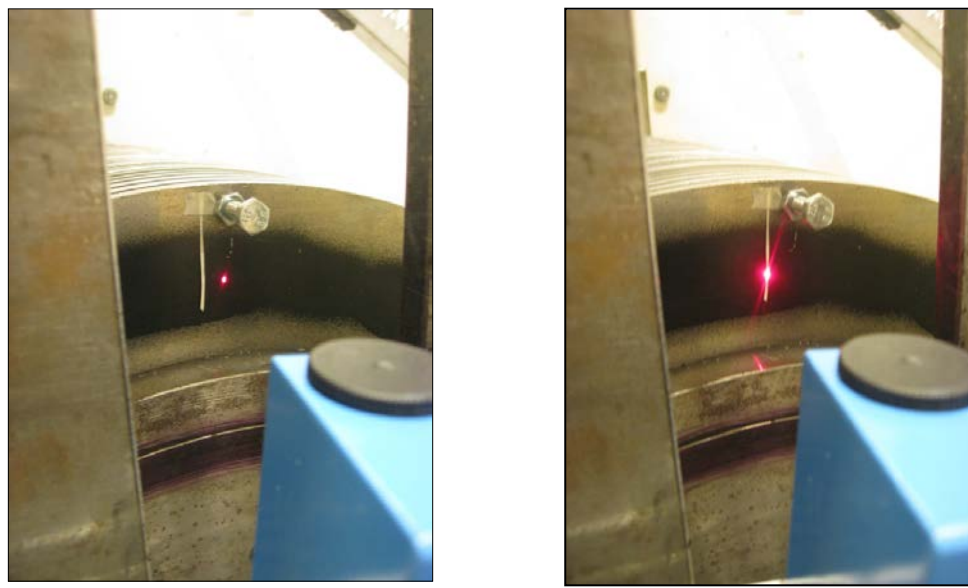


Kuva 55. Merkinlukija alapuolelta kuvattuna.

Laserpiste osoitetaan ensin paperisuikaleen päälle ja tämän jälkeen painetaan SET -painiketta noin kahden sekunnin ajan. Tämän jälkeen laserpiste siirretään johonkin muuhun kohtaan telan pätyä ja painetaan taas SET-painiketta poh-

jassa noin kahden sekunnin ajan. Anturi on tämän jälkeen kalibroitu kyseiseen käyttökohteeseen (Kuva 57).

Jos mitattavien kohteiden pinnat ovat erityisen kiiltäviä tai heijastavia, anturia tulee kallistaa n. 10 astetta horisontaalisuunnassa.



Kuva 56. KTL-8 Merkinlukijan kalibrointi.

### **Tulokset**

Anturin testaus jäi kesken, koska koelaitte vioittui ennen kaikkien koeajojen suorittamista. Suoritettujen koeajojen perusteella anturia ei voida käyttää nykyisessä järjestelmässä, koska simulaattorilaitteiden korkeimmilla nopeuksilla anturin ulostulosignaali ei saavuta tarvittavaa 5 V tasoa. Merkinlukijan käyttö triggausanturina vaatisi siis mittaussovelluksen muuttamista ja lisää koeajoja.

## 5 MITTAUSTOIMINNAN MUUTOKSET

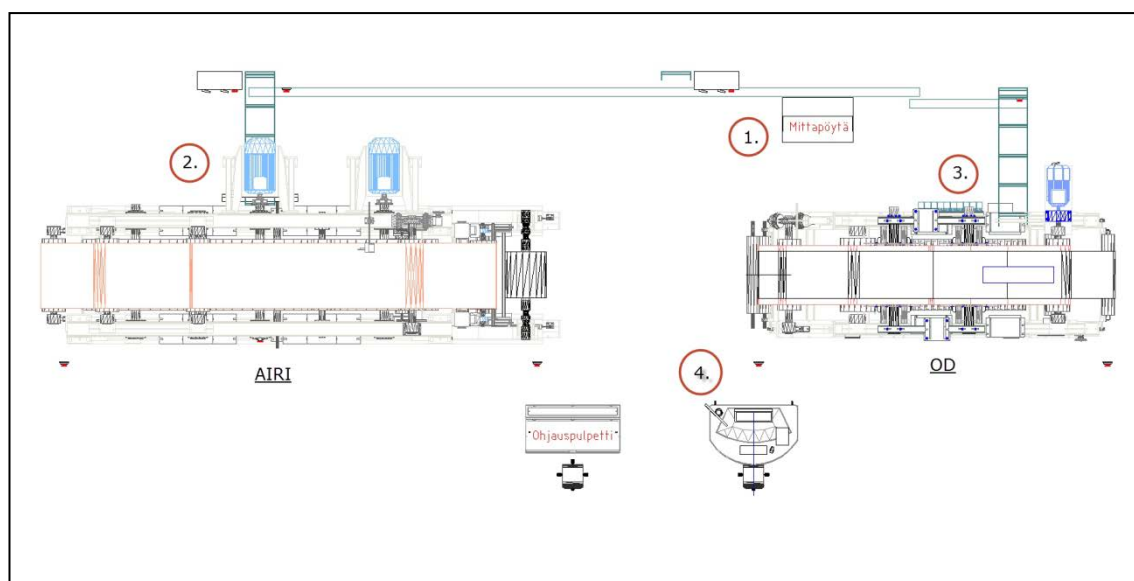
Mittausjärjestelmän laitteisto ja yleinen toiminta pysyivät periaatteeltaan samankaltaisena. Uudistukset olivatkin suurimmaksi osaksi ohjelmallisia, koska uudella järjestelmällä tullaan ohjaamaan kahden simulaattorilaitteen mittaustoimintaa. Oskilloskoopilla tallennetaan edelleen pyörähdyspainesignaalit ja dataloggerilla paine-erolähettimien ja lämpötila-antureiden signaalit. Dataloggeri vaihdettiin uudempaan malliin, jotta yhteys tietokoneeseen saatiin muodostettua USB-väylää pitkin. Nykyisten bridge-b siltavahvistinkortin valmistus on lopetettu, joten niiden rinnalle hankittiin uusi STG-vahvistinkortti. Mittausinstrumenttien toimintaa ohjataan kannettavalta tietokoneelta LabVIEW-sovelluksen avulla. Toiveena oli, että mittausinstrumentit saataisiin mahdollisimman huomaamattomaksi uuden tutkimuslaitoksen tiloissa, joten mittauspöytä sijoitetaan simulaattorilaitteiden käyttöpuolelle.

Ohjelmallista mittaustiedostojen keskiarvoistusta ei koettu tutkimuslaitoksen tulevan toiminnan kannalta prioriteetiksi. Ominaisuus olisi vaatinut suuren määrän ohjelmointityötä ja joistain mittausjärjestelmän nykyisistä hyödyllisiksi havaituista ominaisuuksista olisi jouduttu luopumaan. Keskiarvoistus -toiminnon sijaan työssä keskityttiin tarkemmin DVRT-antureiden tutkimustyöhön. KTL-8-merkinlukijaa testattiin vaihtoehtona nykyiselle triggausanturille. Tulokset jäivät kuitenkin puutteellisiksi Turun ammattikorkeakoulussa sijaitsevan koelaitteen vioituttua.

### 5.1 Mittausjärjestelmän layout ja rakenne

Simulaattorilaitteet sijoitetaan Raision tutkimuslaitokseen kuvan 33 mukaisesti. Järjestelmä on rakenteeltaan luvussa 4.5.1 esitellyn ulkoisen väylärakenteen tyyppinen. Mittaustoimintaa ohjataan kannettavalta tietokoneelta ja kommunikointi mittausinstrumenttien kanssa tapahtuu USB-väylän välityksellä. Paine-

erolähtimet kiinnitetään kummankin simulaattorilaitteen läheisyyteen (Kuva 33, kohdat 2 ja 3), jotta impulssilinjat jäävät mahdollisimman lyhyeksi. Paine-erolähtimien yhteyteen asennetaan myös pieni kytkentäkaappi, johon kerätään lämpötila-antureiden ja paine-erolähtimien ulostulosignaalit. Kytkentäkaapista signaalit johdetaan keskitetysti kaapelirataa pitkin mittauspöydällä sijaitsevaan kytkentäkaappiin (Kuva 33, kohta 1.) ja sieltä edelleen mittausinstrumenteille.



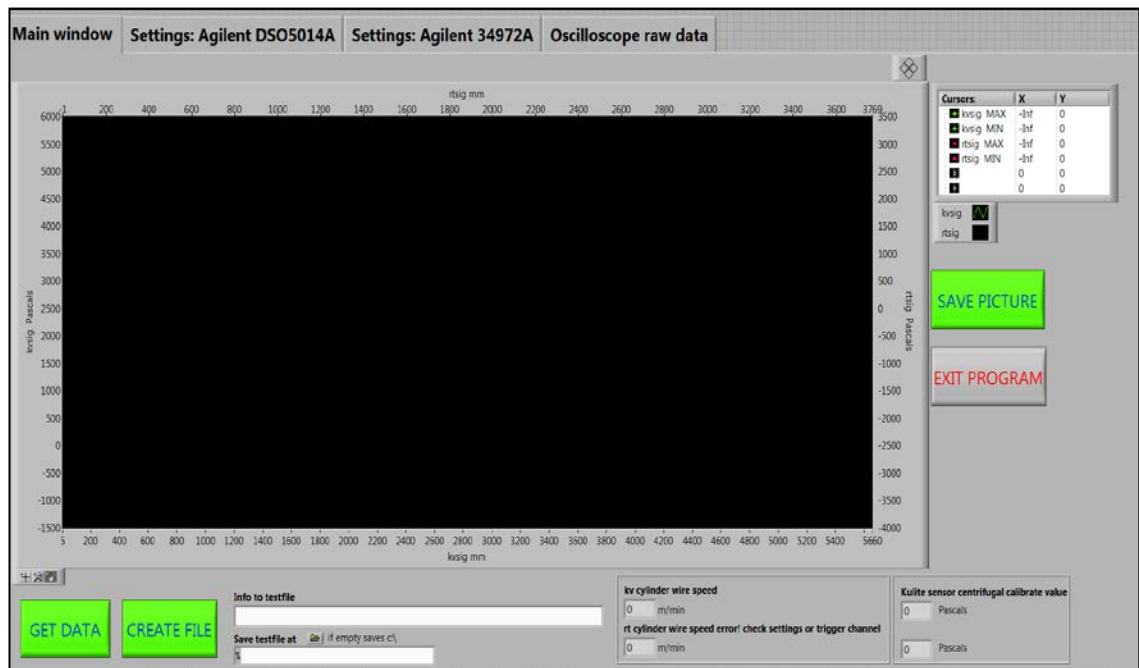
Kuva 57. Raision tutkimuslaitoksen layout.

Simulaattorilaitteiden toiminnan ohjaus on keskitetty hoitopuolella sijaitsevan ohjauspulpetin ympärille. Ohjauspulpetin painikkeilla ja kontrolleilla ohjataan simulaattorilaitteen käyttömooottoreita, paineilmajärjestelmiä ja turvajärjestelmiä, Toiveena oli, että myös mittaustoiminnan ohjaus olisi mahdollista ohjauspulpetin läheisyydessä. Tämän takia mittautietokoneeseen liitetään toinen näyttö, joka sijoitetaan mittauspulpetin viereen, kuvan 33 kohtaan 4. Tällä tavoin simulaattorilaitteen operaattori voi suorittaa suurimman osan mittaustoimenpiteistä ohjauspulpetin äärellä.

Mittausjärjestelyiden ja -sovelluksen valmistelut ja testaus suoritetaan edelleen käyttöpuolella sijaitsevalla mittauspöydällä, jonka jälkeen mittaussovellus voidaan siirtää ohjauspulpetilla sijaitsevalle näytölle. Mittaustoiminnan ohjaus ja mittakansioiden luonti suoritetaan ohjauspulpetilta.

## 5.2 LabVIEW-sovelluksen muutokset

LabVIEW-sovelluksen toiminnot pysyivät periaatteeltaan hyvin samankaltaisina kuin ennen. Ulkoasultaan sovellus suunniteltiin toimivaksi kosketusnäytöllä. Tätä varten painikkeiden ja graafisten näyttöjen kokoa kasvatettiin ja niiden sijoittelua muutettiin (Kuva 34 ja 35).



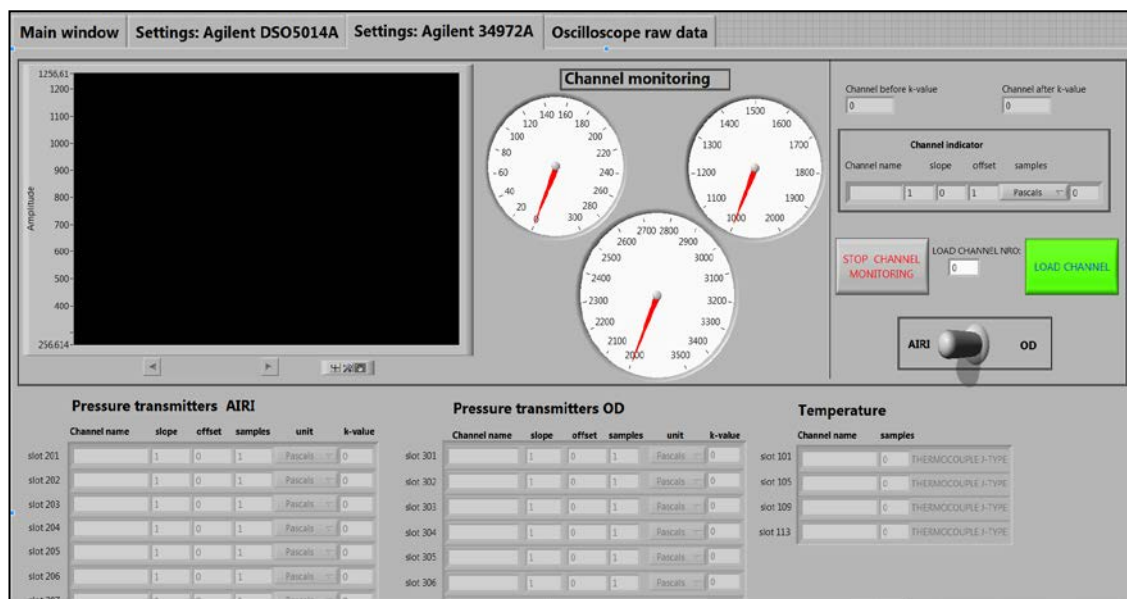
Kuva 58. AIRI + OD-mittaussovelluksen Main window välilehti.

Dataloggerin mittaustoiminnan ohjaus jaettiin kolmeen osaan; kaksi mittauskorttia on määritetty paine-erolähettimeiden signaalien, ja yksi mittauskortti lämpötilantureiden signaalien tallentamista varten. Mittaustoiminnan helpottamiseksi kummankin simulaattorilaitteen paine-erolähettimeiden signaalit ohjataan omalle

mittauskortilleen. Mittaussovelluksen Settings: Agilent 34972A-välilehdelle sijoitettiin jokaiselle mittauskortille oma valintakenttä, josta on mahdollista määrittää kaikille käytettäville dataloggerin kanaville yksilölliset asetukset (Kuva 36).

Kummaltakin simulaattorilaitteelta on mahdollista kerätä painedataa mittaustiedostoihin samanaikaisesti tai tarkkailla yhtä kanavaa reaaliajassa Channel monitoring-toiminnolla. Channel monitoring-toimintoa on mahdollista käyttää vain yhden kanavan tarkkailuun kerrallaan. Välilehdellä sijaitsevalla valintapainikkeella määritetään kumman mittauskortin kanavia halutaan tarkkailla.

Lämpötila-antureiden määrä kasvaa uudessa järjestelmässä, joten lämpötila-antureilta kerättävä data kerätään mittaustiedostoon painedatan kaltaisesti oman otsikon alle.



Kuva 59. Settings: Agilent 34972A-välilehti.



## 6 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin Airi- ja OD-ajettavuussimulaattoreiden siirron mahdollistamia kehitystoimenpiteitä koelaitteiden mittausjärjestelmiin ja järjestelyihin. Selvitystyön tuloksien pohjalta suunniteltiin mittausjärjestelmän rakenne tutkimuslaitoksen uusiin toimitiloihin ja vanhaa LabVIEW-mittaussovellusta modifioitiin sopivaksi uuteen järjestelmään. Järjestelmän asennus ja käyttöönotto tulee tapahtumaan useita kuukausia opinnäytetyön valmistumisen jälkeen, joten järjestelmän asennusta ja käyttöä varten laadittiin erilliset ohjeet. Tämän lisäksi tutkittiin kahden erilaisen etäisyysanturin soveltuvuutta sulkeutuvan ja aukeavan nipin tangenttipisteen paikoittamiseen. Opinnäytetyö rajoittui vain antureiden testaukseen ja tarkempi tutkimustyö tapahtuu 2012 syksyllä toteutettavana erillisenä projektityönä.

Suurin osa kehitystöiden toimivuudesta voitiin testata Turun ammattikorkeakoululla sijaitsevalla koelaitteella, mutta järjestelmän täydellinen testaus tapahtuu vasta uuden järjestelmän käyttöönottovaiheessa.

Opinnäytetyön aikana saatiin kehitettyä tutkimuslaitoksen mittausjärjestelmän eri osa-alueita. Mittausjärjestelyitä saatiin yksinkertaisemmiksi ja mittaussovelluksen toimintoja kehitettiin vastaamaan nykyisiä tarpeita. Työn aikana sain hyvän mahdollisuuden tutustua erilaisiin mittausteknisiin laitteisiin ja käytäntöihin. Mittaussovelluksen kehittämisessä pääsin kartuttamaan LabVIEW-ohjelmointitaitojani. Mielenkiintoisin osa-alue oli etäisyysantureiden tutkimustyö, jonka pohjalta syntyi uusia mahdollisia tutkimusprojekteja.

## LÄHTEET

Agilent 2011. Oscilloscopes. Viitattu 20.10.2012.  
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/54695-97026.pdf>

Bishop, R.-H. 2010. LabVIEW 2009 Student edition. New Jersey: Pearson Education

Hägglom-Ahnger, U.; Komulainen, P.; 2003. Paperin ja kartongin valmistus. 5. painos. Jyväskylä: Opetushallitus.

KnowPap 2004. Sylinterikuivain. Viitattu 20.10.2012. Metso Paper intra-net

Lehtonen, D. 2012. AIRI AJETTAVUUSSIMULAATTORIN MODIFIOINTI, Metso Paper Air Systems R&D Center. Turku: Turun ammattikorkeakoulu

Macrosensors 2012. LVDT sensors. Viitattu 24.5.2012. <http://www.macrosensors.com> > lvdt\_tutorial

Mattsson, T. 2011. Viitattu 12.9.2012. Turun ammattikorkeakoulun intra-net

Metso Paper Oy 2012. Intra-net.

Metso.com 2012. Viitattu 23.11.2012.  
<http://www.metso.com/pulpandpaper/MPwPaperBoard.nsf/WebWID/WTB-100524-2256F-DE47E?OpenDocument>

Metropolia 2012. Viitattu 12.9.2012. <http://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/Pulssianturi>

Microstrain 2012. LVDT sensors. Viitattu 24.5.2012. <http://www.microstrain.com> > support > faq > displacement

National Instruments 2012. Diadem. Viitattu 1.7.2012. <http://www.ni.com> > Products & services > NI Diadem

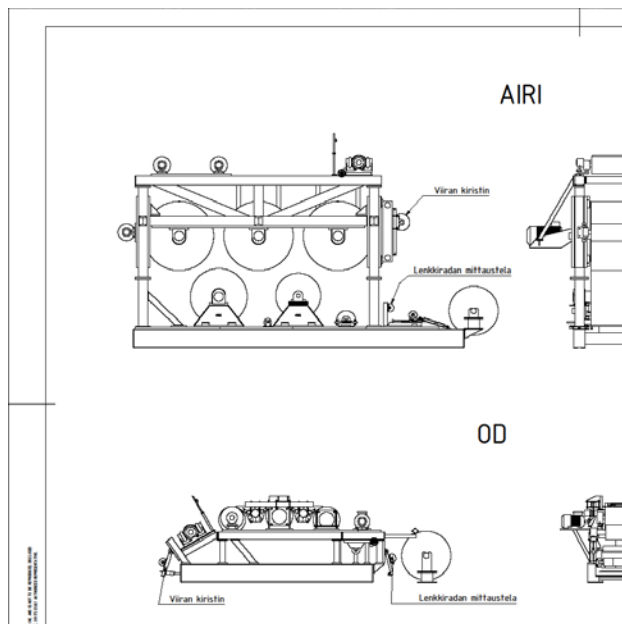
Prof. S. Mukhopadhyay (Lecture Series on Industrial Automation and Control by Prof. S. Mukhopadhyay, Department of Electrical Engineering, IIT Kharagpur)  
[http://www.youtube.com/watch?v=l\\_9Pwyxhe40](http://www.youtube.com/watch?v=l_9Pwyxhe40)

Rosemount 1993. Model 30511C Differential Pressure Transmitter product data sheet.

SICK oy 2012. Viitattu 20.10.2012  
[http://www.sick.com/fi/fifi/home/products/product\\_portfolio/Pages/product\\_overview.aspx](http://www.sick.com/fi/fifi/home/products/product_portfolio/Pages/product_overview.aspx)

Tom Miulus, 2010. MITTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITYS JA VIRTUAALIINSTRUMENTOINTI  
 Metso Paper Air Systems R&D Center. Turku: Turun ammattikorkeakoulu

## Airin ja OD:n uudet rakenteet



## Koelaitteiden sijoittelu Raision tutkimuslaitokselle

