

Elias Asikainen

Testausjärjestelmä hiilidioksidimittauskortille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

3.9.2013

Tekijä Otsikko	Elias Asikainen Testausjärjestelmä hiilidioksidimittauskortille
Sivumäärä Aika	27 sivua 3.9.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Elektroniikan koulutusohjelma
Ohjaaja(t)	Testaussuunnittelija Pekka Poussa Yliopettaja Kari Salmi
<p>Tässä insinööriyössä oli tavoitteena suunnitella testijärjestelmä MiMS CO2 hiilidioksidianturin korttitason tuotantotestaamista varten. Insinööriyössä kuvattiin piirikorttien testausjärjestelmää ja testaussuunnitteluprosessia Ge Healthcarella. Testausjärjestelmässä on tarkoituksena havaita vialliset piirikortit ennen niiden asentamista valmiiseen tuotteeseen.</p> <p>Työssä perehdyttiin korttitason tuotantotestereiden laitteistoon ja ohjelmistoon sekä testaussuunnitteluprosessiin GE Healthcarella. Korttitesterille valittiin laitteistoa, suunniteltiin elektroniikka ja kirjoitettiin testausohjelmistoa LabVIEW'illä.</p> <p>Testausjärjestelmän suunnittelussa suurin haaste oli muuttuvat vaatimusmäärittelyt. Lopullista testijärjestelmää ei saatu suunniteltua ja koottua, koska testattavan kortin tuotekehitys oli vielä pahasti kesken.</p>	
Avainsanat	Tuotantotestaus, testaussuunnittelu, korttitesteri, LabVIEW

Author Title	Elias Asikainen Functional Test System for a Carbon Dioxide Measurement Board
Number of Pages Date	27 pages 3 September 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructor(s)	Pekka Poussa, Test designer Kari Salmi, Principal lecturer
<p>The purpose of this thesis was to design a functional test system for a MiMS CO₂ carbon dioxide measurement card. The purpose of the test system is to detect faulty circuit boards before they are assembled to a high level assembly.</p> <p>Board level production tester equipment and software were studied in this thesis. Functional circuit board test systems and test design process at GE Healthcare are described in the study. Test equipment for the board level tester was chosen, electronics was designed and software was written with LabVIEW.</p> <p>The greatest challenge was changing requirements for the tester. The final test system could not be finished, because product development of the MiMS CO₂ carbon dioxide measurement card was not finished.</p>	
Keywords	Production testing, test designing, board level tester, LabVIEW

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Insinööriyöprojektin taustaa	1
2.1	Veren hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen	1
2.2	MiMS CO ₂ -hiilidioksidimittauskortti	3
2.3	Testaaminen GE Healthcarella	6
2.4	Korttitesterin suunnitteluprosessi GE Healthcarella	7
3	Korttitesterin testauslaitteiston kuvaus	11
3.1	Nykyisin käytössä olevat korttitesterien testauslaitteistot	11
3.2	MiMS CO ₂ -hiilidioksidimittauskortin testauslaitteisto	13
4	Korttitesterin testausohjelmiston kuvaus	20
4.1	LabVIEW-ohjelmointi	20
4.2	TestStand-käyttöliittymä	23
5	Yhteenveto	24
	Lähteet	26

Lyhenteet

DAQ	Data acquisition; tiedonkeruu
DDS	Detailed design specification, testien määrittelydokumentti
FDA	U.S. Food and Drug Administration; Yhdysvaltalainen terveysturvaviranomainen
FPY	First Pass Yield; ensisaanto
GE	General Electric; Yhdysvaltalainen yritys
HLA	High Level Assembly; koottu laite
MiMS	Miniaturized Mainstream Sensor; hiilidioksidimittauskortti
NDIR	Nondispersive Infrared Sensor; ei-dispersioiva infrapuna-anturi
NI	National Instruments; Yhdysvaltalainen yritys
PXI	PCI eXtension for Instrumentation; PCI:n laajennukset mittakäyttöön
TRS	Test requirement specification; vaatimusmäärittelyt
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter; universaali asynkroninen lähetin-vastaanotin
UUT	Unit Under Test; testattava kortti

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä esitellään funktionaalinen korttitesteri MiMS (*Miniaturized Mainstream Sensor*) CO₂ hiilidioksidimittauskortille ja kuvataan piirikorttien testausjärjestelmää. Testausjärjestelmän tavoitteena on tunnistaa vialliset piirikortit ennen niiden asentamista valmiiseen tuotteeseen.

GE Healthcare Finland on osa yhdysvaltalaisista monialayritystä General Electriciä, joka on markkina-arvoltaan yksi maailman suurimmista yrityksistä. GE Healthcaren liikevaihto on noin 17 miljardia dollaria ja työntekijöitä sillä on noin 46 000 sadassa eri maassa, mistä Suomessa työskentelee n. 1 100. Sairaalalaitteita valmistavan GE Healthcare Finlandin tuotteisiin kuuluu muun muassa monitorointi- ja anestesia-laitteet. [1; 2.]

GE Healthcaren testaus suunnitteluosasto suunnittelee, kehittää ja ylläpitää testausjärjestelmiä tuotannon käyttöön. Testausjärjestelmiä on erilaisia eri käyttötarkoituksiin, kuten lämpökaappeja, koottujen laitteiden testereitä ja funktionaalisia korttitesteriä.

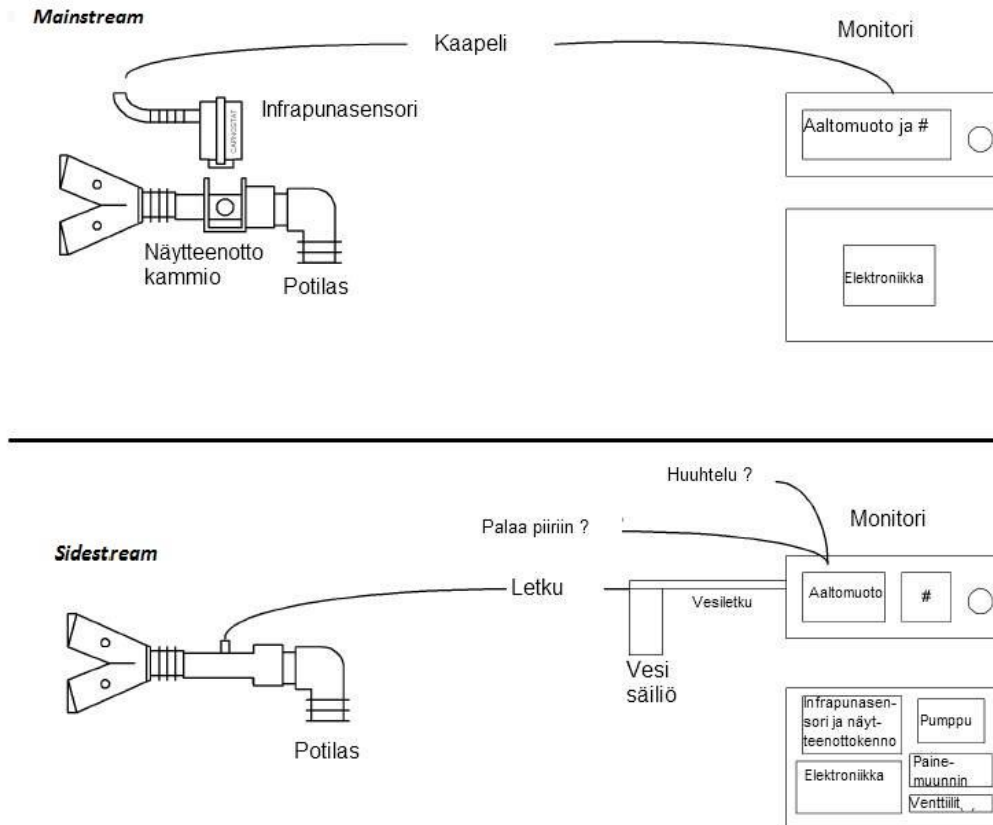
2 Insinööriyöprojektin taustaa

Tämän insinööriyöprojektin taustalla on kehitteillä oleva uusi *mainstream*-tekniikkaan perustuva hiilidioksidimittauskortti. Kortin tarkoituksena on parantaa useita markkinoilla olevia hiilidioksidimittauskorttien liittyviä ongelmia, kuten kortin painoa ja sen hintaa. Tässä insinööriyössä oli tavoitteena suunnitella tuotantotesteri kehitteillä olevalle hiilidioksidimittauskortille.

2.1 Veren hiilidioksidipitoisuuden mittaaminen

Veren hiilidioksidipitoisuus on tärkeä indikaattori potilaan tilasta hoidon tai leikkauksen aikana. Hiilidioksidin mittaaminen verestä laboratoriossa vie aikaa ja viivästyksistä voi aiheutua kohtalokkaita seurauksia potilaalle. Jos potilaan veri on vähissä, tulisi verinäytteiden ottaminen minimoida.

Veren hiilidioksidipitoisuus voidaan mitata myös uloshengitysilmaasta. Tähän tarkoitukseen on käytetty kahta eri tekniikka: *sidestream* (kuva 1, ylempi osa) ja *mainstream* (kuva 1, alempi osa). *Sidestream*-tekniikassa osa potilaan uloshengitysilmaasta siirretään letkua pitkin anturille, kun taas *mainstream*-tekniikassa hiilidioksidipitoisuus mitataan jo näytteenottopaikassa. Toisin sanottuna *mainstream*-tekniikassa hiilidioksidianturi on sijoitettu hengitystien välittömään läheisyyteen.



Kuva 1. Mainstream- ja sidestream-laitteiden toimintaperiaatteet. [3.]

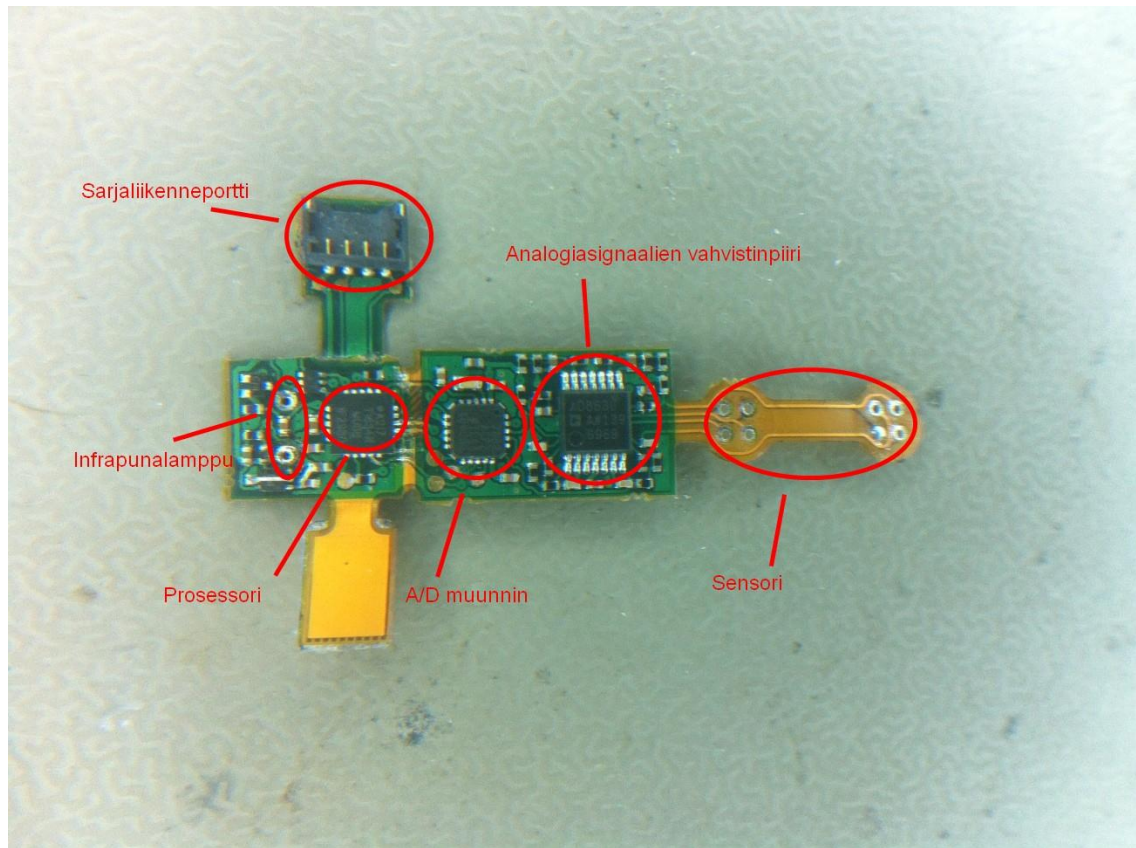
Taulukosta 1 nähdään, että *mainstream*-tekniikassa on ratkaistu useita *sidestream*-tekniikkaan liittyvää ongelmaa.

Taulukko 1. *Mainstream*- ja *sidestream*-tekniikoiden vertailua [4]

Sidestream-tekniikka		Mainstream-tekniikka	
Edut	Huonot puolet	Edut	Huonot puolet
Helppo kytkeä	Mittauksessa on viivettä	Ei näytteenottoletkua	Näytteenotto-kammion ikkuna saattaa peittyä eritteistä, mutta se on helposti vaihdettavissa
Voidaan käyttää hereillä oleville potilaille	Näytteenottoletkun tukkeutumattomat	Ei tukkeutumia	Vaikea käyttää potilaan ollessa erikoisemmissa asennoissa
Potilas voi olla eri asennoissa, kuten eteenpäin kallistuneena	Vesihöyryn paineen muutos näytteenottoletkussa vaikuttaa hiilidioksidipitoisuuteen	Ei altis painenvaihtelulle	
Voidaan käyttää samanaikaisesti erilaisten sieraimeihin kytkettävien happijärjestelmien kanssa	Paineen vaihtelu näytteenottoletkussa vaikuttaa mittaukseen	Ei epäpuhtauksia mittauksessa	
	Vaikea käyttää vastasyntyneillä ja pienillä lapsilla	Ei mittausviivettä	
		Sopii myös vastasyntyneille	

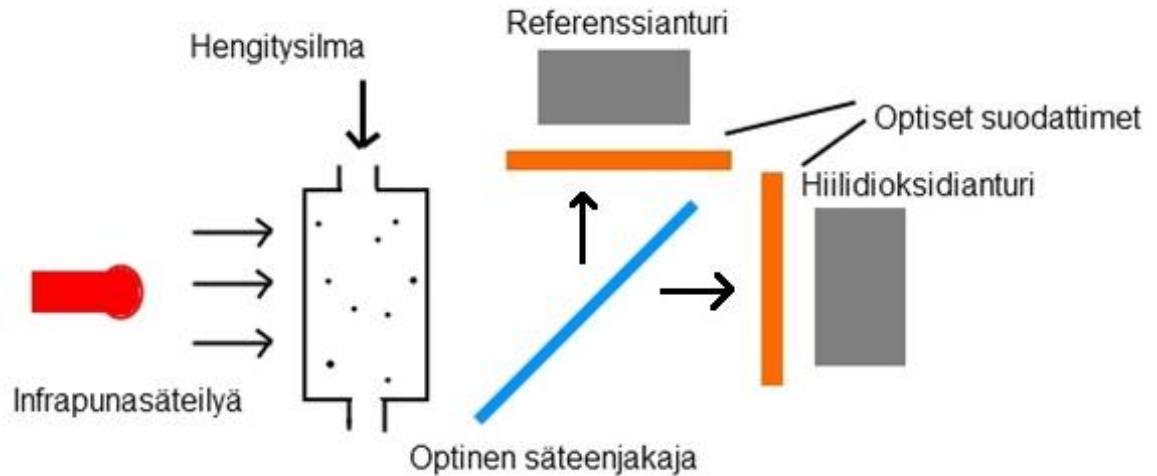
2.2 MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortti

Lyhenne MiMS tulee sanoista miniaturized mainstream sensor. MiMS-piirikortti koostuu infrapunalampusta, infrapuna-antureista, prosessorista sekä oheiskomponenteista, kuten jänniteregulaattoreista ja vahvistimista (kuva 2, ks. seuraava sivu).



Kuva 2. MiMS-piirikortin prototyyppi; kuvassa sensori ja infrapunalamppu eivät ole kalustettuina korttiin

MiMS:n sensori perustuu NDIR-tekniikkaan (kuva 3, ks. seuraava sivu), eli ei-dispersioivaan infrapuna-anturitekniikkaan (NDIR = nondispersive infrared sensor). Infrapunalamppu lähettää infrapunasäteilyä hengitysilman, optisen säteenjakajan ja optisen suodattimen läpi infrapuna-anturille. Hiilidioksidi absorboi sähkömagneettista säteilyä infrapuna-alueella, noin 4,2–4,3 mikrometrin aallonpituudella. Kapeakaistainen optinen suodatin suodattaa infrapunavalosta pois kaikki muut aallonpituudet ennen sensoria. Osa valosta absorboituu hiilidioksidin ja sensori havaitsee hiilidioksidista läpi päässeän valon. Referenssianturilla mitataan sellaisten aallonpituuksien valon intensiteetti, jotka eivät kuulu hiilidioksidin absorptiospektriin. Anturissa on ohut musta pinta, joka absorboi infrapunavaloa ja muuttaa sen lämmöksi. Lämpötilaero mitataan käyttäen termoparia, joka muuttaa sen jännitteeksi. [5.]



Kuva 3. NDIR-sensorin toimintaperiaate [6.]

Vertaamalla referenssianturiin tullutta valon intensiteettiä hiilidioksidianturin lukemaan, voidaan laskea hiilidioksidiin imeytynyt valon määrä, modifioitua Lambertin-Beerin lakia käyttäen. Lambertin-Beerin lain mukaan sähkömagneettisen absorbanssi on suoraan verrannollinen absorboivan aineen pitoisuuteen:

$$A = \varepsilon bc = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

(1)

Jossa A on absorbanssi

ε on molaarinen absorptiokerroin

b on näytteen paksuus

c absorboivan aineen konsentraatio.

I on läpi päässeeseen säteilyn intensiteetti

I_0 on säteilyn alkuperäinen intensiteetti. [6.]

Anturin jännite vahvistetaan vahvistinpiirissä ja muutetaan digitaaliseen muotoon A/D-muuntimella. Kortin prosessori kerää anturin mittausdatan ja lähettää sen sarjaportin kautta eteenpäin analysoitavaksi.

Kortti testataan ilman infrapunalamppua ja anturia, kuten se on kuvassa 2 (ks. sivu 4). Korttiteresterissä lamppua simuloidaan erikokoisilla vastuksilla, ja anturia voidaan simuloida erilaisilla signaaleilla.

2.3 Testaaminen GE Healthcarella

Huonosti suoritettu testaaminen saattaa aiheuttaa tarpeetonta korjaus- ja huoltotyötä, mikä aiheuttaa helposti suuria kustannuksia. Tuotteiden laatu vaikuttaa helposti yrityksen maineeseen. Testauksen tärkeys korostuu erityisesti GE Healthcaren kaltaisissa yrityksissä, jotka valmistavat potilashoitoon tarkoitettuja tuotteita. GE Healthcaren tuotteiden on täytettävä tiukat laatuvaatimukset. Eri maiden viranomaiset, kuten yhdysvaltalainen FDA (U.S. Food and Drug Administration), auditoivat säännöllisesti GE Healthcaren toimintaa. [7.]

GE Healthcaren testaussuunnitteluosasto suunnittelee testauslaitteita tuotannon tarpeisiin. Testerit suunnitellaan yhteistyössä tuotekehityksen kanssa. Usein valmiit testit toimitetaan alihankkijoille, jotka valmistavat ja testaavat tuotteet.

Piirikorttien tuotantotestaamisella pyritään estämään viallisten piirikorttien päätyminen koottuihin HLA-laitteisiin (HLA = high level assembly). Piirikorttien testaamisella pyritään havaitsemaan ovatko komponentit ladottu oikein päin, mahdolliset oikosulut, tina-sillat, kylmäjuotokset, puuttuvat komponentit sekä vialliset komponentit.

Funktionaaliossa korttitesterissä simuloidaan piirikortin elektroniikan toimintaa. Korttitesterissä mitattavia suureita ovat esim. jännitteet, virrat ja digitaalisten porttien tilat. Korttitesterissä testattavalle kortille voidaan ladata erillinen testausohjelmisto, jos testattava kortti eli UUT (Unit Under Test) sisältää ohjelmoitavia komponentteja, kuten prosessoreja. Testausohjelman avulla voidaan testata esim. mikropiirien I/O- (Input/Output) porttien toimintaa. Tyypillinen tehtävä testausohjelmalle voisi olla esim. A/D (analog to digital transformer) muuntimen arvon palauttaminen testerille. Funktionaaliossa korttitesterillä pystytään testaamaan lähes kaikki komponentit.

Testauksen lopuksi mikropiireille kirjoitetaan tuotteiden lopulliset ohjelmat tai HLA-testauksessa tarvittava testausohjelma. Piirikortin pysyväismuistiin (EEPROM) kirjoitetaan testibitti, josta voidaan tarkistaa, onko kortti mennyt läpi korttitesteristä.

Jos UUT läpäisee kaikki testit korttitesterissä, se liitetään HLA-kokoonpanoon, joka testataan HLA-testerillä. HLA-testauksen tavoitteena on varmistaa, että koottu laite toimii toivotulla tavalla. HLA-testerissä testataan esim. moduulikommunikaatio ja kaapelien tunnistus.

HLA-testauksen jälkeen osa tuotteista laitetaan lämpökaappiin, jossa tuotteen toimintaa tarkkaillaan eri lämpötiloissa. Lämpökaapilla myös vanhennetaan tuotetta. Jos tuote läpäisee lämpökaapitestauksen, se testataan vielä kertaalleen HLA-testerissä ennen tuotteen toimittamista asiakkaalle.

Kaikissa testausvaiheissa testaustuloksista muodostetaan testiraportti, joka ladataan testiraporttietokantaan. Testiraportti toimii todisteena siitä, että laite on testattu. Lisäksi raporteista saadaan hyödyllistä tietoa, jota voidaan käyttää esim. valmistusprosessin tai tuotteen parantamiseen. Testituloksista voidaan laskea muun muassa ensisaanto, eli FPY (FPY = first pass yield), joka on testaukseen menneiden tuotteiden suhde testauksesta läpi päässeisiin tuotteisiin. Ensimmäisellä kerralla testauksesta läpi menneet tuotteet parantavat -ja uudelleen testaukseen menevät tuotteet huonontavat FPY-arvoa (kaava 2).

$$FPY = \frac{(x - y)}{(x + y)} \quad (2)$$

FPY on ensisaanto

x on ensimmäisellä kerralla läpi menneet yksiköt

y on uudelleen testattavat yksiköt.

Koko prosessin FPY lasketaan kaavalla 3

$$FPY_{Prosessi} = FPY_{ProsessiA} * FPY_{ProsessiB} * FPY_{ProsessiC} \dots \quad (3)$$

missä osaprosessien FPY-arvot kerrotaan keskenään. [8.]

2.4 Korttiterin suunnitteluprosessi GE Healthcarella

Testaussuunnittelu alkaa tuotekehityksen tekemillä vaatimusmäärittelyillä (*Tester Requirements Specification*, TRS). Vaatimusmäärittelyissä määritetään kriteerit korttiterin toiminnallisuudelle, eli mitä testejä korttiterin on pystyttävä tekemään sekä testeille testirajat.

Seuraavaksi tehdään projektisuunnitelman, jossa määritellään projektin sisältö, aikataulut sekä muita asioita, kuten projektiin liittyvä henkilöstö. Projektisuunnitelmassa määritellään myös projektin aikana tuotettavat dokumentit. Myös testerin validointia ja verifiointia varten tehdään suunnitelmat.

Testien ja testilaitteiston suunnittelu voidaan aloittaa jo ennen lopullisen TRS:n valmistumista. Valmiista testeistä tehdään määrittelydokumentti (DDS, *Detailed Design Specification*), missä määritellään tehtävät testit yksityiskohtaisesti. DDS:ssä määriteltäviä asioita ovat esimerkiksi, mitä mitataan ja mistä mitataan.

Testilaitteiston piirustukset ja testiohjelma katselmoidaan. Katselmoinnissa päätetään projektin jatkumisesta tai, tarvitaanko siihen muutoksia. Muutoksia tehtäessä voidaan joutua palaamaan takaisin vaatimusmäärittelyihin tai projektisuunnitelmaan.

Jos katselmoinnissa päätetään projektin jatkumisesta, testeri kootaan, minkä jälkeen testilaitteisto ja testiohjelma verifioidaan. Verifiointilla todennetaan, että testeri vastaa alkuperäisiä suunniteltuvaatimuksia. Verifiointissa testerin mittatuloksia verrataan kalibroiduilla mittalaitteilla (esim. yleismittarilla ja oskilloskoopilla) tehtyihin mittauksiin.

Verifiointin jälkeen testeri validoidaan. Validointi on menettely, millä varmistetaan, että testeri sopii aiottuun käyttötarkoitukseen. Validoinnissa varmistetaan testerin toiminta, virheen tunnistus ja mittausten toistettavuus. Validointiraporttiin liitetään todisteeksi testerin toiminnasta testiraportti, jonka testeri muodostaa ja lataa tietokantaan. Virheen tunnistus testataan aiheuttamalla järjestelmään tahallinen vika (esim. poistamalla testineula), minkä testerin tulee havaita. Testien toistettavuus varmennetaan testiraportista saadun tiedon avulla. Testijono ajetaan läpi kymmenen kertaa kolmella eri kortilla. Mittadatasta lasketaan yksittäisten testien mittaustulosten hajontaa ja mittaustulosten osumista raja-arvojen keskelle kuvaavat C_p - (kaava 4, ks. seuraava sivu) ja C_{pk} -arvot (kaava 5, ks. seuraava sivu).

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

(4)

USL on ylempi mittausraja

LSL on alempi mittausraja

σ on keskihajonta.

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right]$$

(5)

μ on mittaustulosten oletettu keskiarvo.

Keskihajonta σ lasketaan kaavalla 6:

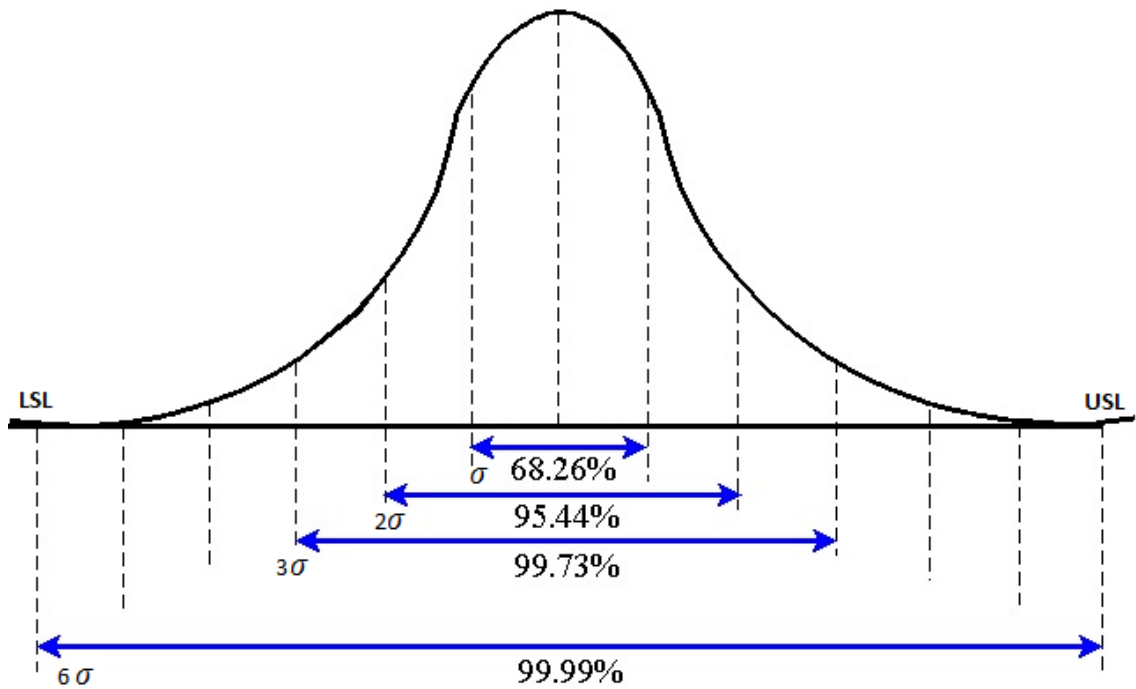
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

(6)

x_i on mittatulos

\bar{x} on mittatulosten keskiarvo.

GE Healthcaren tuotannossa on käytössä Six-Sigma (6σ) laadunjohtamisen prosessi. Six-Sigma prosessissa C_p ja C_{pk} arvoille on asetettu alarajaksi 2. Alarajojen ollessa 2, korkeintaan 0.002 ppm (eli 0,0000002 %) mittauksista osuu raja-arvojen ulkopuolelle testerin mittavirheen takia. Laskuissa oletetaan mittadatan noudattavan normaalijakaumaa (kuva 4, ks. seuraava sivu). [9; 10.]



Kuva 4. Mittadatan osuminen normaalijakauman sisään eri sigma arvoilla [11].

Cpk-arvoa laskettaessa oletetaan, että tulosten tavoitearvo on toleranssialueen keskikohdassa. Näin ei kuitenkaan aina ole, esimerkiksi mitattaessa digitaalisen 0-tilan jännitettä, jolloin rajat voisivat olla esim. 0,00-0,30 (V). Tällaiset mittaukset eivät sovellu Cp- ja Cpk-arvojen laskentaan. [12, s.176; 13.]

Validoinnin jälkeen testerille tehdään yksikkökoestusohje (Unit Test Instruction). Yksikkökoestusohje sisältää ohjeet testerin käyttöä varten, kuvaukset kaikista testeistä sekä testirajat.

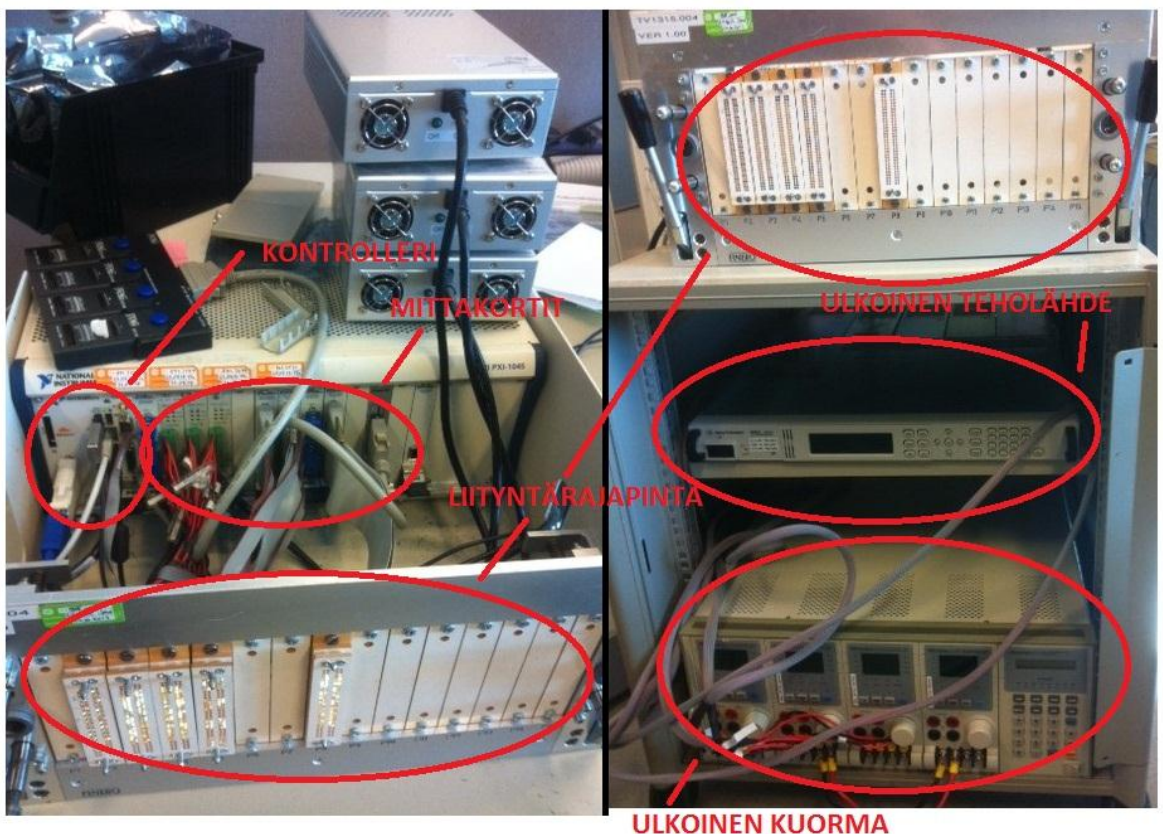
Lopuksi testerin toiminta varmennetaan vielä kertaalleen testerin lopullisessa tuotantoympäristössä. Varmentamiseen käytetään samoja menetelmiä kuin testerin validoinnissa. Toistettavuutta ei varmenneta tässä vaiheessa enää uudestaan, ellei kyseessä ole testerin kaksoiskappale. Varmentamisen jälkeen testerin voidaan ottaa käyttöön tuotannossa.

3 Korttitesterin testauslaitteiston kuvaus

3.1 Nykyisin käytössä olevat korttitesterien testauslaitteistot

GE Healthcarella on käytössä LYNX- ja Genesis-testijärjestelmät sekä joitakin vanhempia testijärjestelmiä. Tulevaisuudessa kaikki testerit pyritään kehittämään Genesis-testijärjestelmälle. Tämän insinööryön tekovaiheessa Genesis oli melko uusi testijärjestelmä, eikä sille oltu kehitetty vielä valmiita testereitä, joten suurin osa testereistä käyttää LYNX-testijärjestelmää.

LYNX-testijärjestelmä rakentuu National Instrumentin 18-paikkaisen PXI-testiaseman ympärille. PXI-testiasema sisältää mittakortit ja kontrollerit. Lisäksi testiasemaan voidaan liittää ulkoinen kuorma sekä ulkoisia teholähteitä. Kuvassa 5 esitetään LYNX-testijärjestelmän kokoonpano.



Kuva 5. LYNX-testiasema.

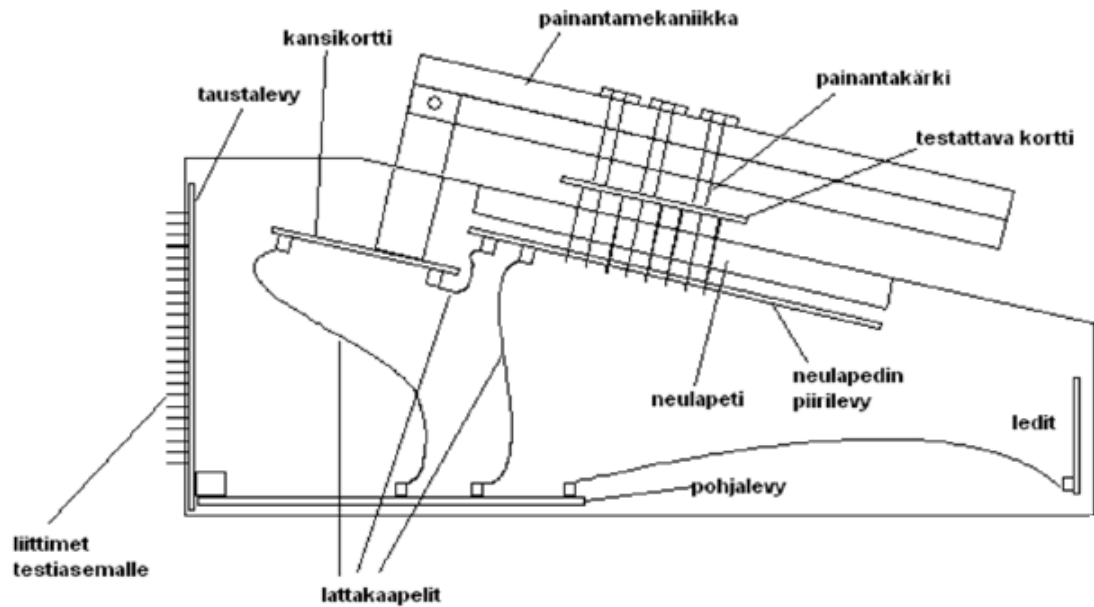
Genesis-järjestelmässä kaikki tarvittavat laitteet on kasattu yhteen kaappiin (kuva 6). Kaikki uudet testerit pyritään suunnittelemaan Genesis-testijärjestelmälle. Aikaisemmin GE Healthcaren eri maissa sijaitsevat testaus suunnittelijat ovat käyttäneet useita erilaisia testijärjestelmiä. Testijärjestelmiä on pyritty yhtenäistämään, minkä takia Genesis kehitettiin.



Kuva 6. Genesis-testijärjestelmä.

Testiasemiin liitytään ns. *testi-fixturella* (Kuva 7, seuraava sivu). *Testi-fixture* on piirikortikohtainen, joskin joillakin *testi-fixtureilla* voidaan testata useita samankaltaisia kortteja.

Testi-fixture sisältää neulapedin, painantamekaniikan, sekä mittauselektroniikka (kuva 7, ks. seuraava sivu). Testattavan piirikortin testipisteisiin kontaktoidutaan neulapedillä, sekä tarvittaessa erilaisilla liittimillä. *Testi-fixturen* takana on liittimet, joilla se liitetään testiasemaan.

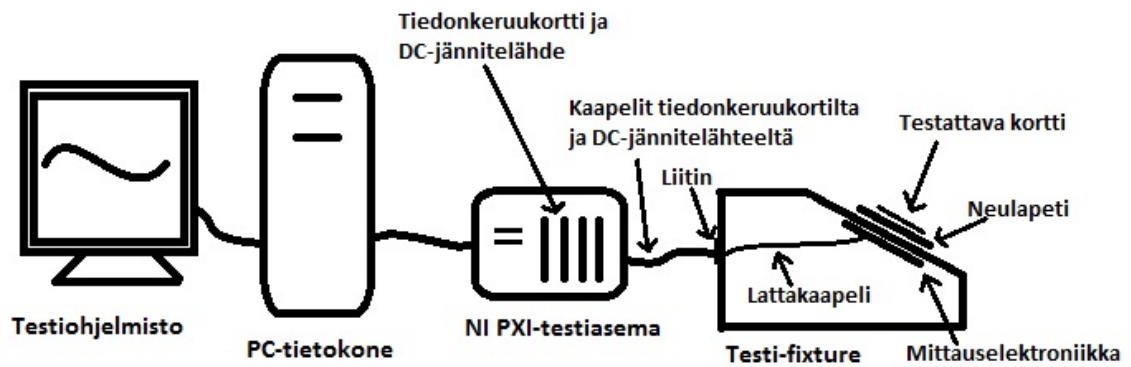


Kuva 7. Testi-fixture.

3.2 MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortin testauslaitteisto

MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortin testauslaitteiston lopullista kokoonpanoa ei oltu vielä päätetty tämän insinööryön tekovaiheessa. Projektin rahoitusta ei oltu vielä hyväksytty, joten laitteistoa ei voitu tilata. MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortin suunnittelu oli vielä kesken, joten kaikkia sille tehtäviä testejä ja testipisteitä ei oltu vielä määritelty. Sitä ei oltu vielä päätetty, että testataanko testerillä yksi vai useampi kortti kerralla.

Testerit tulevat koostumaan NI PXI-testiasemasta, mihin liitetään tiedonkeruukortti ja DC-jännitelähde, testi-fixturesta, PC-tietokoneesta, sekä testiohjelmistosta (kuva 8, ks. seuraava sivu). Testiohjelmisto koodataan LabVIEW'illä ja sitä ajetaan TestStand-operaattorikäyttöliittymällä. Ohjelmistolla ohjataan NI PXI-testiasemaan liitettäviä DAQ-tiedonkeruukorttia (DAQ = data acquisition), sekä DC-jännitelähdettä. DAQ-kortti kerää dataa testi-fixturessa olevan neulapedin ja mittauselektronikan kautta testattavasta kortista. DC-jännitelähteellä syötetään virtaa mittauselektronikalle sekä testattavalle kortille.



Kuva 8. MiMS CO₂-kortin testausjärjestelmä

GE Healthcarella oli valmiina ylimääräinen NI PXI-1033 testiasema, joten sitä päätettiin käyttää (kuva 9). NI PXI-1033 testiasemassa on paikat viidelle PXI-laitteelle. PXI on mittausjärjestelmästandardiväylä (PXI = *PCI extension for instrumentation*). PXI-väylän ero tavalliseen PC-tietokoneista tuttuun PCI-väylään on liipaisu- ja synkronointilinjat. Siinä on 400W:n tehrolähde, mikä on riittävästi PXI-asemaan liitettäville tiedonkeruukortille ja DC-jännitelähteelle.



Kuva 9. NI PXI-1033-testiasema

Tiedonkeruukortiksi valittiin NI PXIe-6363 DAQ-kortti (ks. kuva 10, seuraava sivu). PXIe-6363:ssa on 32 analogista input-kanavaa analogimittauksia varten. Mittausten näytteenottotaajuus on 1 MS/s (miljoonaa näytettä sekunnissa) ja resoluutio 16-bittiä ± 10 V. Analogisia lähtöjä on neljä ja niiden taajuus on 2.86 MS/s sekä resoluutio 16-bittiä ± 10 V. Analogilähtöjä käytetään esim. DC-jännitteiden ja *ripple*-signaalien simuloimiseen. Digitaalisia I/O-linjoja on 48. Niitä tarvitaan ohjaamaan mittauselektronikka

sekä Boolean-tilojen mittauksiin. Lisäksi kortissa on neljä 32-bittistä ajastinta/laskuria. Laskureita käytetään esim. pulssinleveyden ja kellotaajuuden mittaamiseen.



Kuva 10. NI PXIe-6363 tiedonkeruukortti [13]

DC-jännitelähteeksi valittiin NI PXI-4130 Power SMU (SMU = *source measure unit*) (kuva 11). Sillä pystytään sekä mittaamaan että asettamaan jännitteitä ja virtoja. Se pystyy asettamaan ± 20 V:n jännitteen ja syöttämään 2 A:n virtaa. Mittatarkkuus on tarkimmillaan 1 nA.



Kuva 11. NI PXI-4130 DC-jännitelähde [14].

Tiedonkeruukortin ja DC-jännitelähteen valintaan vaikutti se, että tuotekehityksellä on käytössä samanlaiset kortit. Kun testeri lähetetään alihankkijalle, GE Healthcarelle tarvitaan kaksoiskappale testeristä. Alihankkijalle lähetettävä testeri ja tuotekehityksen testeri käyttäisivät samoja ajureita, joten tuotekehityksen testeriä voitaisiin käyttää kaksoiskappaleena.

Toisin kuin LYNX- ja Genesis-testijärjestelmissä, MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortin *testi-fixtureen* liitytään kaapeleilla. Kaapeli liitetään *testi-fixturen* sivuun kiinni, mistä vedetään lattakaapeli mittaaselektronikkakorttiin. Painantamekaniikan, jolla testattava kortti liitetään testi-fixtureen, suunnittelee GE Healthcaren ulkopuolinen alihankkija.

Painantamekaniikan suunnittelu on erityisen haasteellista piirikortin pienen koon ja *flex*-rakenteen vuoksi.

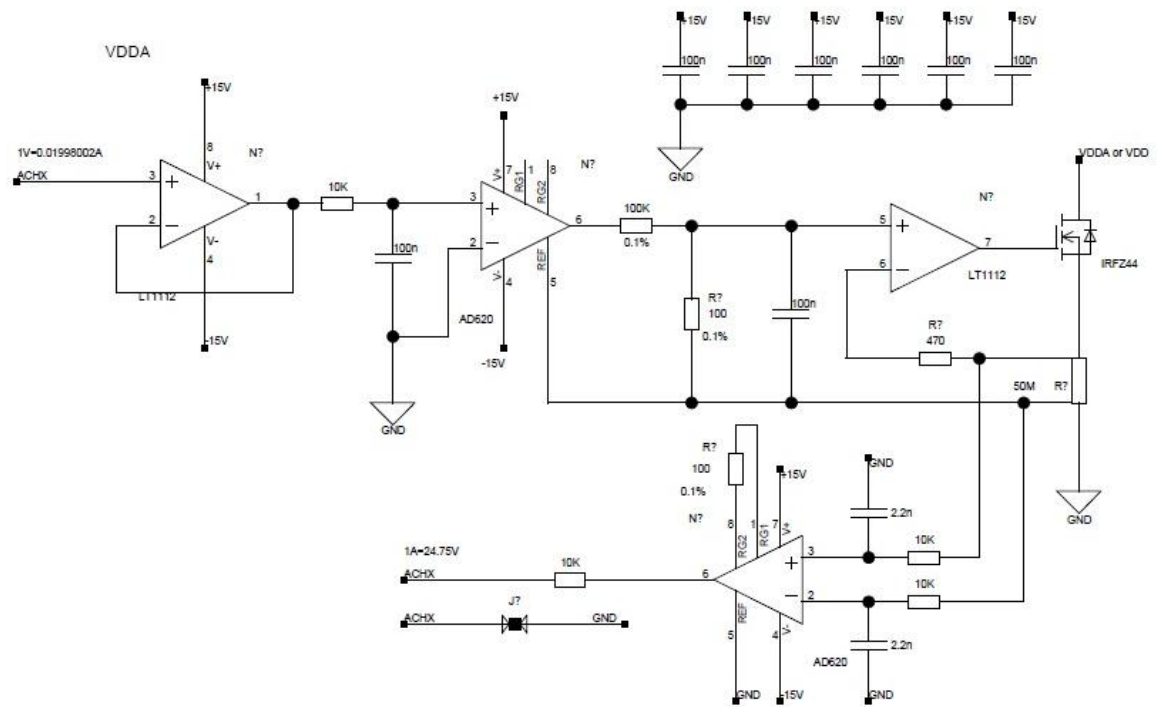
Tämän insinööriyön loppuvaiheessa päätettiin, että testeristä tehtäisiin yhteensopiva Genesis-testijärjestelmään. Piirikortin valmistajaa olisi tarvittaessa helpompi vaihtaa, jos testerin olisi Genesis yhteensopiva. Muutoksen takia edellä mainittuun laitteiston kokoonpanoon tehdään muutoksia.

Testi-fixtureen sisään tuleva piirikortti sisältää mittauselektroniikkaa ja testineulat. Mittauselektroniikka sisältää kuormia, virranmittausvastuksia, jännitteenjakovastuksia, vahvistimia, testerin EEPROM-piirin, yms.

Jännitteet mitataan suoraan 10 k Ω sarjavastuksen kautta tiedonkeruukortin analogikanavalla. Sarjavastuksella suojataan analogikanavaa ylijännitteeltä, joka johtuu mahdollisesti viallisesta kortista. Mitattavat jännitteet ovat kaikki tiedonkeruukortin jännitealueen ± 20 V sisäpuolella, joten ne voidaan mitata ilman jännitteenjakoja. Virrat mitataan mittaamalla jännite tarkkuusvastuksen yli, jolloin virta saadaan laskettua ohmin lain mukaan. Boolean-tilojen mittaamiseen käytetään tiedonkeruukortin digitaalisia I/O-linjoja. Suoraan tiedonkeruukortilla mitattavien suureiden mittaustarkkuuteen vaikuttaa lähinnä tiedonkeruukortin mittatarkkuus, mikä on sellaisenaan riittävä.

MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortin prosessorilta kysytään tietoja UART:n kautta (UART = *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*). Prosessorille ladataan erillinen testausohjelmisto. Testausohjelmalta kysytään ainakin A/D-muuntimen arvoja ja kortin uniikki tunnus numero. Sarjaliikenteen protokollaa ei oltu vielä päätetty tämän insinööriyön tekovaiheessa, joten sarjaliikennetestejä ei päästy tekemään.

Kuvassa 12 (ks. seuraava sivu) on jänniteregulaattoreiden kuormittamiseen tarkoitettu vakiovirtakuormakytkentä. Testimäärittelyn mukaan testerin tulee pystyä asettamaan 1mA tai 20mA kuorma, kun jänniteregulaattoreille syötetään 3,7 V/5,0 V/8,0 V jännitteet. Tämän insinööriyön tekovaiheessa ei oltu vielä päätetty, että asetetaanko kuorma VDDA:lle vai VDD:lle. Kuvan 12 kytkentä on mitoitettu 20 mA:n testimäärittelyn mukaan.



Kuva 12. Vakiovirtakuormakytkenä

Kuormavirta johdetaan IRFZ44 fetin ja 50 mΩ virranmittausvastuksen läpi. Kuormaa ohjataan ohjausjännitteellä DAQ-kortin analogilähdöllä. Kuvassa 12 vasemmanpuoleinen operaatiovahvistin LT1112 on kytketty jännitteenseuraajaksi, jonka vahvistus on yksi. Jännitteenseuraajan tarkoitus on syöttää riittävästi virtaa kuormakytkenälle. AD620 instrumentointivahvistin siirtää tulon maatasoa vasten olevan jännitteen lähdön ja REF-nastan välille. AD620 instrumentointivahvistimen vahvistuskerroin on niin ikään yksi, koska siihen ei ole kytketty vahvistuksen asetusvastusta RG1:n ja RG2:n välille. Kun instrumentointivahvistimen nastaan 3 tuodaan 1V:n jännite, vastusjaon 100 Ω ja 100 kΩ jälkeen jännite oikeanpuoleisen operaatiovahvistimen LT1112 nastassa 5 on ohmin lain mukaan

$$\frac{100\Omega}{100\Omega+100k\Omega} \times 1V = 999\mu V.$$

Operaatiovahvistin LT1112 avaa fettiä IRFZ44, kunnes operaatiovahvistimen negatiivinen tulo saavuttaa sen positiivisen tulon. Täten virraksi saadaan

$$\frac{999\mu V}{50m\Omega} = 19.98mA.$$

Vakiovirtakuormakytkenän mittaustarkkuuteen vaikuttaa jännitejakoon käytettyjen vastusten toleranssit, kuormafettä ohjaavan operaatiovahvistimen *offset*-jännite, instrumentointivahvistimen *offset*-jännite sekä DAQ-kortin asetustarkkuus. Vahvistinten *offset*-jännitteet ovat korkeintaan 50 μV [15, s. 1; 16, s. 1]. Vahvistinten tuloimpedanssit ovat pieniä, joten *bias*-virrat eivät vaikuta merkittävästä mittatarkkuuteen. Myös tiedonkeruukortin asetustarkkuus voidaan jättää huomioimatta. Mittausten tarkkuuslaskelmat on tehty sellaisilla komponenttiteranssien yhdistelmällä, jolla saadaan aikaan isoin mahdollinen virhe. Silloin vakiovirtakuormapiirin aiheuttama virhe on LT1112-piirin sisäänmenossa 1 V:n ohjausjännitteellä korkeintaan

$$\begin{aligned} & \frac{R1 \times 1,001}{R1 \times 1,001 + R2 \times 0,999} \times (V_{in} + LT1112_1_{offset} + AD620_{offset}) - 999\mu\text{V} \\ &= \frac{100\Omega \times 1,001}{100\Omega \times 1,001 + 100\text{k}\Omega \times 0,999} \times (1,0\text{V} + 50\mu\text{V} + 50\mu\text{V}) - 999\mu\text{V} \\ &\approx 2\mu\text{V}. \end{aligned}$$

Missä V_{in} on sisäänmenojännite

LT1112_1 on jännitteenseuraja operaatiovahvistin

R1 on 100 Ω vastus

R2 on 100 k Ω vastus.

Kun otetaan huomioon LT1112-piirin *offset*-jännite sekä kuormavastuksen toleranssi, saadaan vakiovirtakuormakytkenän virraksi korkeintaan

$$\frac{999\mu\text{V} + 2\mu\text{V}}{50\text{m}\Omega \times 0,999} = 20,40\text{mA}$$

Jolloin koko kytkennän epätarkkuus on korkeintaan

$$\frac{20,40\text{mA} - 19,98\text{mA}}{19,98\text{mA}} \times 100\% = 2,10\%.$$

Kuvassa 12 (ks. edellinen sivu) olevaa alempaa instrumentointivahvistinta käytetään jännitteen mittaamiseen. Instrumentointivahvistimen vahvistus on mitoitettu 100 Ω vastuksella, jolloin sen ulostulojännitteeksi saadaan 1 A:n virralla

$$\left(\frac{49,4\text{k}\Omega}{100\Omega} + 1 \right) \times 1\text{A} \times 50\text{m}\Omega = 24,75\text{V} \text{ [15, s. 10].}$$

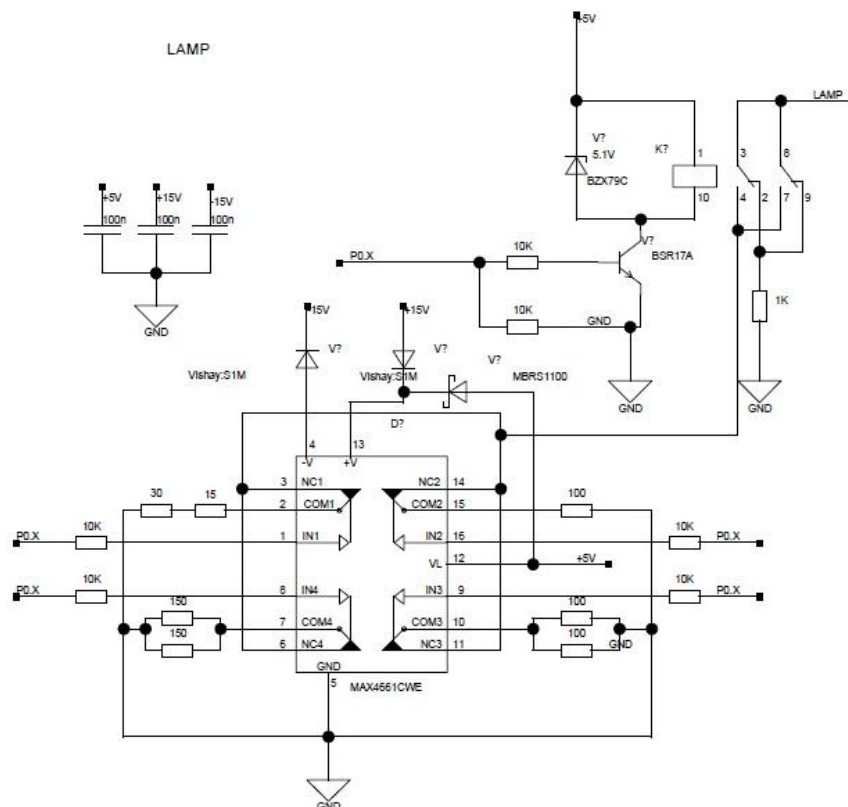
Vahvistimen asetustarkkuus on 0,15 % [15, s. 10] ja vastusten toleranssit 0,1 %, jolloin kytkennän ulostulojännite on 1 A:n virralla korkeintaan

$$\left(\frac{49.4k\Omega}{100\Omega \times 0,999} + 1 \right) \times 1,0015 \times 50m\Omega \times 1,001 = 24,84V$$

ja maksimivirhe on korkeintaan

$$\frac{24,84V - 24,75V}{24,75V} \times 100\% = 0,48\%.$$

Kuvassa 13 on esitetty kuormavastusten vaihtoon tarkoitettu kytkentä. Piirillä pystytään simuloimaan MiMS-hiilidioksidimittauskortin infrapunalamppua vaihtamalla sen paikalle erikokoisia vastuksia.



Kuva 13. Kytkentä kuormavastusten vaihtoon

Kytkiminä on käytetty MAX4661CWE-piirejä, sekä relettä. MAX4661CWE-piiri valittiin, koska sen sisäinen resistanssi on hyvin pieni, enimmillään 2,5 Ω [17, sivu 2]. Releen

sisäinen resistanssi on vielä pienempi, enimmillään 50 mΩ [18, sivu 5], mutta se vaatii ympärilleen paljon oheiselektronikkaa, joten niitä pyrittiin käyttämään vähemmän. Releen ohjaamiseen tarvitaan bipolaaritransistori ja zenerdiodi. MAX4661CWE-piiri sisältää 4 kytkintä, joita ohjataan tiedonkeruukortin digitaaliporteilla.

Kuormavastusten vaihtoon tarkoitetun kytkennän mittatarkkuuteen vaikuttaa kytkinpiirin sisäinen resistanssi, vastusten toleranssi sekä tiedonkeruukortin mittatarkkuus. Tiedonkeruukortin asetustarkkuus on niin tarkka, että se voidaan jättää huomiotta laskuissa. Pienin asetettava vastus on 45 Ω, joten jos otetaan huomioon kytkinpiirin sisäinen resistanssi, sekä vastusten toleranssi 0,1 %, kytkinpiirin aiheuttama virhe kytkennän resistanssissa on korkeintaan

$$2,5\Omega + 45,0\Omega \times 0,001 = 2,545\Omega$$

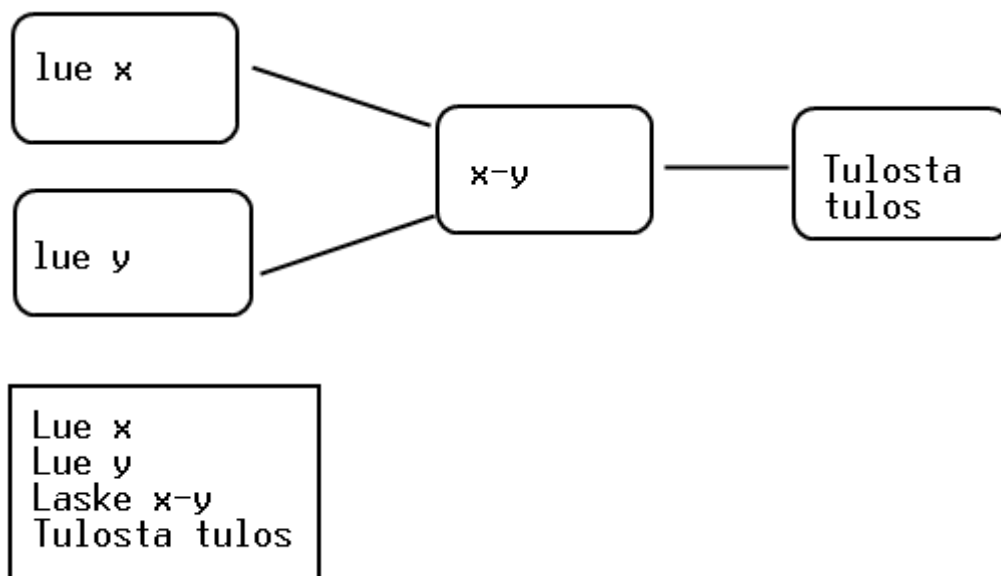
ja prosentteina virhe on korkeintaan

$$\frac{2,545\Omega}{45\Omega} \times 100\% = 5,66\%.$$

4 Korttitesterin testausohjelmiston kuvaus

4.1 LabVIEW-ohjelmointi

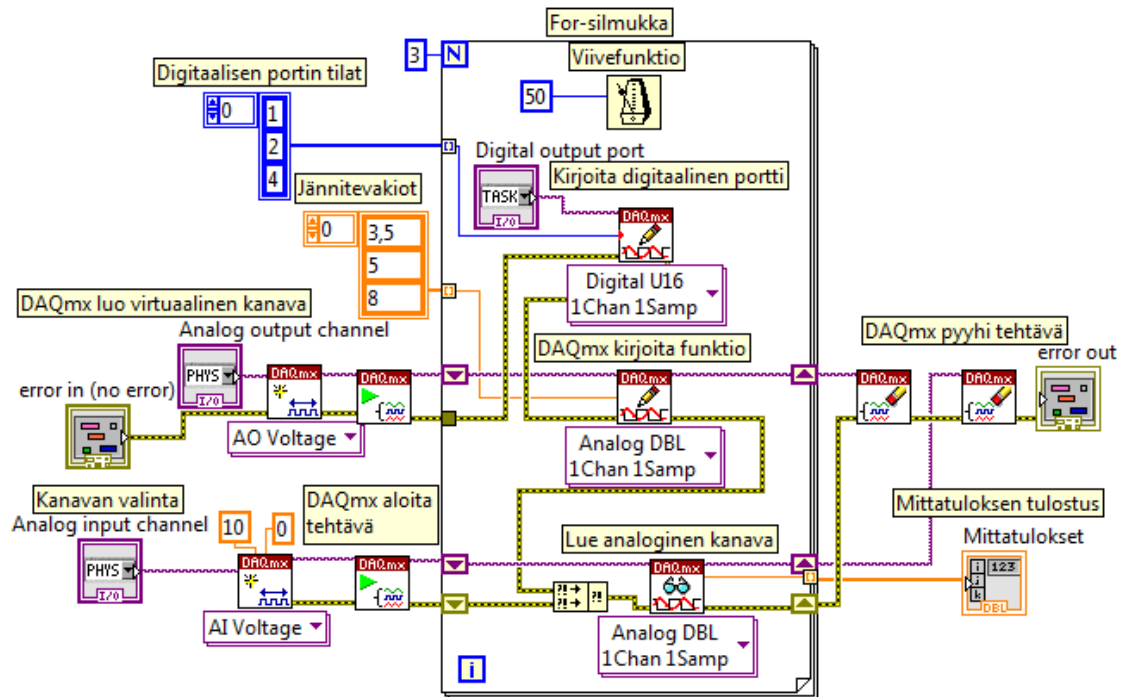
LabVIEW on National Instrumentsin kehittämä graafinen ohjelmointikieli, joka perustuu G-kieleen. LabVIEW'tä käytetään tyypillisesti mittaus-, valvonta- ja testaussovelluksissa. Perinteisissä, proseduraalisissa ohjelmointikielissä ohjelmaa suoritetaan rivi kerrallaan tarkkaan määritetyssä järjestyksessä. LabVIEW-ohjelmoinnissa erilaisia toimilohkoja liitetään toisiinsa kiinni johdoilla. Toimilohko toteutetaan, kun sen kaikki tarvittavat parametrit ovat saatavilla. Useita toisistaan riippumattomia toimilohkoja voidaan suorittaa rinnakkain. Tällaista ohjelmointia kutsutaan tietovuo-ohjelmoinniksi. Näin ollen LabVIEW tukee hierarkkista ja modulaarista ohjelmointia [19; 20].



Kuva 14. Tietovuo-ohjelmoin suoritusta vastaava toimintakaavio (ylin) ja vastaava proseduraalinen ohjelma

Kuvan 14 proseduraalisessa ohjelmassa tietue x luetaan aina ennen tietuetta y . Jos y :n lukemiseen ei tarvita x :ää, kuvattu suoritusjärjestys on tarpeeton. Ylemmän kuvan tietovuo-ohjelmassa laskutoimitus suoritetaan heti kun sekä x , että y ovat saatavilla. Jos käytössä on useampi prosessoriydin, voidaan x ja y lukea samanaikaisesti. LabVIEW:ssä tämä tapahtuu automaattisesti. Mikäli x ja y vaatii paljon laskentatehoa, saadaan vuokaaviorakenteesta paljon hyötyä. [21, s. 39, 64; 22.]

LabVIEW'illä tehtyä ohjelmaa kutsutaan virtuaaliseksi instrumentiksi, eli vi:ksi. Virtuaalisen instrumentin voi rinnastaa tekstipohjaisista ohjelmointikielistä tuttuun aliohjelmaan. Yksi vi koostuu etupaneelistä ja lohkokaaviosta. Etupaneelissa on käyttäjälle tarkoitetut ohjaus- ja visualisointikomponentit. Ohjelmointi tehdään lohkokaaviossa, jossa määritellään etupaneelin komponentteihin liittyvät algoritmit ja laskennat. Lohkokaaviossa yhdistellään LabVIEW'n valmiita toimilohkoja, muita virtuaali-instrumentteja tai muilla ohjelmointityökaluilla tehtyjä ohjelmakirjastoja. Lähes kaikki tekstipohjaisista ohjelmointikielistä tutut rakenteet, joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta, ovat käytössä vi:n toiminnallisuuden määrittelyyn. Eriväriset johdot kuvaavat erilaisia tietotyyppejä. [21, s. 43–46; 23.]



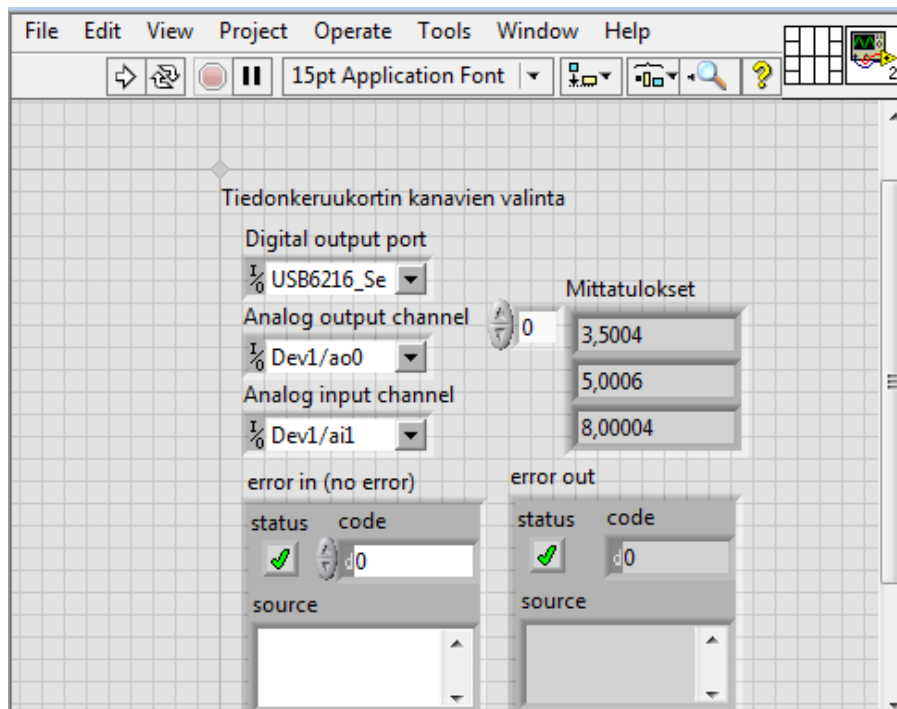
Kuva 15. LabVIEW-lohkokaavio; esimerkkiohjelma

Kuvan 15 LabVIEW-esimerkkiohjelmalla voidaan ohjata sivulla 19 esitettyä kuormavastuksenvaihtokytkentää. Ohjelmassa mitataan MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortin infrapunalamppua simuloivien vastusten jännitteet. Jännitteet mitataan kolmella eri käyttöjännitetasolla ja kolmella infrapunalamppua simuloivalla vastusarvolla.

Ohjelmassa luodaan virtuaaliset kanavat analogisten kanavien kirjoittamiseen ja lukemiseen. Kanavia kirjoitetaan ja luetaan for-silmukan sisällä 3 kertaa. Tiedonkeruukortin analogiseen ulostulokanavaan ja digitaaliseen *output*-porttiin kirjoitetaan uusi arvo jokaisella for-silmukan iteraatiolla. Tiedonkeruukortin digitaaliseen porttiin kirjoitetaan tiloja, joilla ohjataan kuvan 13 (ks. sivu 18) MAX4661CWE-piirin kytkimiä. Kytkimillä vaihdetaan erikokoisia vastuksia infrapunalamppun tilalle. Porttiin kirjoitetaan Boolean-tilat 001, 010 ja 100 (eli desimaaliluvut 1, 2 ja 4). Analogiseen ulostulokanavaan kirjoitetaan MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortin käyttöjännite 3,5 V, 5,0 V ja 8,0 V. Jännitteet vastusten yli mitataan tiedonkeruukortin analogisella sisäänmenokanavalla. Lopuksi mittatulokset tulostetaan taulukkoon ja virtuaaliset kanavat pyyhitään pois LabVIEW'n muistista.

LabVIEW-esimerkkiohjelmassa on käytetty NI-DAQmx ajuripaketin mukana tulevia DAQmx vi:itä, millä ohjataan tiedonkeruukortin analogi- ja digitaalikanavia. DAQmx-

paketti sisältää ajurit ja funktiot MiMS CO2 hiilidioksidimittauskortissa käytettäviin tiedonkeruu- ja jännitelähdekortteihin. Samoilla DAQmx-funktioilla voidaan ohjata satoja eri laitteita.

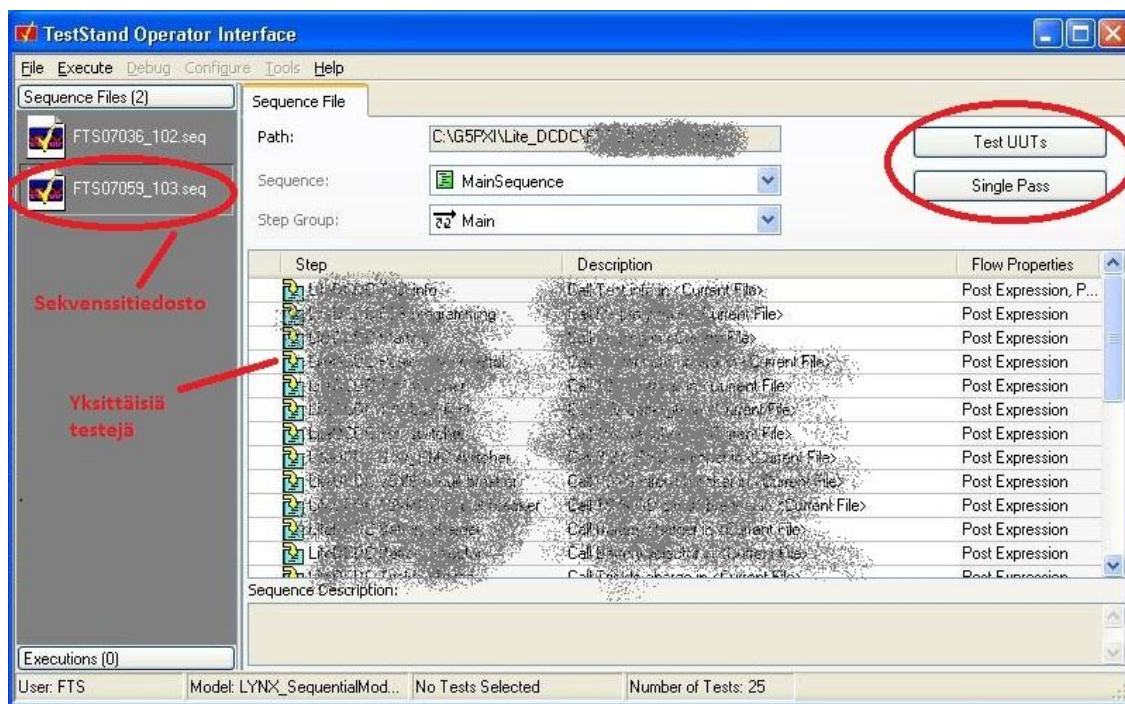


Kuva 16. LabVIEW-etupaneeli; esimerkkiohjelma

Kuvassa 16 on esitetty LabVIEW-esimerkkiohjelman etupaneeli. Etupaneelista pystytään valitsemaan tiedonkeruukortin käytettävät kanavat sekä nähdään mittatulokset.

4.2 TestStand-käyttöliittymä

National Instrumentsin TestStand-ohjelmisto on tarkoitettu automatisoitujen validointi-, prototyyppi- ja tuotantotestauksen testausjärjestelmien toteuttamiseen. TestStand tarjoaa liityntärajapinnat mm. LabVIEW-, LabWindows- ja C++-kehitysympäristöihin sekä adapterit funktioiden kutsumiseen edellä mainittujen kielten lisäksi myös muilla yleisimmillä ohjelmointikielillä. TestStand toimii sekvensserinä, jolla voidaan suorittaa esimerkiksi LabVIEW:lla tehtyjä mittauksia peräkkäin ja luoda testituloksista testiraportti tietokantaan.



Kuva 17. TestStand operaattorin käyttöliittymä.

Kuvassa 17 on operaattorille tarkoitettu TestStand käyttöliittymä. MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortti testataan tällaisella käyttöliittymällä. Testaajalle testausohjelma on hyvin yksinkertainen. Testaajan tulee avata kortille tarkoitettu *sequence file*, painaa *Test UUTs*-nappia ja syöttää koneelle testattavan kortin sarjanumero sekä kortin taso. Kun kaikki sekvenssin testit on käyty läpi, TestStand palauttaa käyttäjälle tiedon *PASS* (hyväksytty) tai *FAIL* (hylätty). Samalla TestStand muodostaa myös testiraportin. *Single pass* painikkeella voidaan ajaa yksittäisiä testejä, jolloin testiraporttia ei muodosteta. *Single pass* on tarkoitettu lähinnä vian hakuun tai korjatun kortin uudelleen testaamiseen. [24.]

5 Yhteenveto

Insinöörityössä oli tavoitteena suunnitella testausjärjestelmä MiMS CO₂-hiilidioksidimittauskortille. Testausjärjestelmällä testataan piirikortit ennen niiden asentamista valmiiseen tuotteeseen, minkä jälkeen piirikorttia ei enää pystytä korjaamaan.

Testausjärjestelmän laitteistokokoonpanosta päätettiin, mutta sitä jouduttiin muuttamaan, koska testattavan kortin tuotekehitys oli vielä kesken. Testijärjestelmän lopullisia

vaatimusmäärittelyjä ei vielä saatu. Osa testausjärjestelmän elektroniikasta ja LabVIEW-koodista saatiin suunniteltua. Projektin aikatauluun nähden testausjärjestelmän suunnittelu saatiin hyvään vaiheeseen.

Tulevaisuudessa projekti jatkuu testilaitteiston ja testiohjelmiston suunnittelulla, jonka jälkeen testijärjestelmä verifioidaan ja validoidaan. Valmis testausjärjestelmä on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2014 loppupuolella.

Lähteet

- 1 Fortune 500 lista. Verkkodokumentti.
<<http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune500/>> Luettu 2.6.2013.
- 2 Businessweek verkkolehti.
<<http://investing.businessweek.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=320596>> Luettu 12.6.2013.
- 3 Mainstream or Sidestream Capnography? Verkkodokumentti
<<http://www.oem.respironics.com/Downloads/Main%20vs%20Side.pdf>> Luettu 23.6.2013.
- 4 Physics of capnography. Verkkodokumentti.
<<http://www.capnography.com/Physics/typesofcapnometers.htm>> Luettu 23.6.2013
- 5 How Does an NDIR CO2 Sensor Work? Verkkodokumentti.
<<http://www.co2meter.com/blogs/news/6010192-how-does-an-ndir-co2-sensor-work>> Luettu 25.6.2013
- 6 Beerin ja Lambertin laki. Wikipedia vapaa tietosanakirja.
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Beerin_ja_Lambertin_laki> Luettu 1.7.2013.
- 7 U.S. Food and Drug Administration. Verkkodokumentti. <<http://www.fda.gov/>> Luettu 11.6.2013
- 8 First pass yield. Wikipedia vapaa tietosanakirja
<http://en.wikipedia.org/wiki/First_pass_yield> Luettu 20.6.2013
- 9 6 sigma. Wikipedia vapaa tietosanakirja. <http://fi.wikipedia.org/wiki/6_Sigma> Luettu 3.7.2013
- 10 What is Six Sigma? GE:n verkkodokumentti.
<<http://www.ge.com/en/company/companyinfo/quality/whatis.htm>> Luettu 25.7.2013
- 11 What is Six Sigma? Verkkodokumentti.
<<http://maaw.info/SixSigmaSummary.htm>> Luettu 25.7.2013
- 12 Salomäki, Rauno. 1999. Suorituskykyiset prosessit – Hyödynnä SPC. Helsinki: MET. Luettu 22.7.2013

- 13 Kuva, National Instrumentsin verkkosivut.
<http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=207417&mTitle=NI PXIe-6363&mGallery=set_pxie-6363> Luettu 12.8.2013
- 14 Kuva, National Instrumentsin verkkosivut.
<<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/204239>> Luettu 12.8.2013
- 15 AD620-piirin tietolehti. Verkkodokumentti
<<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48090/AD/AD620.html>> Luettu 28.8.2013
- 16 LT1112-piirin tietolehti. Verkkodokumentti
<<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/111214fb.pdf>> Luettu 28.8.2013
- 17 MAX4661CWE-piirin tietolehti. Verkkodokumentti.
<<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/73433/MAXIM/MAX4661CWE.html>> Luettu 28.8.2013
- 18 TQ-releen tietolehti. Verkkodokumentti. <<http://datasheet.octopart.com/TQ2-5V-Panasonic-datasheet-8361856.pdf>> Luettu 28.8.2013
- 19 LabVIEW-ohjelmointi. Verkkodokumentti.
<<http://www.mit.jyu.fi/opiskelu/seminaarit/bak/labview/>> Luettu 24.7.2013
- 20 National Instruments. Verkkodokumentti.
<<http://sine.ni.com/np/app/main/p/docid/nav-104/lang/fi/fmid/1762/?metc=mtwpmu>> Luettu 24.7.2013
- 21 Johnson, Jennings. 2006. LabVIEW Graphical Programming, Fourth Edition. McGraw-Hill. Luettu 25.7.2013
- 22 Parallel Programming – Multicore systems. Oslon yliopisto. Luentomoniste.
<<http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS3240/v11/undervisningsmateriale/forelesninger/Lecture9%20%20Parallel%20programming%20v2.pdf>>
- 23 ICT, In Circuit Test Tutorial. Verkkodokumentti. <http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/ate/ict-in-circuit-test-tutorial.php> Luettu 1.8.2013
- 24 What is TestStand? Verkkodokumentti. <<http://www.ni.com/teststand/whatis/>> Luettu 2.8.2013

